

espace géographique défini et grandeur nature. Actuellement, le projet compte 38 partenaires issus du monde industriel et académique.

En Allemagne, les entreprises participant au Projet de démonstration de l'aéroport de Munich (Munich Airport Demonstration Project) font la démonstration de systèmes de distribution d'hydrogène et de l'utilisation quotidienne de véhicules fonctionnant avec des systèmes-piles à hydrogène direct. Deux unités ont été installées : une pour les trois bus MAN avec de l'hydrogène gazeux (GH₂) et une pour l'alimentation de berlines BMW avec de l'hydrogène liquide (LH₂). Le projet a débuté en 1999 et doit se poursuivre jusqu'en 2006 avec pour budget total 42 M €. Une extension de ce projet (Projet ARGEMUC) est en cours avec une production locale d'hydrogène (reformage de gaz naturel), un bus MAN à pile à combustible Ballard et un élévateur à pile à combustible Proton Motor.

5.4 Le Programme canadien des Adhérents Pionniers H2 (APh2)

Ce programme novateur, géré par le Ministère de l'Industrie canadien, vise à faire la démonstration de nouveaux concepts de la technologie de l'hydrogène menant vers « l'économie de l'hydrogène ». On trouve parmi ces nouveaux concepts notamment les « autoroutes de l'hydrogène » ou encore les « villages de l'hydrogène ».

Les technologies pouvant faire l'objet de développement au sein du programme APh2, jusqu'au stade de production pilote, sont :

- tous les types de piles à combustible;
- les autres technologies et matériaux servant à la production d'énergie à partir de l'hydrogène
- les technologies et les matériaux servant à la production, au stockage et à la distribution de l'hydrogène à partir de sources d'énergie renouvelables ou non renouvelables;
- des prototypes d'applications portables, stationnaires, mobiles et de ravitaillement utilisant la technologie de l'hydrogène.

Les financements publics peuvent couvrir jusqu'à 50% des coûts (75% dans des cas exceptionnels en termes de gains environnementaux et économiques pour la société canadienne). Ces subventions sont en principe remboursables sous forme de royalties sur les revenus générés par les projets financés, mais il est spécifié dans les statuts du programme que « *toutefois, on s'attend à ce que peu ou pas de paiements soient recueillis* »²⁹. Il est en effet précisé que ces projets ne génèrent habituellement pas de revenus. Cependant, l'effet est non négligeable dans une perspective de progrès incrémental car la mise en œuvre de ces activités permettront aux entreprises de réaliser « *d'autres travaux de R-D sur les technologies de prochaine génération* ».

Bien que les financements octroyés à ce jour soient encore modestes par rapport aux 215 millions de dollars canadiens, ce programme est très intéressant car, contrairement aux initiatives reposant sur le concept d'économie de l'hydrogène qui abrite le plus souvent des projets à long terme et peu concret, ce programme est axé sur des projets de démonstration dans une perspective de développement graduel des technologies et des marchés. Ainsi, les concepts d'autoroutes et villages de

²⁹ Disponible sur le site du programme

l'hydrogène sont conçus ici de telle sorte à offrir « *un terrain d'essai où les codes et normes nécessaires à la progression et à l'essor d'une industrie prometteuse seront définis* »³⁰. Fortement médiatisées, les réalisations de ce programme sont également un moyen de développer l'acceptabilité des technologies de l'hydrogène et d'envoyer un signal fort à l'industrie canadienne et internationale concernant la réalité de l'engagement canadien sur ces technologies.

Plus précisément, les objectifs stratégiques officiels du programme APh2 sont les suivants³¹:

- L'accroissement de la sensibilisation et de l'acceptation du public, des consommateurs et des investisseurs relativement aux capacités de l'hydrogène.
- L'intégration des technologies de l'hydrogène ou des technologies compatibles avec celui-ci.
- L'édification d'infrastructures de l'hydrogène.
- L'acquisition et le perfectionnement de compétences et d'une chaîne d'approvisionnement au sein de l'industrie de l'hydrogène.
- L'établissement de codes et de normes pour l'industrie de l'hydrogène.
- Le renforcement du rendement, de la fiabilité, de la durabilité et de la viabilité économique des technologies de l'hydrogène ou des technologies compatibles avec celui-ci.

Les résultats attendus sont, en plus des gains environnementaux à attendre du développement d'une économie de l'hydrogène:

- L'acceptation accélérée par le marché des technologies de l'hydrogène et des technologies compatibles;
- L'attraction et rétention de talents à l'échelle internationale;
- L'attraction d'investissements canadiens et étrangers.

³⁰ Citation de la plaquette de présentation du programme, disponible sur le site du programme

³¹ Présenté dans les statuts du programme, disponible sur le site du programme

Tableau 16: Projets financés dans le cadre du programme des adhérents pionniers H2

Projets	Aide (M\$ CAN)	Partenaires	Détails des démonstrations
Technologies de l'hydrogène dans les véhicules utilitaires (PEMFC)	4,2	Hydrogenics Corporation John Deere Greenlight Power Technologies Marconi Corporation	Démonstration de quatre véhicules utilitaires à PAC Un poste de ravitaillement couplé avec éolienne produisant 65 kg d'H2/jour Générateur de secours pour les télécommunications Véhicule de livraison hybride avec installation de production et de stockage d'hydrogène sur le parc de la « flotte »
Piles à combustible aux fins de production d'électricité et de chauffage résidentiels (SOFC)	0,935	Fuel Cell Technologies Ltd., Ontario Power Generation Inc. Université de Toronto à Mississauga (+ non financées : Enbridge et Air Liquid Canada)	Démonstration de quatre piles à oxyde solide de 5kWe, disposées sous forme de mini-réseau pour fournir de l'électricité et du chauffage à une résidence pour étudiants de 12 unités à l'UTM
Systèmes d'alimentation sans coupure alimentés à l'hydrogène (PEMFC)	2	Ballard Power Systems MGE UPS Systems Bell Canada Holdings Emerson Network Power Group Praxair Canada Inc. Université de Toronto à Mississauga	Trois sites de démonstration distincts et trois applications pour chaque site (Système UPS pour les bâtiments, pour les pour les télécommunications en extérieur, pour une salle de serveurs)

6 Fonction de soutien au décollage de marchés précoces

6.1 Les bases de la fonction

Cette fonction est essentielle pour mettre sur le marché les premières générations de piles. Bien que moins utilisés que les programmes de R&D dans les phases préliminaires d'un processus d'innovation, plusieurs instruments de soutien sont déjà mis en place dans le domaine de la PàC, notamment par les Etats et régions aux Etats-Unis et au Canada.

Les instruments disponibles sont les suivants :

- Commandes publiques, civiles ou militaires
- Structure d'incitation fiscale et financière
 - A l'achat (pour compenser les surcoûts et les risques pesant sur es premières générations de systèmes-piles)
 - A l'investissement (stimulation du développement technologique et de la fabrication des produits)

Cependant, l'utilisation de ces instruments se heurtent généralement aux arguments suivants :

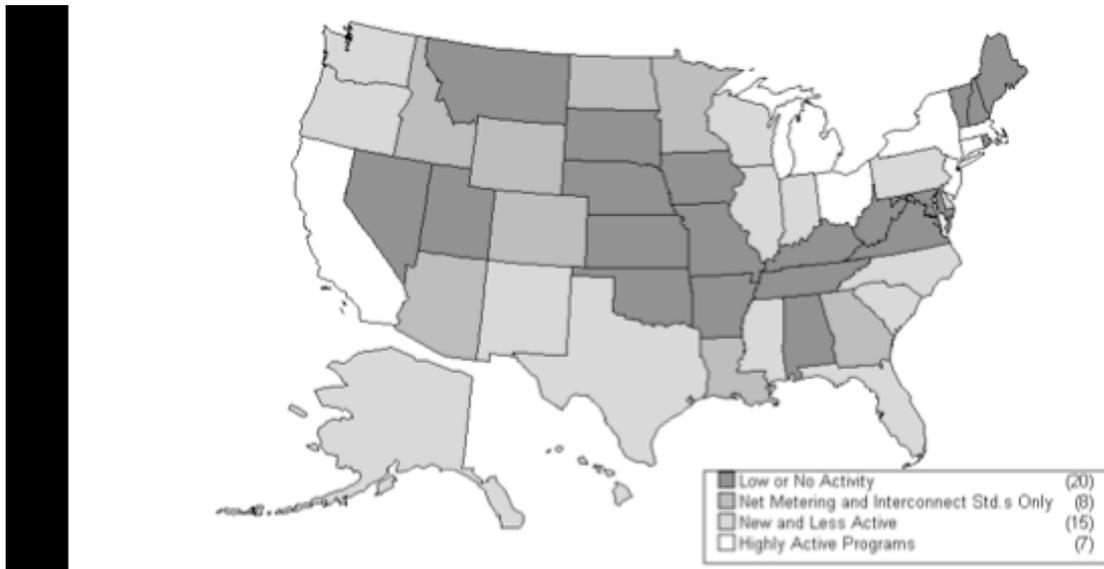
- Il n'existe encore quasiment pas d'offre de tels systèmes énergétiques pour les individus. La structure d'incitation doit donc avant tout cibler les utilisateurs industriels ainsi que les responsables d'achats ou de flottes captives dans les secteurs publics.
- Les résultats de telles subventions ont été très mitigés dans le cas du véhicule électrique à batterie dans les années 1990, ce qui laisse penser que tant que le produit n'offre pas les performances minimales requises un marché, même subventionner aura beaucoup de mal à se développer.

Il est donc très important d'arriver à lier soutien à la « demande » et à « l'offre » de systèmes-piles, ce qui renforce encore le besoin d'une coordination forte des divers instruments mis en place.

6.2 Structures d'incitation à l'offre de systèmes-piles aux Etats-Unis

La Californie est l'un des Etats qui a eu la politique la plus active historiquement, mais d'autres Etats sont également très présents comme le montre la carte ci-dessous, tirée d'un rapport de professeurs de l'université de Berkeley³².

Figure 10 : Les programmes de commercialisation des piles à combustible dans les Etats des Etats-Unis



Avec la Californie figurent ainsi le Connecticut, le Massachusetts, le Michigan, New York et l'Ohio comme les Etats les plus impliqués dans le soutien à la R&D et à la commercialisation des piles à combustibles.

³² E. Lipman, G. Nemet, D. Kammen: "A review of advanced power technology programs in the United States and abroad including linked transportation and stationary sector developments", Prepared for the California Air Resources Board and the California Stationary Fuel Cell Collaborative (CaSFCC), 30 Juin 2004.

Le Connecticut a développé un Fonds pour les Energies Propres (Clean Energy Fund³³) qui vise à développer un cluster autour de la pile à combustible et donc la création d'une industrie de la pile à combustible dans le Connecticut. La focale porte avant tout sur le stationnaire, et l'accent est mis d'une part sur la démonstration de piles à combustibles proches de la commercialisation de manière à hâter cette dernière, et d'autre part sur l'installation de piles à combustible prêtes commercialement à haute valeur ajoutée.

Le budget du CCEF est de 100 M\$ sur 5 ans pour soutenir les énergies renouvelables et les piles à combustible, ces dernières représentant un budget de 9 M\$ en 2002 et de 5 M\$ en 2001, via la Fuel Cell Initiative.

6.3 Structures d'incitation à l'achat de systèmes-piles aux Etats-Unis

La DSIRE (Database of State Incentives for Renewable Energy, www.dsireusa.org) fait le point notamment sur les incitations à l'achat de piles à combustible.

Ainsi, New York a mis en place un crédit d'impôt sur les équipements générant de l'électricité à partir des piles à combustible³⁴. Ce crédit d'impôts, mis en place en 2003, s'adresse aux individus, pour l'équipement de leur résidence, et représente 20% des coûts (pour un maximum de 1 500 \$ et dans la limite d'un coût de 6\$/W). Les piles à combustible correspondent à une taille de 25 kW rated baseload capacity et doivent relever de la technologie PEM (membrane échangeuse de protons).

La mesure « Renewable Energy Loans »³⁵ de l'Ohio est un autre exemple ; elle s'adresse entre autres aux piles à combustible. L'objectif est d'inciter à la mise en œuvre de projets d'efficacité énergétique et d'énergies renouvelables de particuliers, d'entreprises, d'écoles etc. La mesure réduit le taux d'intérêt auprès de 11 banques de l'Ohio pour l'emprunt d'argent visant à financer un projet sus-cité. Les projets doivent être situés sur le territoire d'une des cinq compagnies de distribution d'électricité partenaires. Les prêts pour les projets résidentiels représentent de 5 000 à 25 000 \$, et les projets commerciaux et institutionnels de 5 000 à 500 000 \$. Les industries éligibles doivent être des PME au sens de la Small Business Administration.

6.4 Structure d'incitation liant offre et demande aux Etats-Unis

Sans doute l'expérience la plus intéressante de structures d'incitation aux marchés précoces de véhicules alternatifs tentant de concilier le décollage de marchés préliminaires d'un produit radicalement nouveau et le développement des technologies sous-jacentes est à rechercher dans le domaine du véhicule électrique à batterie en Californie dans les années 1990. Le *ZEV mandate* était à l'origine une réglementation environnementale très contraignante votée en 1990 par le CARB (Californian Air Resource Board) obligeant les principaux constructeurs automobiles à mettre sur le marché en Californie certains quotas de véhicules à émission nulle dès 1998, ces quotas augmentant ensuite en 2001 et 2003. Suite à une opposition très forte des constructeurs automobiles – notamment américains – à cette première version, le

³³ <http://www.ctcleanenergy.com>

³⁴ http://www.tax.state.ny.us/pdf/2004/fillin/inc/it255_2004_fill_in.pdf

³⁵ www.odod.state.oh.us/cdd/oe/

mandat est remplacé en 1996 par des *Memoranda of Agreement* entre le CARB et chacun des sept constructeurs concernés par la réglementation .

Ces accords représentent une initiative concertée et négociée visant au développement parallèle du marché du VE et des technologies de systèmes électrochimiques pour VE. Les crédits accordés aux constructeurs automobiles pour chaque véhicule proposé à la vente, à la location ou à toute forme d'usage quotidien sont différenciés selon les technologies de systèmes électrochimiques utilisées : plus l'énergie spécifique de la batterie ou plus l'autonomie mesurée du VE est élevée, plus le nombre de crédits est important (*cf.* Tableau 17 et Tableau 18). Avant l'instauration de ce système dit des « crédits ZEV multiples », la correspondance était immédiate : un véhicule électrique commercialisé quel qu'il soit comptait pour un crédit ZEV³⁶.

Tableau 17 : Nombre de crédits ZEV alloués en fonction de l'énergie spécifique

Energie spécifique en Wh/kg	Nombre de crédits ZEV alloués par VE
40 (pour 1998) 50 (à partir de 1999)	1
60	2
90	3

Source : CARB, ZEV Mandate, Final Regulation Order, Section 1960.1, Title 13

Tableau 18 : Nombre de crédits ZEV alloués en fonction de l'autonomie du véhicule

Nombre de crédits ZEV alloués par VE	Modèles de VE pour les années 1996, 1997, 1998	Modèles de VE pour les années 1999 et 2000	Modèles de VE pour les années 2001 et 2002
2	Pas de minimum	>100	>140
3	>70	>130	>175

Source : CARB, ZEV Mandate, Final Regulation Order, Section 1960.1, Title 13

Ainsi, selon ce nouvel accord l'*EV Plus* de Honda (batteries Ni/MH) comptait pour deux crédits ZEV, de même que le Toyota *RAV-4* (batteries Ni/MH). Nissan, grâce à ses batteries lithium-ion, pouvait recevoir trois crédits pour chacune de ces *Altras* (de sorte, par exemple, qu'il lui a suffi de 30 VE en 1998 pour remplir les obligations contractuelles de son MOA). Chrysler et Ford, respectivement sur leur minivan *EPIC* et *Ranger EV*, utilisant tous les deux des batteries plomb avancées (Electrosorce), n'ont eu droit qu'à un crédit ZEV. Enfin, GM ne recevait aucun crédit pour son *EVI* originel (équipé de batteries plomb traditionnelles) et deux crédits pour ceux qui étaient équipés de batteries Ni/MH.

Pus tard, des négociations ont également eu lieu concernant le nombre de crédits qu'il serait possible d'accorder à des véhicules à piles à combustible. Cette réglementation a depuis connu de multiples modifications, dégageant les constructeurs automobiles de toute obligation, de sorte que le système des crédits partiels n'avait plus lieu d'être et a été éliminé en conséquence.

Des propositions ont également été faites pour appliquer ce concept de réglementation différenciée selon des critères de performance des technologies en développement a

³⁶ Ce qui avait incité les constructeurs automobiles à prévoir d'équiper de batteries plomb les premières générations de véhicules électriques du fait qu'elles étaient moins coûteuses tout en comptant autant dans le *ZEV Mandate* qu'une technologie plus avancée mais plus coûteuse.

au système de subvention à l'achat de VE. Ainsi aux Etats-Unis, l'Energy Policy Act de 1992 offrait un abattement fiscal de 10% du coût d'achat d'un véhicule électrique à batterie (pour un montant maximum de 4000\$). Les instances de l'USABC – consortium de R&D américain sur les batteries avancées pour véhicule électrique – a proposé en 1996 aux autorités américaines que cet abattement fiscal passe à 20% pour les VE équipés de batteries avancées.

7 Fonction instauration de performances-cibles et évaluation des systèmes

7.1 Les bases de la fonction

Cette fonction a pour objectif :

- d'une part, de réduire l'incertitude qui règne sur les performances minimales nécessitées par les différents groupes d'applications
- d'autre part, de soutenir la coordination des activités de R&D en focalisant ces activités dans une direction commune et en leur offrant un environnement commun et pertinent des évaluations des performances atteintes.

Certaines des applications que l'on « destine » à la pile existent déjà, satisfaites par des technologies existantes. C'est le cas des groupes électrogènes qui fonctionnent actuellement sur la base de moteurs diesels, des générateurs de secours assurés par des batteries plomb et des applications électroniques portables qui profitent des progrès des batteries avancées. C'est le cas également de l'automobile où la pile doit concurrencer les technologies de moteurs à combustion internes. Pour ces applications existantes, les niveaux de performances atteints par les technologies actuelles fixent en grande partie le cahier des charges minimal que la pile se doit de satisfaire. Les performances requises du véhicule individuel sont ainsi souvent dérivées des performances atteintes par les véhicules actuels. Par exemple, le coût requis par le programme américain FreedomCAR est de 45\$/kW, ce qui est annoncé comme étant le prix qui devrait permettre à la PàC de concurrencer le moteur thermique.

D'autres applications, comme la cogénération résidentielle sont nouvelles. L'usage exact qu'en feront les foyers, même si on connaît bien les courbes de charges thermiques d'un « foyer moyen », reste une inconnue. Le modèle économique de la cogénération individuelle, dont dépend non seulement le coût acceptable mais aussi des variables telles que la puissance électrique et thermique nécessaire pour la rentabilité globale du système, notamment demeure le sujet de débats animés dans la filière.

De plus que l'application existe déjà ou soit nouvelle, la pile à combustible, comme toute technologie environnementale, se confronte à une inconnue de taille, à savoir les arbitrages entre coûts supplémentaires, performances inférieures et bénéfices environnemental: quels surcoûts ou performances inférieures (par exemple un délai de pré-chauffage de la pile au démarrage) les clients potentiels seraient-ils capables de supporter en fonction des gains environnementaux perçus ? Les études de marché sont très difficiles à mettre en œuvre dans ce domaine car très peu de consommateurs ont une expérience des attributs positifs et négatifs des piles à combustible. Faute de

données issues d'expériences réelles, ces études procèdent le plus souvent de modèles basés sur des « préférences statuées » (*i.e.* issues de déclarations d'intentions) et non sur des « préférences révélées » (issues de données recueillies dans l'usage). Les ventes des premières générations de véhicules électriques à batterie, qui se basaient, faute de mieux, sur les déclarations d'intentions d'achats, ont durement rappelé aux constructeurs automobiles pionniers (GM, PSA, Renault) qu'il était difficile de retrouver les résultats des préférences statuées dans les chiffres de ventes réels.

Dans ce contexte d'incertitude, il est nécessaire de stabiliser un cahier des charges aussi précis que possible, de préférence à plusieurs horizons temporels pour ne pas « geler » la technologie et au contraire fixer des jalons pour la progression de ses performances.

Les cahiers des charges des industriels sont le plus souvent confidentiels car révélateurs de leur positionnement et de leurs ambitions dans le domaine. Ainsi, notamment dans l'industrie automobile où la concurrence est très forte, les constructeurs divulguent ces cahiers des charges uniquement à leurs fournisseurs potentiels – ou les développent avec eux – dans le cadre d'accord de coopération.

Les cahiers des charges issus des initiatives publiques – moins précis que ceux des industriels – sont destinés à l'audience la plus large possible. La diffusion de ces performances-cibles est souvent utilisée par les pouvoirs publics comme signal pour guider les activités de recherche et d'innovation des acteurs déjà en place sur des technologies soumises à une forte incertitude. C'est aussi un moyen d'attirer de nouveaux acteurs industriels en clarifiant les objectifs à poursuivre. En effet, si les principaux fournisseurs de composants et, surtout, les intégrateurs-système ont déjà établi des relations privilégiées avec un ou plusieurs clients, ce n'est pas le cas de nombreux acteurs qui sont encore en position de veille sur le domaine.

Les performances-cibles peuvent ainsi être un élément fédérateur au sein d'une industrie émergente. Il est en effet primordial, dans ces phases préliminaires, que ces valeurs cibles soient partagées par les acteurs-clés du domaine afin d'éviter la division des efforts dans de multiples directions sans possibilité d'établir des comparaisons entre les diverses technologies choisies, dans leurs projets respectifs. Les industriels utilisateurs, au premier rang desquels les constructeurs automobiles sont les principaux bénéficiaires d'une concurrence « saine et claire » dans le domaine de PàC. Ils jouent souvent un rôle déterminant dans la détermination et le cautionnement de ces performances cibles qui permettent une meilleure coordination du domaine tout en préservant la confidentialité de leurs plans stratégiques individuels.

7.2 Les ensembles de performances-cibles publics et privés au sein des programme de recherche ou des plans stratégiques nationaux

Des performances-cibles ont ainsi été produites en Europe aux Etats-Unis sur différentes applications (cf. Tableau 19). Elles sont associées à un plan stratégique national (c'est le cas de celles de la *roadmap* japonaise, cf. Annexe O) et/ou à un programme de recherche public-privé (c'est le cas de celles du FreedomCAR nord-américain). Les performances cibles éditées par le DOE ainsi que celles de la Plateforme Européenne sont présentées en Annexe M et Annexe N. Quel que soit le

domaine technologique, la France a très rarement publié de telles performances-cibles en dehors de projets ou – au mieux – d’appels d’offres ponctuels.

Tableau 19 : Performances-cibles établies aux USA et en Europe

	Applications	Puissance	Horizon
DOE	Véhicules individuels	50kW	2001, 2005 et 2010
	Générateurs de puissance auxiliaires	3-5 kW en moyenne 5-10 kW en crête	2006 et 2010
	Electronique portable	<50 We	2006 et 2010
Plateforme Européenne (SRA)	Véhicules individuels	100 kW	2015
	Générateurs de puissance auxiliaires	10 kW	2015
	Applications stationnaires	1-10 kW	2015
	Applications stationnaires	100 kW	2015

7.3 L'évaluation des systèmes-piles et le développement d'infratechnologies

L'existence de performances-cibles ne résout sensiblement l'incertitude sur les performances jugées nécessaires que si elles sont accompagnées de précisions quant à leur environnement de mesure et leur périmètre de validité : les performances et coûts requis, par exemple, s'appliquent-ils à l'ensemble du système ou seulement le coeur de pile. Un facteur d'ordre 2 – parfois plus – peut distinguer ces critères au niveau pile et système.

Ainsi, les performances-cibles doivent s'accompagner de procédures et de méthodes de test et de mesure standardisées qui assurent l'évaluation pertinente et objective des propriétés des technologies et des produits. Elles permettent que les résultats accomplis par les différents acteurs soient fiables et comparables. Leur fiabilité dépend d'investissement spécifique dans leur développement afin notamment que les essais en laboratoires ou sur banc se rapprochent le plus possible des performances en conditions réelles. Ceci permet des économies de coûts substantielles, bien qu'en dernier ressort la démonstration en condition réelle reste essentielle. Leur comparabilité dépend de leur acceptation la plus large possible par les acteurs de la filière, développeurs et utilisateurs. La co-existence de plusieurs standards international de mesure nuit donc à leur valeur individuelle.

Ces procédures et méthodes de test font partie d'un ensemble d'éléments accompagnant les développements technologique, généralement dénommés « infratechnologies ». Celles-ci incluent également les standards de compatibilité avec les systèmes dans lesquels la technologie s'insère, les interfaces avec les équipements de production, ainsi que les modèles et diverses méthodes de simulation/prévision des propriétés et performances des technologies.

Ces infratechnologies sont un élément essentiel d'une stratégie de niches de marché. Elles accroissent et garantissent la qualité des apprentissages issus de la démonstration et du déploiement des technologies sur les différentes applications. Elles permettent également de réduire les coûts et les délais des essais par le biais de tests et de contrôles non-destructifs, par l'identification et la simulation de voies

prometteuses ou au contraire de voies de garage. Elles participent donc aussi à une meilleure compréhension des performances et comportements des systèmes.

De l'avis des experts rencontrés, le niveau d'information sur les tests et mesures est encore bien insuffisant dans le domaine des PàC. Les performances déclarées par les fournisseurs par exemples sont bien souvent très ambiguës car non accompagnées de leur périmètre de validité (performance au niveau du cœur de pile ? du système entier ? incluant le système de stockage ?). Le même problème se retrouve au niveau des intégrateurs-systèmes qui sont obligés d'assembler des composants dont les performances ne sont pas garanties. Les membranes notamment, dont la durabilité conditionne celle de l'ensemble du système, sont souvent délivrées avec une information minimale.

8 Fonction d'orientation stratégique de la filière

Confrontés aux barrières technologiques et économiques persistantes après l'optimisme ambiant de la seconde moitié des années quatre-vingt-dix, les Etats-Unis, l'Europe et le Japon ont ces dernières années profondément réorganisé et augmenté leurs efforts respectifs autour de véritables plans stratégiques nationaux fixant les grandes orientations.

Ces éléments peuvent être associés à un programme de R&D ou bien avoir une portée plus générale en s'adressant à l'ensemble des acteurs d'une industrie ou domaine émergent. Dans le second cas, il peut s'agir d'une première étape menant à l'établissement d'un programme servant de structure abritant les activités compatibles avec la stratégie édifiée précédemment.

8.1 Les bases de la fonction

Dans un domaine sujet à de fortes incertitudes aussi bien technologiques que de marché, l'établissement par les pouvoirs publics en partenariat avec les acteurs industriels et scientifiques d'éléments d'orientation stratégique permet de créer un cadre de référence commun entre ces acteurs interdépendants. Ceci permet d'augmenter leur visibilité et donc de réduire leur réticence à investir dans le domaine.

Selon les cas et pays, ces éléments d'orientation stratégique peuvent prendre la forme de « Visions », « plans » et autre « *roadmaps* » fixant au-delà des déclarations d'intentions –nombreuses dans le domaine des piles à combustibles – des objectifs relativement précis selon un calendrier à moyen et long terme, des engagements en termes de dépenses publiques et plus généralement d'efforts de recherche publiques, et enfin des propositions de partenariats avec les acteurs industriels du domaine. Les objectifs peuvent être fixés en termes de performances-cibles à atteindre et/ou d'objectifs de pénétration de la technologie dans certains segments de marché.

Tableau 20: Récapitulatifs des éléments de programmation dans les principaux pays engagés sur la PàC

	Roadmap, plan, visions...	Programme intégré	Performance cibles	Objectif de marché
Etats-Unis	<p>A National Vision of America's Transition to a Hydrogen Economy - To 2030 and Beyond, 2002</p> <p>National Hydrogen Energy Roadmap, 2002 (DOE)</p> <p>Hydrogen Posture Plan, 2004 (DOE)</p> <p>Technology Roadmap for the 21st Century Truck Program</p>	<p>Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program (DOE)</p> <p>SECA (DOE + partenaires)</p> <p>FreedomCAR and Fuel (DOE + Big Three + ind. pétrol.)</p> <p>21st Century Truck Partnership (DOE + partenaires)</p>	<p>Targets du DOE (PEMFC pour diverses applications mobiles et stationnaires)</p> <p>Targets du FreedomCAR (VH à PEMFC)</p> <p>Targets du SECA (module SOFC standardisé)</p>	
Japon	Roadmap for PEFC Technologies Development 2003 (FCCJ)	Programme du METI	Performances cibles contenues dans la roadmap de la FCCJ	Objectifs du METI
Canada	<p>Canadian Fuel Cell Commercialization Roadmap, 2003 (Fuel Cells Canada)</p> <p>Développement en cours d'une <i>National Fuel Cell Strategy</i></p>		Non	
Europe Commission Européenne	<p>Hydrogen energy and Fuel cells - a vision for our future, 2003 (High Level Group)</p> <p>Strategic Research Agenda, 2004 (Plateforme Européenne)</p> <p>Deployment Strategy, 2004 (Plateforme Européenne)</p>	Projets des Programmes-Cadres	Performances-cibles contenues dans le SRA pour diverses applications mobiles et stationnaires	
Grande-Bretagne	A Fuel Cell Vision for the UK – the first steps, 2003 (DTI)	DTI Advanced Fuel Cell Programme (1992-)	Objectifs de coûts, peu précis	
France	Plan PAN-H intégré au rapport NTE	<p>Réseau PACo (depuis 1999)</p> <p>« Programme PAN-H » en cours d'élaboration</p>	Spécifiques à projets ou appels d'offre	Objectifs Pan-H Installation de 55 MW entre 2005 et 2010 >20 MW/an installés à partir de 2010

8.2 Un exemple de sélection collective des directions de recherche aux Etats-Unis: l'*Integrated PEM Fuel Cell R&D Workshop*

Le Département de l'Energie (DOE) a fait de la recherche de synergies intra et intersectorielles une priorité dans les phases préliminaires de développement d'une activité. Ceci nécessite la coordination de divers acteurs concurrents ou appartenant à des industries différentes. Nous voyons ici un exemple de préparation concertée d'une telle stratégie pour les PàC au moyen de l'établissement de groupes de travail à l'échelle de l'industrie.

Ce groupe de travail intégré sur les PEMFC, organisé par le Département EERE (*Energy Efficiency and Renewable Energy*) du DOE, a eu lieu en novembre 1997 à Washington. Quarante participants étaient présents, provenant des entreprises-clés dans cette technologie (Ballard, 3M, Plug Power, Ford, Lucent Technologies, DuPont, A.D. Little, etc.), des pouvoirs publics (PNGV, DOE, etc.), des laboratoires fédéraux (Argonne, etc.) et des organisations professionnelles (EPRI, Gas Research Institute, etc.). Les objectifs de ce groupe de travail étaient d'établir un consensus sur :

- i) les performances requises des différents segments de marché
- ii) les capacités présentes et futures des piles PEM à satisfaire ces performances ;
- iii) l'identification des initiatives de R&D et de démonstration multi-applications (*cross cutting*) qui ont trait à plusieurs segments de marché ;
- iv) l'identification des besoins de R&D et de démonstration spécifiques aux différents segments ;
- v) l'identification des rôles et responsabilités des pouvoirs publics dans l'accélération du développement des piles PEM.

Après quelques présentations préliminaires (activités et stratégies du DOE dans le domaine, présentations de consultants concernant les marchés possibles des PEM), les participants sont divisés en trois groupes. Les deux premiers doivent « *établir indépendamment pour chacun des segments de marché identifiés un consensus sur l'importance des différentes performances-cibles* » (DOE, 1997, p. 3). Le résultat final pour chacun des groupes consiste en une matrice 6×14 (6 segments de marché, 14 performances-cibles) dotée d'indices d'importance (forte, modérée, faible). Les experts doivent ensuite, sur cette base, identifier les besoins communs à plusieurs segments de marché (*cross-cutting requirements*) et les points techniques sur lesquels se concentrer pour satisfaire ces besoins. Le troisième groupe se concentre quant à lui sur les rôles et responsabilités possibles du DOE dans le domaine des piles PEM. Les résultats des groupes 1 et 2 sont ensuite confrontés et compilés (« *a merging of the consensus* » [p. 14]). Ceux du groupe 3 sont présentés et soumis à la discussion.

Ces résultats sont ensuite intégrés dans la stratégie du DOE et répercutés sur les acteurs de l'ensemble de l'industrie émergente au travers des modalités d'interventions du DOE sur les PàC, que ce soit pour applications mobiles ou stationnaires. Des programmes spécifiques aux différentes applications doivent donc être conservés. Cependant, malgré ces différences, des recouvrements substantiels existent et doivent être exploités entre les activités sur ces deux applications pour profiter de synergies.

On retrouve également dans cette stratégie un calendrier des générations de systèmes-piles : étant donné les aspects moins contraignants des piles pour applications stationnaires (notamment leur plus grande tolérance aux coûts élevés), la stratégie générale (« *the draft EERE strategy* ») établie par le DOE était de bénéficier d'une première exposition au marché (« *early market exposure* »), de gagner de l'expérience sur ces applications stationnaires, puis sur les applications mobiles à haute valeur ajoutée pour déplacer progressivement les efforts vers les véhicules particuliers.

8.3 De la Vision au Plan d'Action nord-américain

Les Etats-Unis sont un benchmark « naturel » dans le domaine des stratégies nationales de soutien à la PàC. Cette position de référent–au-delà des montants des engagements publics de soutien à cette technologie (1,2 milliards de dollars sur 5 ans à partir de 2004) – tient à l'approche très « programmatique » poursuivie. Comme dans beaucoup d'autres technologies d'énergie jugées prioritaires, en plus de ces activités de R&D au travers des laboratoires fédéraux et de ces bourses et programmes coopératifs avec les industriels, le DOE soutient des initiatives ambitieuses visant à encadrer et coordonner les activités de R&D. Si certaines de ces initiatives sont plus des éléments de mobilisation des acteurs que des véritables éléments de programmation, d'autres aboutissent à des véritables choix stratégiques et des objectifs précis. Le volume des financements accordés par le DOE et les ressources au sein des laboratoires fédéraux viennent crédibiliser ces choix.

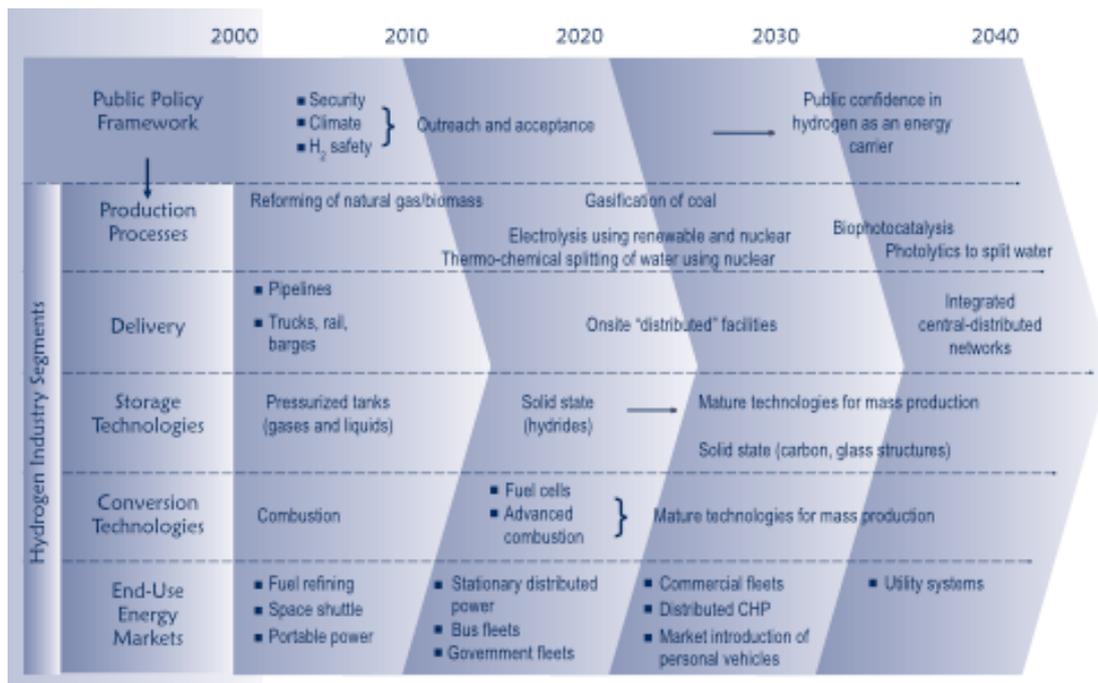
Au-delà de tout débat sur la légitimité d'une politique industrielle, le maître mot est celui de coordination entre les divers acteurs de la PàC.

8.3.1 La Vision du DOE

Suite à la dissolution du PNGV, les EU ont débuté leurs nouvelles initiatives de réflexion stratégique dans le domaine de la PàC en 2001. Cette réflexion était dès le départ de grande envergure puisqu'il ne s'agissait plus « seulement » de développer des véhicules répondant au standard de consommation de 80 mpg (l'objectif final du PNGV), mais plus généralement de s'assurer à long terme le leadership sur l'ensemble de la future économie de l'hydrogène.

L'établissement d'une « Vision nationale » a constitué le premier jalon de cette réflexion, suite à une séance de travail rassemblant les principaux acteurs de la filière américaine en novembre 2001. Cette étape préliminaire a permis d'effectuer une revue de l'état de l'art de l'industrie de l'hydrogène en recensant les différentes options liées à la production, la distribution, le stockage, la conversion et l'application de l'hydrogène. Les principaux facteurs conditionnant les progrès de ces technologies et le développement des marchés correspondants ont également été abordés. (cf. Figure 1).

Tableau 21 : Vision de la transition américaine vers l'économie de l'hydrogène



8.3.2 La roadmap du DOE

L'établissement d'une *roadmap* a logiquement suivi cette « vision » en 2002. Cette initiative met fortement l'accent sur le besoin de coordination de l'ensemble des acteurs intervenant dans le domaine de l'hydrogène. Cette volonté répond aux nombreuses interdépendances dans la chaîne de valeur menant de la production de l'hydrogène jusqu'à sa conversion en énergie pour différentes applications. Selon cette perspective, le conditionnement mutuel des opportunités de développement et de commercialisation des dispositifs de production, distribution, stockage et conversion d'hydrogène se conditionnent mutuellement justifie que les Etats-Unis privilégient un programme intégré d'actions dans l'ensemble des composantes de la chaîne. Une des points clés de cette coordination réside dans la résolution du problème persistant de la poule et de l'œuf concernant les investissements industriels dans cette chaîne : les producteurs ou utilisateurs industriels de piles veulent être assurés de l'existence en temps voulu de la nécessaire fourniture en hydrogène, et les fournisseurs d'hydrogène veulent s'assurer qu'il y aura bien un marché pour leur hydrogène. Les pouvoirs publics sont reconnus comme ayant un rôle majeur dans la transformation de ce « cercle vicieux » en « cercle vertueux ».

Les défis et besoins principaux de la conversion de l'hydrogène, soit par des moteurs à combustion interne utilisant directement l'hydrogène soit dans des piles à combustible, sont identifiés dans la roadmap (cf. Tableau 22 et Tableau 23)

Tableau 22 : Les défis principaux de la conversion d'hydrogène par PàC

Défis scientifiques	Défis d'ingénierie	Défis de marché	Défis institutionnel
Lacunes (knowledge gaps) entre science des matériaux et électrochimie	Incertitude sur les performances et la durabilité des piles Coûts élevés des piles	Manque de modèles économiques profitables pour l'installation généralisée de système de génération décentralisé d'électricité et de cogénération Risques financiers très élevés du fait de l'existence de systèmes alternatifs	Manque de normes de sécurité et de codes pour l'usage de dispositifs utilisant de l'H2 Manque de standards de sécurité pour l'usage de piles dans des bâtiments et à bord de véhicules Manque de politique de soutien au développement de l'usage de piles aux niveaux fédéral et des états

Source : DOE, *National Hydrogen Energy Roadmap*, Novembre 2002

Tableau 23 : Les besoins principaux de la conversion d'hydrogène par PàC

Piles	Démonstration	Codes et standards	Analyses
Elargissent des programmes de recherche fondamentale en matériaux avancés, interfaces, et électrochimie	Accroissement du nombre de sites afin d'inclure un plus grand nombre de technologies, d'applications et de conditions environnementales	Normes de sécurité Code de construction approprié Standards de véhicules	Etudes de marché plus fiable Recensement et large diffusion des résultats des recherches disponibles
Design de piles de moindre coûts	Améliorer la dissémination de l'information	Interconnexions des standards utilisées par les compagnies de production d'électricité	Outils logiciels de simulation de collisions pour améliorer le design des moteurs à PàC
Progrès dans les techniques de production de masse des systèmes de piles			
Composants auxiliaires du système piles à moindre coûts			

Source : DOE, *National Hydrogen Energy Roadmap*, Novembre 2002

Les synergies entre technologies de piles pour différentes applications ne sont pas identifiées dans la *roadmap* du DOE. Seule la fourniture d'hydrogène mentionne l'opportunité de mettre en place les programmes de démonstration de piles stationnaires et mobiles au mêmes endroits afin de créer des « clusters d'hydrogène ».

8.3.3 Le plan d'action du DOE

Sur la base des consensus formés lors des deux exercices précédents, le DOE a élaboré un plan de R&D à long terme permettant de soutenir la transition vers l'économie de l'hydrogène.

Un calendrier en quatre étapes est proposé, fixant quelques grandes étapes de la transition vers l'économie de l'hydrogène :

Tableau 24 : Calendrier d'ensemble du plan d'action du DOE

Phases	Temporalité	Description
R&D et démonstration	jusqu'en 2015	Recherches pour atteindre les performances requises par les clients ; Etablissement des modèles économiques menant à la décision de commercialisation Coordination avec la FreedomCAR and Fuel Initiative jusqu'à cette décision
Introduction sur le marché	2010-2025	Début de commercialisation pour les applications portables et les systèmes stationnaires et mobiles à haute valeur ajoutée (par ex véhicule « tout électronique ») Utilisation de l'infrastructure existante de distribution de gaz naturel et du réseau électrique Début d'investissement dans l'infrastructure d'H2 soutenus par politiques publiques
Expansion du marché et de l'infrastructure	2015-2035	Les technologies liées à l'hydrogène (production, stockage, conversion,...) sont commercialement prêtes Le gouvernement joue le rôle de premier acheteur Le modèle économique concernant l'infrastructure est validé
Réalisation de l'économie de l'hydrogène	à partir de 2025	Les technologies liées à l'hydrogène sont commercialement disponibles dans toutes les régions L'infrastructure couvre le territoire national Les activités liées à la production d'H2 et des dispositifs techniques sont rentables

Les activités et les choix stratégiques à effectuer par le DOE sur ces quatre phases sont explicitées selon les domaines identifiées précédemment :

- production
- stockage
- conversion
- application

8.4 La « Vision » britannique

Le DTI a débuté son soutien aux PàC en 1992, tout d'abord en finançant des études puis des activités de R&D. La structure de soutien public s'est étoffé depuis la fin des années 90 avec la création par exemple du Fuel Cell Network (créé en 1998 au sein de l'Université de Birmingham) afin de fédérer les acteurs de la filière PàC britannique. Il s'agissait principalement d'appels d'offre gérés par le Fuel Cell Advisory Panel.

En 2002, une volonté de changer les volumes des financements publics et les méthodes de soutien affectés à la PàC s'est fait clairement sentir. Une mission d'information aux Etats-Unis et au Canada a été menée par le DTI de même que diverses études sur les forces et faiblesses de l'industrie britannique dans le domaine de la PàC. En 2003, à la suite du Energy White Paper, le DTI, accompagnée par le Carbon Trust a initié la première étape de ce qui devrait devenir une « Vision de la PàC pour la Grande-Bretagne ».

Tableau 25 : Objectifs de la « Vision Britannique préliminaire »

Catégories	Court terme 2003-2007	Moyen terme 2008-2012	Long terme 2013-2023
Marchés	Marchés de niches pour piles stationnaires, UPS, site éloignés, dispositifs portables, applications militaires GAP Cogénération résidentielle	Applications mobiles à haute valeur ajoutée Toutes cogénérations Début du marché du véhicule individuel en fin de période	Une pénétration conséquente de la pile dans le marché du véhicule individuel est achevée à la fin de cette période
Volumes du marché	10MW/an	10-100 MW/an	100+ MW/an
Technologies	PEMFC, SOFC, MCFC, PAFC, AFC	PEMFC, SOFC, MCFC, AFC	
Coûts	2000-3000€/kW	200-400€/kW	50-100€/kW
Profitabilité	Pas profitables sans incitations (à quelques exceptions près dans certains composants). La valeur réside dans la propriété intellectuelle, en particulier celle associée au cœur de pile et aux composants clés	La valeur se déplace vers l'aval, cad vers l'intégration. Les ventes sont supérieures aux coûts variables mais ne compensent toujours pas les investissements en R&D	Commercialisation. La plus grande partie de la valeur est réalisée dans l'intégration et les services associés. La GB se positionne sur les matériaux, l'EME et l'intégration système
Gains environnementaux	Non calculé, aucune valeur monétaire associée	Calculés, non internalisés	Calculés et internalisés
Démonstrations	Soutien public limité pour applications stationnaires/cogén. (5-300kW) and mobiles (bus et véhicules individuels)	Grande démonstration de flottes dans des zones urbaines prioritaires Piles stationnaires de grande capacité (100kW-50MW)	Démonstrations financées par l'industries pour nourrir des développements incrémentaux

Source : DTI, 2003

8.5 La roadmap canadienne

La Canadian Fuel Cell Commercialization Roadmap a été dirigée par PriceWaterHouseCoopers en 2002, et publié en mars 2003 par Fuel Cells Canada³⁷.

Trois phases d'évolution combinée de la technologie et du marché de la PàC, à savoir le pré-développement, la phase de développement et de test, et la commercialisation.

La roadmap canadienne se concentre de cette dernière phase, elle même scindée en 4 sous-phases :

- démonstration (jusqu'à 2010)
- marchés précoces (jusqu'à 2015)
- marchés intermédiaires (2005-2020)

³⁷ Association à but non lucratif ayant pour objectif le soutien au développement de l'industrie de la PàC principalement au travers d'activités de communication et de promotion. Cette association s'occupe également de la coordination des activités ayant trait aux codes et standards.

- marchés matures (à partir de 2010)

Les technologies de piles envisagées sont les piles PEMFC et SOFC, deux technologies pour lesquelles des entreprises canadiennes sont bien positionnées.

Cette roadmap représente à ce stade plus un outil de mobilisation qu'un plan d'action. Le recensement des acteurs et ressources sur le territoire canadien est ainsi bien développé, au détriment des aspects plus opérationnels, permettant de coordonner les activités des différents intervenants. Ainsi, la roadmap ne pose aucune performance cible par applications.

De même, le calendrier d'introduction possible/souhaitable des différentes applications reste peu précis. On remarque notamment que les temporalités des phases de démonstration, de développement des marchés précoces, intermédiaires et, enfin, matures sont les mêmes quelques soient les groupes d'applications. Ces dernières se déploient en parallèle sur ces trois phases. Les synergies entre applications ne sont abordées ni en synchronique, ni en diachronique.

Le détail des actions génériques à entreprendre reste également très général. Quatre défis sont identifiés :

- 1. La stimulation d'une demande précoce
- 2. L'amélioration des performances tout en réduisant les coûts
- 3. Le financement
- 4. La création d'une infrastructure de soutien

Peu de choix sont effectués, la description de chaque challenge selon les quatre phases est une description des résultats attendus (par exemple : « coûts des piles se rapprochant, puis devenant proches et enfin égaux à ceux des technologies en place » dans le challenge 4 respectivement pour les phases de marchés précoce, intermédiaire et mature) et non un énoncé des possibles solutions.

Tableau 26 : Segmentation des technologies et marchés de la PàC

Type de pile	Segments	Gamme de puissance	Applications
Stationnaires	Petites	<25W	Générateurs pour back-up d'urgence, cogénération, ou générateur principal hors réseau pour : Maisons individuelles Petits bâtiments publics et commerciaux Équipements de télécommunication Petits logements récréatifs (cabanon,...)
	Moyennes	25-150W	Bâtiments et équipements comme ci-dessus, de plus grande superficie
	Grandes	>150W	Comme ci-dessus + Hôpitaux Usines de traitement Applications militaires Sites industriels et résidentiels lointains
Portables	Petites	<25W	Générateurs portables pour applications militaires Électronique portable Chargeurs de batteries Jouets Outils Applications médicales
	Moyennes	25-100W	Comme ci-dessus, de plus grandes capacités
	Grandes	>100W	Comme ci-dessus, de plus grandes capacités + Signalisations routières Générateurs portables récréatifs Générateurs portables commerciaux
Mobiles	Petites	<25kW	GAP pour véhicules légers et lourds, pour avions Générateurs de traction pour véhicules à moteur deux temps Véhicules industriels (monte-charges, ...) Véhicules pour aéroports Voiture de golf Véhicules pour personnes handicapées
	Moyennes	25-150kW	Minibus Véhicules légers pour flottes captives Véhicules légers individuels Bateaux de plaisance
	Grandes	>150kW	Bus Véhicules militaires (transports de troupes,...) Sous-marins Bateaux de transport Camions Locomotives

Les auteurs précisent que cette initiative n'est qu'une première étape vers une véritable stratégie nationale et un plan d'action dans le domaine de PàC. La structure institutionnelle permettant de construire cette stratégie et ce plan d'action est proposée en conclusion. Il est ainsi recommandé que les 5 groupes de travail ayant servi à la production de la roadmap (stationnaire, portable, mobile, compétence, infrastructure) soient intégrés dans Fuel Cells Canada.

9 Proposition d'une structure de pilotage de la courbe d'apprentissage

A partir de cet inventaire des fonctions élémentaires que la structure de pilotage doit assurer afin de permettre à la dynamique de la courbe d'apprentissage de s'établir, nous proposons et argumentons les modalités organisationnelles de cette structure. La question qui est ici posée est celle de son contenu et de ses prérogatives.

La spécificité des compétences et groupes d'acteurs attachés à chaque fonction, la complexité des activités mises en œuvre pour les assurer, de même que les financements qu'ils nécessitent ne permettent généralement pas qu'une seule structure de pilotage soit en charge de toutes les fonctions identifiées.

Il existe donc de fait différentes institutions (associations, groupes de pilotage, agences, programmes...) dont le rôle est de coordonner les activités de démonstration, de recherche, les projets et programmes collaboratifs entre recherche et industrie ou encore les plans stratégiques.

Cependant, même quand ces fonctions sont intégrées au sein d'une même organisation, il est nécessaire de mettre en place des modes de coordination afin d'assurer la cohérence d'ensemble de la filière.

Les deux questions principales qui se posent dans la construction de cette structure sont alors les suivantes :

- Quel doit être le degré d'intégration des fonctions au sein de la structure de pilotage ?
- Quels modes de coordination doivent être mis en place pour assurer la cohérence d'ensemble des fonctions « intégrées » comme « non-intégrées » ?

9.1 L'intégration des fonctions au sein de la structure de pilotage

Peu de pays ont mis en place pour soutenir leur filière PàC respective des structures de pilotage étendant leurs responsabilités sur un large éventail de fonctions. Cependant, la coordination forte qu'appelle la courbe d'apprentissage nécessite d'établir des liens privilégiés entre certaines de ces fonctions. Cette section a pour objectif d'identifier ces « affinités entre fonctions » pouvant nécessiter qu'elles soient intégrées au sein d'une même organisation.

Ainsi, les *fonctions de coordination des relations recherche-industrie* et de *démonstration des nouvelles générations de systèmes-piles* doivent être liées de façon à permettre les retours d'expérience des démonstrations des premières générations de systèmes-piles vers les activités de R&D dans l'industrie et dans les laboratoires. La coordination de ces deux fonctions permet également la mise au point d'un arbitrage pertinent entre ces dernières en tenant compte de l'état de l'art des technologies à chaque période : les démonstrations ne doivent pas être organisées trop tôt afin de ne pas « interrompre » prématurément les activités de R&D. De même, dans un contexte de compétition internationale tel que celui qui règne actuellement sur les PàC, il est

important de pouvoir s'engager dès que possible dans l'application pratique des technologies développées pour les tester et bénéficier d'effets d'apprentissage par l'usage³⁸.

Les *fonctions de coordination des relations recherche-industrie* et de *standardisation et modularisation* doivent également être coordonnées car dans les phases préliminaires de mise au point d'une technologie, comme cela a été argumenté précédemment, les activités de standardisation et modularisation doivent être intégrées au sein même des programmes et projets de R&D. Cette coordination est une condition essentielle de la valorisation des synergies permettant des économies d'échelle et d'apprentissage substantielles.

La *fonction instauration de performances-cibles et évaluation des systèmes* peut être assurée au sein d'un programme de R&D (*i.e.* elle est couplée à la fonction coordination des relations recherche-industrie) ou bien à un plan stratégique national (dans ce cas elle est couplée à la fonction *d'orientation stratégique*). Dans le premier cas, elle a un effet direct sur les participants au programme puisqu'elle détermine les objectifs précis à atteindre, et donc le relatif succès ou échec des projets financés dans le programme. Dans le second cas, elle a un effet plus diffus, car non adossé à un programme spécifique, mais plus large car s'adressant à l'ensemble de la filière du pays. L'effet fédérateur de cette fonction performances-cibles peut ainsi être plus ou moins profond ou étendu selon la fonction avec laquelle celle-ci est couplée.

Il en est de même pour la *fonction d'orientation stratégique* qui peut être ou non couplée directement à un programme de recherche. C'est le cas de certains consortiums pré-compétitifs qui établissent leur propre *roadmap*. Le cas le plus fréquent est que la *roadmap* précède l'établissement d'un grand programme de R&D. Elle guide ainsi les activités de ce programme sans pour autant se limiter à celui-ci. Cette « liaison souple » permet également le renouvellement ou l'ajustement régulier de la *roadmap* (par exemple tous les deux ou quatre ans) en fonction des progrès accomplis et de la persistance constatées de certains verrous au sein des programmes de R&D.

Les deux fonctions aux deux extrémités de la chaîne du processus d'innovation, à savoir la *coordination des activités de recherche de base* et de *soutien au démarrage des marchés précoces*, peuvent être assurées par des organisations distinctes de celles assurant toute autre fonction. Cette « non-intégration » se justifie par la spécificité de leurs modes opératoires (fonction publique pour la recherche de base, aspects financiers et fiscaux des mesures d'incitation) et l'indépendance qu'elles doivent conserver pour fonctionner efficacement (recherche « libre », égalité des primes et mesures fiscales).

³⁸ La réunion PREDIT/PACo du 25/03/2004 fournit un exemple intéressant d'un débat autour de cet arbitrage entre mise en place de démonstrateurs transport versus levée des verrous technologiques en France : d'après J.P. Büchel « *pour Renault, il n'y a pas besoin de démonstrateur : il faut travailler sur les technologies (composants). Il faut que les technologies soient les plus représentatives de celles qui s'imposeront à long terme avant de passer au stade démonstrateur. Ce gel des technologies pourrait avoir lieu en 2008* ». Cet avis n'est pas partagé par les fournisseurs pour qui les démonstrateurs représentent un premier marché. Pour P. Bouchard de Hélium par exemple, « *les démonstrateurs sont nécessaires pour montrer une maîtrise de la technologie et l'existence d'une filière française, et assurer les retours d'expérience nécessaires à cette filière* ».

9.2 La mise en cohérence des fonctions au sein de la structure de pilotage

Certaines des fonctions gagnent en efficacité si elles sont intégrées au sein d'une même organisation. D'autres peuvent rester non-intégrées. Pour autant toutes ces fonctions doivent être mises en relation de façon à assurer un développement cohérent de la filière selon la logique de la courbe d'apprentissage décrite précédemment. Il est donc nécessaire de mettre en place des modes de coordination « souples » permettant la mise en cohérence sans intégration au sein d'une même structure. Le Japon et l'Allemagne fournissent des exemples intéressants de telles structures de pilotage à l'échelle de la filière toute entière.

9.2.1 La Fuel Cell Conference of Japan

Après avoir été impliqué indirectement dans le programme américain TARGET (démonstration de 65 piles PAFC de 12,5kW au Japon au début des années 1970), le Ministère de l'Industrie japonais a coordonné ses activités de R&D sur les PàC au sein de vastes consortiums public/privé de développement technologique et de démonstration intégrés (répondant au statut de *Technology Research Association* créé en 1961). Plusieurs consortiums se sont ainsi succédés : le *Sunshine Program* qui a débuté en 1974 (PAFC), puis le *Moonlight Program* à partir de 1981 (SOFC, PAFC, MCFC) et enfin le *New Sunshine Program* en 1993 (PEMFC, SOFC, PAFC, MCFC). Ces consortiums rassemblent des industriels et des laboratoires dans une structure organisationnelle unique autour d'objectifs communs.

Suite aux critiques de plus en plus virulentes envers ces consortiums de recherche³⁹, le METI a, à la fin des années 90, modifié profondément son mode d'intervention dans le domaine. La FCCJ (Fuel Cell Conference of Japan), la nouvelle structure de pilotage mise en place, est à la fois plus intégrée – elle couvre l'ensemble des fonctions identifiées – et plus souple – elle n'est qu'un organe consultatif.

La mission de la FCCJ est d'étudier collectivement, au sein de groupes de travail spécialisés, l'ensemble des questions affectant la commercialisation et le déploiement des PàC et d'incorporer les résultats de cette réflexion dans des propositions de modes de soutien. Ainsi, à la différence des consortiums de recherche, la FCCJ se limite à effectuer des recommandations et études et n'effectue aucune activité de recherche ou de démonstration.

Dotée d'un simple statut d'association, la FCCJ produit des recommandations au METI, formulées au sein de divers groupes de travail se réunissant régulièrement (près d'une fois par mois, selon les groupes et leurs actualités). Cette souplesse⁴⁰ a

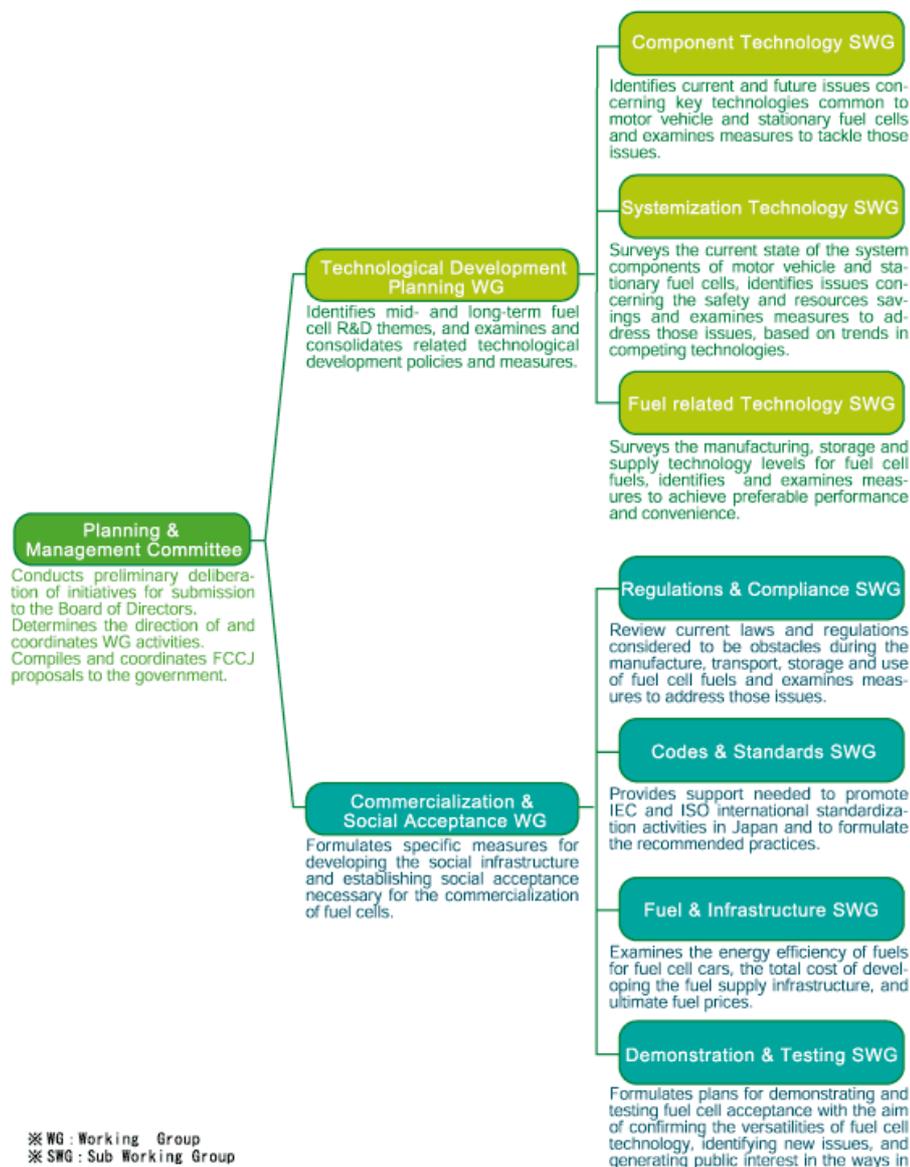
³⁹ Les critiques principales étaient les suivantes :

- Trop lourd administrativement
- Niveau de coopération très faible ; beaucoup de ressources et de temps utilisés à se protéger de toute fuite de propriété intellectuelle.
- Absence quasi-systématique des industriels leaders dans les domaines soutenus (par exemple les constructeurs automobiles dans les projets PEMFC) du fait de problèmes de sélection adverse.
- Peu de relations au sein de ces consortiums entre les industriels participants et le METI. Ce dernier étant en charge des décisions stratégiques affectant le consortium, persistance d'un décalage entre stratégie et mise en œuvre.

⁴⁰ Le terme de « *soft coordination* » est utilisé par les décideurs du METI eux-mêmes pour différencier ce nouveau type de structures des consortiums, qualifiés quant à eux de « *old-tired policy tools* » (Larrue, 2005).

permis au METI d'impliquer dans le processus décisionnel de pilotage stratégique de la filière des acteurs qui avait fui les initiatives du METI, notamment les constructeurs automobiles. De même les petites entreprises qui n'étaient que rarement incluses dans le cercle fermé des initiatives du METI sont membres de la FCCJ. Début mai 2005, la FCCJ comptait 136 entreprises⁴¹.

Figure 11 : Structure des groupes de travail de la FCCJ



Source: <http://fccj.jp/>

Une organisation telle que la FCCJ, sous des apparences de structure très informelle et essentiellement consultative, sans d'autre budget que son budget de fonctionnement (3 permanents) détient en fait un pouvoir important dans la filière. Du fait qu'elle implique la très grande majorité des acteurs industriels, elle est la voix de la filière japonaise de PàC. Elle ne peut donc être ignorée des instances publiques. Elle l'est d'autant moins que les décideurs du METI assistent en observateurs à l'ensemble des

⁴¹ Les membres sont différenciés en board member, general member, associate member, et advisory member. Seuls les board members (22 entreprises) siègent au comité de direction.

réunions des groupes de travail. Cette présence permet une grande proximité des industriels et des pouvoirs publics dans le pilotage de la filière.

Ainsi par exemple, la FCCJ organise au sein du groupe de travail « component technology sub-working group » des enquêtes anonymes auprès des industriels afin d'identifier précisément les verrous technologiques et besoins en recherche de base pour lever ces verrous. De ces enquêtes sont issues des propositions de projets de recherche qui sont indiquées au METI dans le cadre de son financement de projets de R&D. Si le METI n'est absolument pas formellement obligé de tenir compte de ces propositions, il n'en demeure pas moins que, dans les faits, ces recommandations sont un élément important utilisé par le Ministère pour définir son programme dans le domaine.

9.2.2 Le groupe de pilotage HYBERT au niveau fédéral allemand

Créée en février 2005, le cercle stratégique HYBERT (Hydrogen und Brennstoffzellen Expertenrat : conseil d'experts en hydrogène et PàC) est né de la fusion de BERTA (Brennstoffzellen Entwicklung und Erprobung für stationäre, mobile und portable Anwendungen : développement et essai des PàC pour les applications stationnaires, mobiles et portables) et du Cercle Stratégique des Technologies de l'Hydrogène (Strategiekreis Wasserstofftechnologien).

HYBERT est une commission d'experts industriels et académiques (10 en 2005) issus de différents secteurs (production d'hydrogène, stockage et distribution de l'hydrogène, applications stationnaires, mobiles ou portables des PàC). HYBERT est dirigé par un chef de groupe et deux assistants, issus du domaine de l'hydrogène et des PàC et renouvelés tous les deux ans. Aux experts industriels et académiques s'ajoutent des membres permanents (8 en 2005) détachés des Ministères pertinents, de l'Union des PàC (Brennstoffzellen-Bündnis) et du Centre National de Coordination Jülich pour l'Hydrogène et les PàC (Nationale Koordinierungsstelle Jülich für Wasserstoff und Brennstoffzellen: NKJ).

Ce groupe d'experts est chargé de remplir les missions suivantes dans le domaine de l'hydrogène et des piles à combustibles :

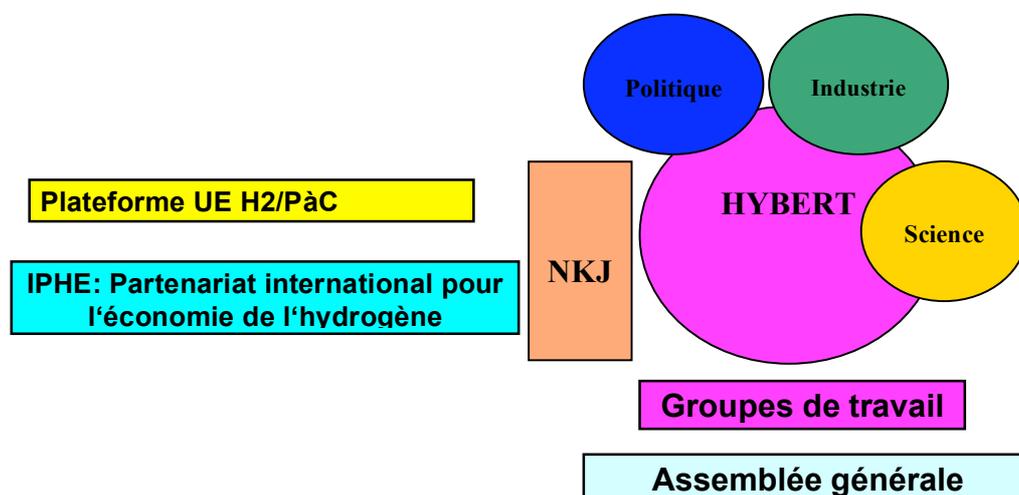
- Conseil auprès des cinq ministères liés à la PàC et à l'hydrogène et échange d'informations avec ceux-ci
- Orientation de la communauté hydrogène/PàC
- Orientation de l'opinion publique

HYBERT est également sensé élaborer une *roadmap* pour les secteurs de la PàC et de l'hydrogène prochainement.

Créée en 2004 auprès de l'Organisation de Management de Projet Jülich (Projektträger Jülich), NKJ est chargée des missions d'information et de coordination et participe ainsi au développement d'une stratégie nationale dans les domaines de l'hydrogène et de la PàC. Financée par le Ministère fédéral de l'Economie et du Travail et le Ministère de Rhénanie du Nord-Westphalie de la Circulation, de l'Energie et de la Planification Régionale, NRJ doit représenter les intérêts de l'Etat fédéral et des Länders tout comme ceux de l'industrie et de la science pour une mise sur le marché accélérée des technologies de l'hydrogène et de la PàC. Dans ses

missions sont compris la mise en place d'un réseau performant, la coordination des activités nationales, le renforcement de la position allemande dans les initiatives européennes et internationales ainsi que l'identification et l'initiation de coopérations. De plus, NKJ devra bientôt remplir la fonction de secrétariat d'HYBERT.

Figure 12 : Représentation de la structure de pilotage fédérale allemande



Source : Présentation de <http://www.nkj-ptj.de/index.php?index=7>

9.2.3 Les initiatives Piles à combustible du Bade-Wurtemberg et de Rhénanie du Nord-Westphalie

Le club des réseaux allemands “kompetenznetze.de”, issu d'une initiative du Ministère fédéral de l'Education et de la Recherche, suscite des projets de réseaux de compétences, les labellise après évaluation et leur offre un portail de communication et d'information⁴². On compte ainsi aujourd'hui 123 réseaux de compétences dans 33 régions et 18 domaines d'innovation. Les demandes d'admission et les réseaux déjà admis sont évalués régulièrement par un Conseil consultatif.

L'initiative Piles à combustible du Bade-Wurtemberg et le réseau de compétences Piles à combustibles de Rhénanie du Nord-Westphalie sont deux exemples intéressants faisant partie de cette initiative.

L'initiative Piles à combustible du Bade-Wurtemberg (“Brennstoffzellen Initiative Baden-Württemberg, BZI”)⁴³, qui vise à rassembler l'expertise en PàC disponible en Bade-Wurtemberg, a été lancée en 2001. En plus d'un nombre important d'instituts de recherche et d'instituts universitaires de renommée au niveau national et international, les partenaires de l'alliance incluent également des compagnies industrielles renommées sur le marché global.

Elle regroupe :

- l'alliance pour la recherche sur les piles à combustible du Bade-Wurtemberg, FABZ, qui a été créée en 2000 par le Ministère des Sciences et qui coordonne

⁴² <http://www.kompetenznetze.de>

⁴³ <http://www.brennstoffzellen-initiative.de>

les activités de recherche de 15 instituts de recherche (DLR, Fraunhofer ISE, centre ZSW, universités...) dans le domaine des piles à combustible. Celle-ci a obtenu jusqu'à aujourd'hui 1,6 M€ des Ministères des Sciences et de l'Economie

- le centre de compétence et d'innovation piles à combustibles de la région de Stuttgart, KIBZ, qui aide et conseille 40 entreprises et conglomérats de la branche
- le centre de formation continue sur les piles à combustible d'Ulm, WBZU, financé, sur 5 ans à partir de 2002, pour 3,3 M€ par le Land et pour 1,5 M€ par l'Etat fédéral

Les projets institutionnels de recherche menés dans le cadre de l'initiative Piles à combustible sont financés tant par des fonds publics que par des commandes directes provenant du secteur industriel et mettent l'accent sur : le développement de matériaux destinés aux piles à combustible, les méthodes de diagnostic, la modélisation des systèmes de piles à combustible, les systèmes de piles à combustible de petite taille et systèmes miniatures, le stockage de l'hydrogène.

Les objectifs de cette initiative sont les suivants :

- Mettre en réseau les utilisateurs, les instituts de R&D orientés application et la recherche fondamentale
- Concentrer et coordonner les activités institutionnelles de R&D
- Mettre au point de nouvelles solutions en matière de technologies de piles à combustible
- Faire passer les résultats de la recherche fondamentale dans les applications industrielles et assurer le transfert technologique des développements préconcurrentiels vers l'industrie
- Faire connaître la technologie des piles à combustible aux entreprises

Les services proposés par cette initiative sont :

- Le lancement et la réalisation de projets communs
- La définition collective de thèmes de recherche à long terme
- L'élaboration de stratégies visant à la mise en application des résultats de la recherche
- Une assistance dans l'implantation de nouvelles entreprises
- Une plateforme d'information pour les membres du réseau
- Un travail commun de relations publiques exercé sous forme de stands collectifs sur des foires, d'organisation de symposiums ou de la mise en place d'un atlas de compétences de la région.

Parallèlement à cette tentative de coordination du Bade-Wurtemberg, on peut également citer l'exemple du Land de Rhénanie du Nord-Westphalie, qui a lancé en 2000 un réseau de compétence Piles à combustibles⁴⁴ dans le cadre de l'Initiative Régionale pour les Energies d'avenir⁴⁵, pour promouvoir et coordonner les diverses activités de ce secteur. Celui-ci offre des prestations relevant de l'information et de la communication, desancements de projets, des implantations d'entreprises, des

⁴⁴ Kompetenz-Netzwerk Brennstoffzelle NRW

⁴⁵ Landesinitiative Zukunftsenergien NRW lancée en 1996

relations publiques, de l'internationalisation. Il compte aujourd'hui plus de 200 entreprises et instituts de Rhénanie du Nord-Westphalie⁴⁶.

Les objectifs de ce réseau sont de positionner le Land comme un lieu reconnu au niveau international pour la technologie des PàC et de l'hydrogène, d'introduire les PàC sur les marchés émergents comme ponts pour le marché de masse, de soutenir le développement de la PàC et des composants de systèmes adaptés accompagnés par une recherche de base ciblée, et enfin, de soutenir la mise en place d'une économie énergétique basée sur l'hydrogène et soutenable sur le marché.

Depuis 2000, le Land a accordé 77 M€ pour 42 projets concernant les PàC et l'hydrogène.

9.3 Proposition de structure de pilotage de la courbe d'apprentissage

Sur les bases de la réflexion sur l'intégration des fonctions identifiées et leur mise en cohérence à l'échelle de la filière toute entière, nous proposons une structure composée de deux éléments principaux : un programme intégré de R&D et démonstration, ainsi qu'un groupe de pilotage de l'ensemble de la filière.

9.3.1 Le programme intégré de R&D et démonstration

Nous recommandons d'intégrer au sein d'un même programme opérationnel qui en aura la charge les trois fonctions suivantes :

- *coordination des relations recherche-industrie*
- *démonstration des nouvelles générations de système-piles*
- *normalisation et modularisation des systèmes-piles.*

Ce programme PàC aura pour objectif le développement et le déploiement des technologies de PàC pour diverses applications selon le modèle de courbe d'apprentissage proposée précédemment, avec pour objectif final l'application de ces technologies dans les transports.

La section 9.1 a mis à jours les relations étroites qui doivent être assurées entre les fonctions Il s'agit là du « cœur » de la filière. De la coordination de ces fonctions dépend la valorisation des synergies et donc le succès des efforts mis en œuvre.

Bien que les expériences étrangères montrent que cette fonction n'est pas nécessairement rattachée aux programmes opérationnels, **nous recommandons que ce programme intégré de R&D prenne également en charge la fonction *instauration de performances-cibles et évaluation des systèmes***. Les performances-cibles seront un signal fort, servant de guide aux activités de R&D et d'élément fédérateur aux partenaires. De même, l'évaluation des systèmes aux étapes clés de développement devra être coordonné au sein du programme pour une valorisation maximale des informations collectées⁴⁷.

⁴⁶ Liste sur <http://www.brennstoffzelle-nrw.de>

⁴⁷ L'évaluation sera coordonnée (calendrier, procédures et normes, etc.) au niveau du programme mais sous-traitée à une même organisation telle que la Plate-Forme d'essais Pile à Combustible de Belfort.

De nombreux exemples existent à l'étranger (notamment aux Etats-Unis et au Japon, adeptes des consortiums de R&D) ainsi que dans d'autres industries afin de mettre en place un tel programme en en diminuant les faiblesses structurelles (lourdeurs, tendance à la focalisation sur la recherche au détriment d'une attention portée à la future commercialisation des dispositifs développés).

Le récent regain d'intérêt autour des « programmes mobilisateurs pour l'innovation industrielles » proposés par le Rapport Beffa, fournit un cadre propice à la mise en place d'une telle structure⁴⁸. Elle nécessite cependant des aménagements voire la création d'un statut spécifique afin de pouvoir doter ce programme d'un budget propre. **Nous recommandons que le programme intégré de R&D possède ses propres structures décisionnelles, une équipe de personnel réduite mais permanente, ainsi qu'une dotation budgétaire propre, dans la mesure du possible sur une base pluriannuelle.** Cette autonomie opérationnelle, décisionnelle et financière permettra une programmation stratégique stable à moyen terme, *i.e.* non assujettie aux changements de priorités affectant l'ensemble des autorités publiques partenaires.

Se basant sur l'expérience du réseau PACo, nous recommandons que la coordination des activités du programme se fasse sur la base d'appels à propositions à la fois compétitifs et négociés. Les termes de référence doivent spécifier des objectifs précis quant aux configurations de performances recherchées. Cependant, les propositions soumises seront négociées afin de faire cadrer les projets individuels avec la stratégie collective de déroulement de la courbe d'apprentissage.

Encadré 1 : Comparaison entre le programme « systèmes-piles Pan-H » et le programme intégré de R&D et démonstration

Le programme intégré de R&D et démonstration propos dans cette étude présente une configuration proche de celle proposée par le groupe de réflexion Pan-H. Ce groupe, coordonné par le Ministère délégué à la Recherche, a réuni depuis avril 2004 les principaux acteurs français de l'industrie et des organismes de recherche publique dans le domaine de l'hydrogène énergétique et des piles à combustible. Les recommandations de ce groupe ont été synthétisées en octobre 2004 dans un document intégré au rapport Chambolle sur les nouvelles technologies de l'énergie (NTE)⁴⁹.

Notamment, le groupe Pan-H propose la création d'un programme « systèmes piles », composé de trois pôles :

- un pôle « Recherche » sélectionnant et coordonnant des projets de recherche sur les composants des système-piles (correspondant à la fonction *coordination des activités de recherche de base*)
- un pôle « Technologies et innovations », sélectionnant et coordonnant des projets de développement des composants et des systèmes (correspondant à la fonction *coordination des relations recherche-industrie*);

⁴⁸ Beffa J.L., 2005, *Pour une nouvelle politique industrielle*. Voir aussi les Programmes Technologies-Innovations-Marchés (PTIM) proposés comme modalités organisationnelles d'un des scénarios de l'opération de prospective FutuRIS (Lesourne J., Bravo A., Randet D., 2004, Avenirs de la recherche et de l'innovation en France, Les Etudes de la Documentation française n° 5200, FutuRIS).

⁴⁹ Pan-H, Oct. 2004, Document intégré au Rapport NTE, Chapitre 1, *Plan d'Action National sur l'Hydrogène et les PàC : PAN-H*.

- un pôle « Expérimentation et déploiement » sélectionnant et coordonnant des projets de démonstration des système-piles (correspondant à la fonction *démonstration des nouvelles générations de système-piles*).

A ces trois pôles s'ajoutent trois tâches transversales :

- une tâche "Essais et évaluation", qui concentrera les moyens de tests des "systèmes pile" au sein de la Plateforme de Belfort (correspondant à la fonction *instauration de performances-cibles et évaluation des systèmes-piles*).
- une tâche "Analyse économique"
- une tâche "Relations extérieures".

Le budget total d'une telle structure est évalué à environ 600 M€ sur la période 2005-2010 (dont 250 M€ de financement public, soit environ 40 M€/an) à savoir 300 M€ pour les pôles « Recherche » et « Technologies et innovations » et 300 M€ pour le pôle « Expérimentation et déploiement »

9.3.2 Le groupe de pilotage de la filière

Nous recommandons la mise en place d'un groupe de pilotage de la filière extérieur au programme de R&D, permettant la cohérence d'ensemble des fonctions, à savoir celles qui sont intégrées au sein du programme intégré de R&D et démonstration ainsi que les autres fonctions « non intégrées » :

- *coordination des activités de recherche de base*
- *soutien au développement des marchés précoces*
- *orientation stratégique de la filière*

En effet, si les activités de R&D et démonstration forment le cœur de la filière, elles nécessitent d'être coordonnées avec les activités en amont (recherche de base) et en aval (structures d'incitation au décollage du marché) de la filière. Il a été notamment montré que les mécanismes de soutien au décollage du marché des PàC sont fort peu développés en Europe comparativement à ce qui est mis en place aux Etats-Unis. Le groupe de pilotage pourrait être favorable à la mise en place de mécanismes de soutien tels que des systèmes de commandes publiques pour les produits développés dans le programme intégré (par exemple pour équiper des flottes de véhicules ou des bâtiments publics).

Ce groupe de pilotage est composé des principaux décideurs privés impliqués dans la PàC ainsi que les représentants des différentes instances publiques concernées (Ministères en charge de la Recherche/ANR, de l'Industrie/A2I, des Transports et de l'Environnement, ADEME). Afin de susciter une véritable implication dans le programme, les industriels souhaitant faire partie des structures dirigeantes devront faire une demande d'adhésion. Cette adhésion pourrait être payante. Différents niveaux d'adhésion sont envisageables afin que cette instance soit non seulement à la fois un organe produisant des recommandations pertinentes et précises (au niveau le plus élevé et restreint) mais également un forum le plus large possible diffusant les informations et permettant les interactions (y compris avec des acteurs observateurs, non encore impliqués dans la filière). Ainsi, cette structure ne devra pas se limiter à seulement produire quelques rapports par an. Une activité continue de réflexion stratégique et d'animation devra être assurée.

A l'instar de l'organisation de la filière PàC Japonaise, les lieux institutionnels de décision stratégique et de mise en œuvre des activités sont séparés dans la structure proposée afin de pouvoir impliquer un plus grand nombre d'acteurs, notamment industriels, dans le pilotage de la filière et d'étendre le domaine couvert par le pilotage stratégique au-delà de la seule R&D.

Ce groupe assure ainsi lui-même les fonctions d'orientation stratégique, c'est-à-dire notamment qu'il produit et assure le renouvellement de la *roadmap*, commande des études et produit des recommandations tenant aussi bien à la recherche de base qu'au décollage du marché.

Enfin, ce groupe a l'important rôle de faire le lien avec « l'extérieur » de la filière systèmes-piles française, à savoir les autres activités par exemple celles liées au transport et la distribution d'hydrogène, mais aussi les programmes européens coordonnés par la Plateforme Européenne HFP ou encore les activités de l'IPHE⁵⁰.

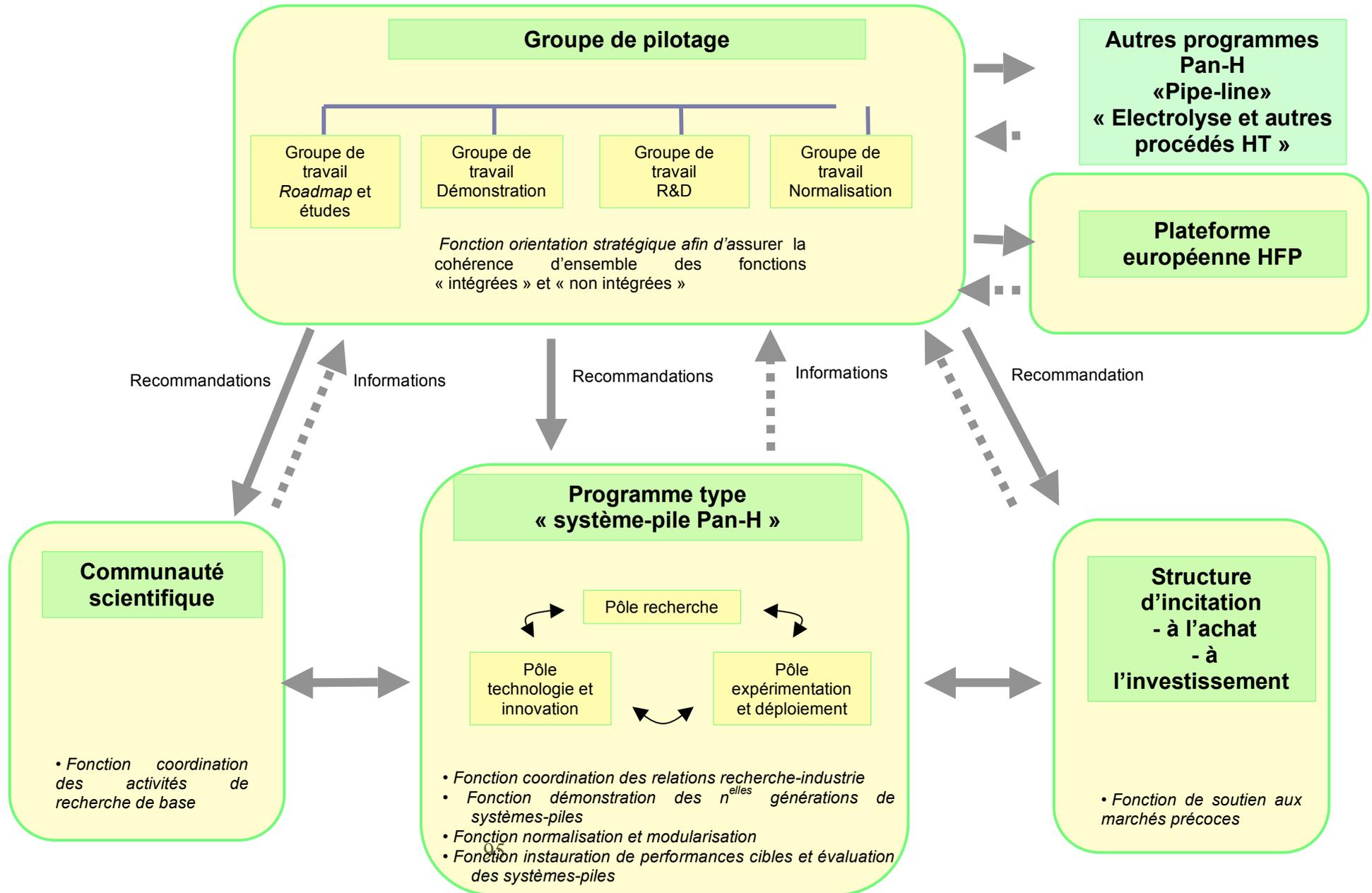
Des incertitudes demeurent sur la légitimité d'une organisation n'ayant qu'un rôle de recommandations en France. Si un tel modèle semble fonctionner au Japon, la question du lien entre cette structure de recommandation et les programmes de mise en œuvre, détenteurs de budgets, devra être posée dans le cas français⁵¹. Un lien direct avec le programme intégré de R&D et démonstration devrait être instauré pour « crédibiliser » cette structure de recommandation. Des orientations concernant le contenu des appels à proposition du programme intégré pourraient être élaborées au sein de cette structure⁵².

⁵⁰ Le lien avec les activités européennes concernant la PàC n'est bien sûr pas effectué seulement au niveau du groupe de pilotage mais également au niveau du programme de R&D dont certaines activités pourront s'appuyer sur des projets des Programme-Cadres ou encore être issues d'appels à propositions communs à plusieurs Etats Membres (par exemple franco-allemand comme c'est le cas dans le cadre de Pan-H).

⁵¹ Rappelons que l'Allemagne a également mis en place une telle organisation (HYBERT Advisory Council).

⁵² Au sein de la FCCJ, un questionnaire sur les besoins en R&D est envoyé aux partenaires industriels de la FCCJ. Les résultats sont envoyés aux ministères compétents.

Figure 7 : Schéma de la structure de pilotage proposée



CONCLUSION

Le succès de la PàC ne dépendra pas seulement des niveaux de financement consentis par les acteurs publics et privés mais également des modalités d'organisation de l'ensemble des activités ayant trait à sa recherche, son développement et sa commercialisation. Dans cette perspective, les autorités publiques ont un rôle essentiel pour initier et conduire – en partenariat avec des représentants des industries concernées – les démarches collectives de coordination à l'échelle de la filière. L'efficacité de ces démarches collectives repose sur la valorisation de synergies entre les activités des multiples éléments impliqués dans la filière. Ces synergies – notamment les économies d'échelle, de gamme et d'apprentissage– sont autant de liens à organiser entre ces acteurs.

Le développement coordonné de la filière permettant la valorisation des synergies nécessite une structure de pilotage spécifique de la filière reposant sur deux éléments principaux :

- Un programme intégré coordonnant les activités de R&D et démonstration pour différentes applications
- Un groupe de pilotage de la filière fournissant des analyses et recommandations et servant de plateforme d'interactions à la fois entre partenaires publics et privés mais également entre partenaires privés de diverses industries

Ainsi que cela a été souligné, cette structure de pilotage présente des similarités avec les propositions formulées par le groupe de réflexion Pan-H dans son « Plan d'action national sur l'hydrogène et les piles à combustible » présenté en octobre 2004. Les deux initiatives partagent notamment la recommandation de la création d'un programme intégré de R&D et démonstration des systèmes-piles. Notre étude vient ainsi sur ce point clé renforcer les recommandations du groupe Pan-H en la précisant et lui offrant des bases analytiques solides.

La principale différence avec le Plan d'Action Pan-H a trait à la séparation proposée dans cette étude entre la structure de décision stratégique (le groupe de pilotage) et la structure opérationnelle (notamment le programme intégré). La responsabilité du pilotage stratégique de la filière reste indéterminée dans le plan d'action Pan-H, alors qu'elle nécessite d'être transparente et bien identifiée afin d'être légitime. Le groupe de pilotage proposé dans cette étude permet ainsi de formaliser le pilotage stratégique de la filière et également d'impliquer concrètement les acteurs privés (producteurs et utilisateurs) au sein de ce pilotage. Ce « leadership de la courbe d'apprentissage » est essentiel car le domaine de la PàC comprend un vaste ensemble d'options alternatives (technologies, composants, designs, applications, etc.) qu'un pays comme la France ne pourra poursuivre simultanément. L'idée même d'un « système-pile français » est ainsi sans aucun doute inaccessible et n'a plus de sens dans le contexte actuel de mondialisation des systèmes industriels. Pour autant, les enjeux économiques et énergétiques que représentent le développement et la production des systèmes-piles nécessitent un pilotage stratégique de la filière.

Les recommandations proposées dans ce rapport interviennent à une étape clé du développement de la filière française de la PàC : les recommandations de Pan-H

commencent à donner lieu à des initiatives effectives, tout en étant encore assez flexibles pour être réajustées. Notre étude offre ainsi une occasion d'interroger les actions mises en œuvre depuis la diffusion des propositions du groupe de réflexion.

Ainsi, le premier appel à projet de recherche et d'innovation Pan-H, clos le 10 juin 2005, est financé par un budget ouvert par l'Agence nationale de la recherche (ANR). Cet appel ne concerne que les projets de R&D relativement amont bien que conduit sur la base de cahiers des charges industriels (*i.e.* recherche exploratoire, recherche et développement technologique (RDT) et prototypage et expérimentation. Les étapes plus en aval, notamment la démonstration et les premières étapes d'industrialisation devraient quant à elles être prises en charge par l'Agence pour l'Innovation Industrielle (A2I).

S'il est bien précisé dans le texte accompagnant l'appel à projet qu'il est « *essentiel de toujours conserver une cohérence d'ensemble du plan d'action, indépendamment de la (des) structure(s) de co-financement public retenue(s), qu'il s'agisse de l'ANR ou d'une autre structure (ADEME, A2I ...)* »⁵³, la configuration qui se dessine apparaît éloignée des propositions de création d'un programme intégré, doté de structures, de personnels et d'un financement propre. Bien qu'il soit reconnu par la grande majorité des acteurs interrogés que l'approche telle que celle mise en place en 1999 avec le réseau PACo (centralisation du processus de sélection/labellisation et décentralisation de la conduite des projets) ait été essentielle pour faire émerger une filière PàC sur la base du potentiel scientifique et technologique dans divers domaines et industries existantes, il existe également un consensus sur le fait que l'étape suivante – le développement de la filière – nécessite une forme d'organisation plus intégrée. Cette intégration est la condition première de la valorisation des synergies analysées dans cette étude.

⁵³ Pan-H, 2005, *1er Appel à Projets de Recherche et d'Innovation*, Cellule d'animation de PAN-H - 25/02.

ANNEXES

Annexe A

Glossaire

AFC	Alkaline fuel cells
AFC	Solid Acids Fuel Cell
AII	Agence pour l'Innovation Industrielle
AME	Assemblage Membrane Electrodes
ANR	Agence Nationale de la Recherche
APU	Auxiliary Power Unit (voir aussi GAP)
BoP	Balance of Plant
CARB	California Air Resources Board
CaSFCC	California Stationary Fuel Cell Collaborative
CCEF	Connecticut Clean Energy Fund
CFCP	California Fuel Cell Partnership
CNRC	Conseil national de recherches Canada
CTPC	Centre de technologie des piles à combustible
DEFC	Direct Ethanol Fuel Cell
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
DOE	Department of Energy
DRAST	Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques
EERE	Office of Energy Efficiency and Renewable Energy
EPRI	Electric Power Research Institute
GAP	Générateur Auxilliaire de Puissance
HFP	European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform
IFCI	Institute for Fuel Cell Innovation
ITSOFC	Piles à combustible tout solide
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
NRC	National Research Council
PàC	Pile à Combustible
PACEM	Pile A Combustible Electrolyte Membrane
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
PCFC	Protonic Ceramic Fuel Cell
PEMFC HT	Proton Exchange Membrane Fuel Cell Haute Température
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
PMII	Programmes Mobilisateurs pour l'Innovation Industrielle
PNGV	Partnership for a New Generation of Vehicles
PTIM	Programmes Technologies-Innovations-Marchés
SAFC	Solid Acids Fuel Cell
SECA	Solid State Energy Conversion Alliance
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
SRA	Strategic Research Agenda
UPS	Uninterruptible Power Supply
IPHE	International Partnership for the Hydrogen Economy

Annexe B Bibliographie sommaire

- AIE, 2004, *Comparative Review of National Programs on Hydrogen and Fuel Cells R&D (2nd Draft)*, International Energy Agency Committee on Energy Research and Development, Hydrogen Co-ordination Group, Note by the Secretariat
- AIE, 2004, *Policy Analysis*, International Energy Agency Committee on Energy Research and Development, Hydrogen Co-ordination Group, Note by the Secretariat
- Amorelli *et al.*, 2005, *Assessing the International Position of EU's Research and Technological Development and Demonstration (RTD&D) on Hydrogen and Fuel Cells*, Rapport EUR No: 21685 EN, IPTS.
- Beffa J.L., 2005, Pour une nouvelle politique industrielle.
- CARB, 2004, Draft Fuel Cells Economic Analysis Report, Contract # 02-329, Avril
- DOE, 2000, *Technology Roadmap for the 21st Century Truck Program*.
- DOE, 2002, *A National Vision of America's Transition to a Hydrogen Economy - To 2030 and Beyond*,
- DOE, 2003, *Multi-Year Research, Development and Demonstration Planned activities for 2003-2010* (version 3/6/03), Juin.
- DOE, 2004, Annual Progress Report.
- DOE, 2004, *Hydrogen Posture Plan*, Février.
- DOE, *National Hydrogen Energy Roadmap*, Novembre 2002,
- DTI, 2003, *A Fuel Cell Vision for the UK – the first steps*, Mai.
- European Commission, 2003, *Hydrogen energy and fuel cells - a vision for our future*, Final Report of the High Level Group, Directorate-General for Research.
- European Commission, 2004, *European Hydrogen and Fuel Cell projects*, Sixth Framework Programme.
- European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform, 2004, Deployment Strategy
- European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform, 2004, *Strategic Research Agenda*, Draft document, version du 2 août 2004, <http://www.hfpeurope.org>.
- FreedomCAR and Fuel Partnership, 2004, *Partnership Plan*, Novembre.
- Fuel Cells Canada, 2003, *Canadian Fuel Cell Commercialization Roadmap*, Mars.
- Lesourne J., Bravo A., Randet D., 2004, Avenirs de la recherche et de l'innovation en France ,Les Etudes de la Documentation française n° 5200, FutuRIS
- Pan-H, 2005, 1er Appel à Projets de Recherche et d'Innovation, Cellule d'animation de PAN-H - 25/02.
- Pan-H, Oct. 2004, Document intégré au Rapport NTE, Chapitre 1, *Plan d'Action National sur l'Hydrogène et les PàC : PAN-H*.
- SECA, 2002, *Program Plan - Making Fuel Cells Available to America*, Janvier.
- Strakey J.P., 2001, *Report on the Solid State Energy Conversion Alliance*, Solid State Energy Conversion Alliance (SECA) Workshop, 29-30 Mars.

Annexe C Composition du comité de pilotage

Nom	Prénom	Organization
Choquert	Martine	MINEFI
Clause	Emmanuel	MINEFI
Clément	Daniel	ADEME
Duhem	Bernard	PREDIT
Dupuis	Pascal	MINEFI
Frois	Bernard	Ministère Délégué à la Recherche
Le Picard	Marie-Christine	MINEFI
Morcheoine	Alain	ADEME
Muffat	Michel	DRAST
Peny	André	DRAST
Perdrizet	François	DRAST

Annexe D Liste des personnes interviewées

Non	Organisation	Email
Agator Jean-Marc	CEA	jean-marc.agator@cea.fr
Bardi Nicolas	CEA	nicolas.bardi@cea.fr
Bertrand Gregory	GDF	gregory.bertrand@gazdefrance.com
Bouchard Patrick	Hélion	Patrick.bouchard@helion-fuelcells.com
Büchel Jean-Pierre	Renault	jean-pierre.buchel@renault.com
Cadet Daniel L.	Alstom-Transport	daniel-l.cadet@transport.alstom.com
Clément Daniel	ADEME	daniel.clement@ademe.fr
Frois Bernard	Ministère délégué à la Recherche	bernard.frois@technologie.gouv.fr
Hamilton Mike	National Research Council Canada	Mike.Hamilton@nrc-cnrc.gc.ca
Lamy Claude	CNRS	claudelamy@univ-poitiers.fr
Le Picard Marie-Christine	MINEFI	marie-christine.le-picard@industrie.gouv.fr
Costes Bruno	PSA	
Lisse Jean-Pierre	PSA	jeanpierre.lisse@mpsa.com
Lucchese Paul	CEA	paul.lucchese@cea.fr
Meilhac Chantal	Ministère délégué à la Recherche	chantal.meilhac@technologie.gouv.fr
Moreau Claude D.	3M France	cdmoreau@mmm.com
Mosdale Renaut	PAXITECH	renaut.mosdale@paxitech.com
Plantive Eric	EDF	eric.plantive@edf.fr
Sanglan Patrick	Axane	patrick.sanglan@airliquide.com
Schulz Philippe	Renault	philippe.schulz@renault.com

Annexe E Guide d'entretien indicatif

Selon son domaine de compétence, le répondant peut répondre plus spécifiquement pour un ou plusieurs groupes d'applications.

- La nomenclature de groupes d'applications vous semble-t-elle opérationnelle ?
- Quelles sont les technologies de pile susceptibles de satisfaire les différents groupes d'applications à moyen et long terme ?
- Quelles sont les principales contraintes par groupes d'applications ? Quels principaux verrous scientifiques et/ou technologiques faudra-t-il lever pour atteindre ces applications ?
- La liste des types de synergies fournies vous semble-t-elle pertinente et complète ? Lesquelles vous semblent les plus importantes et « valorisables » ?
- Quelles sont les types de synergie entre groupes d'applications pour lesquels on a d'ores et déjà des éléments d'information ? Quelles sont les sources d'information, comment apprend-on sur les synergies entre applications ?
- Quelle est l'intensité et la nature des synergies *attendues* entre les différents groupes d'applications (réponse sur la base des tableaux fournis ?
- Existe-t-il des performances-cibles « françaises » connues et acceptées (transport ?stationnaire ?) ? Si oui sont-elles différentes des *targets* du programme américain ? des *targets* du SRA ?
- Pourrait-on définir des performances-cibles intermédiaires sur des critères communs à l'ensemble des groupes d'applications afin de suivre la progression de la technologie de pile « générique » ?
- Vous semble-t-il pertinent/nécessaire d'établir des performances-cibles pour les composants auxiliaires ? Pour les composants du cœur de pile (membranes, MEA, plaques bipolaires...) ?

Annexe F Les applications potentielles de la PàC

Applications transports

Piles pour propulsion (avec réformeur/sans réformeur)

- Tramway
- Trains
- Bus
- Minibus
- Poids lourds
- Véhicules légers pour flottes captives (voiture de golf, véhicules pour aéroports, véhicules légers individuels, véhicules de voisinage)
- Véhicules industriels (monte-charges, ...)
- Véhicules 2 roues
- Moto-neige
- Véhicules pour personnes handicapées
- Bateaux
- Véhicules militaires

Générateurs de puissance auxiliaires

- Véhicules lourds (pour hybridation)
- Bus (pour hybridation)
- Véhicules légers (pour hybridation)
- Pour système de réfrigération sur véhicule frigorifique
- Pour composants électroniques de véhicules légers
- Pour composants électroniques de véhicules lourds
- Bateaux
- Sous-marins
- Avions
- Véhicules militaires
- Véhicules spatiaux

Applications stationnaires⁵⁴

- Logements résidentiels
- Logements récréatifs
- Petits commerces
- Sites commerciaux et de services
- Sites industriels
- Usine de traitement de déchet et de recyclage de l'eau

⁵⁴ Certaines des applications stationnaires permettent de profiter des avantages de la cogénération ce qui rend la pile plus rentable et efficace.

- Usines de plaquages (Electroplating plants / traitement de surface)
- Centrale électrique
- Générateurs d'électricité de secours pour industrie
- Générateurs d'électricité de secours pour service (centre de données pour Internet, banques, salles de marché etc,...)
- Générateurs d'électricité pour régulation de la qualité et fiabilité du courant
- Générateurs d'électricité pour sites résidentiels lointains (notamment PVD)
- Générateurs d'électricité pour sites industriels lointains (mines, scieries,...)
- Relais télécommunication
- Signalisations routières
- Balises marines
- Station météo
- Signalisation
- Applications militaires (« énergie sur champs de bataille »)
- Containers réfrigérés
- Plateformes pétrolières

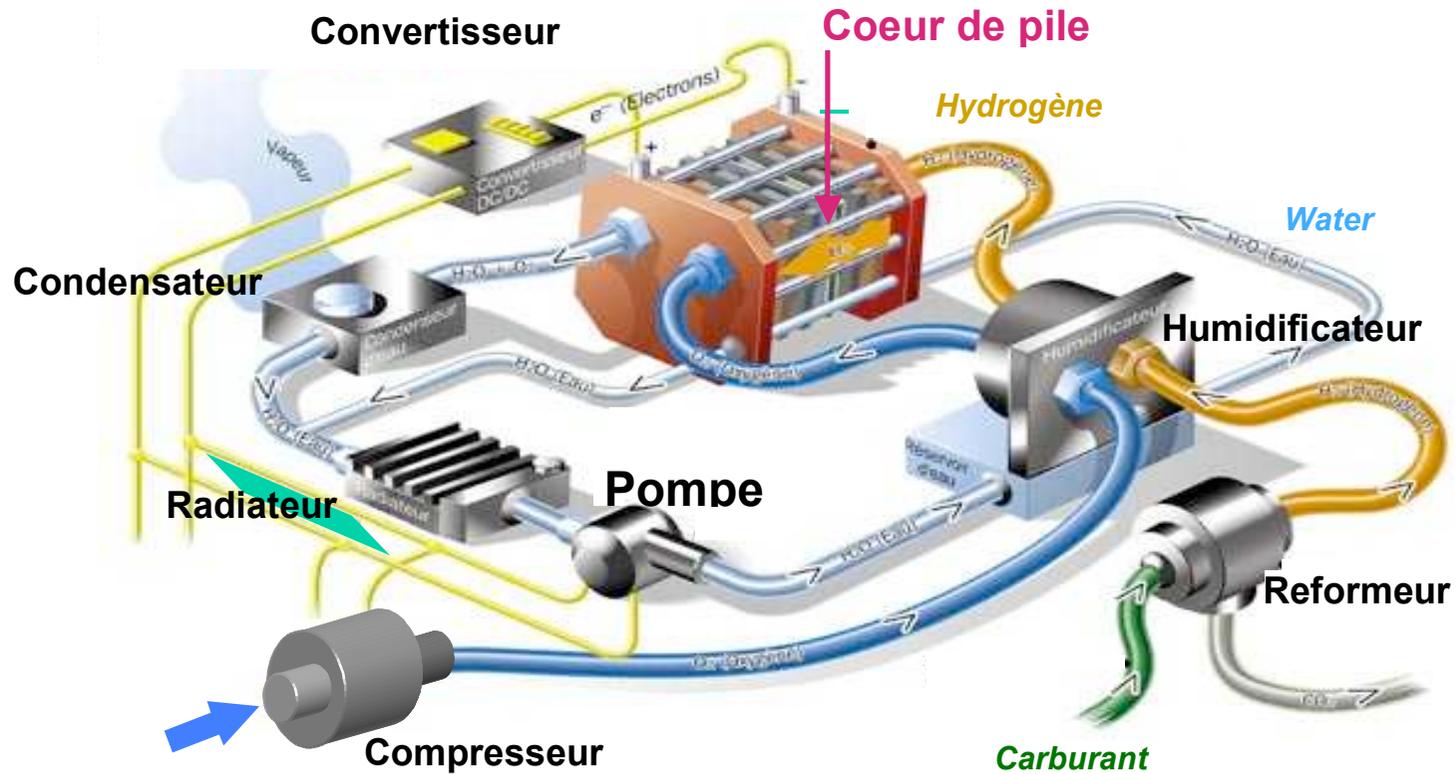
Applications portables

- Micro-pile pour usages médicaux (implants cochléaires, pacemakers,...)
- Générateurs portables récréatifs
- Générateurs portables commerciaux
- Générateurs portables militaires
- Ordinateur portable
- Téléphone portable
- Caméra digitale
- Outillage électrique (perceuses,...)
- Jouets
- Chargeurs de batteries

Annexe G Avantages des PàC par groupes d'applications

Groupes d'applications	Technologies/solutions concurrentes	Avantages potentiels de la PàC par rapport à la technologie concurrente
Portable (>100W)	Batterie Lithium-ion Batterie Lithium polymère	Autonomie très supérieure et facilité/rapidité de recharge
Petit/moyen stationnaire pour groupe électrogène et alimentation sites isolés (<50kW)	Raccordement au réseau des sites isolés	Fiabilité Couplage avec énergie renouvelable Coûts de maintenance ?
Petit/moyen stationnaire pour résidentiel et petits commerces en cogénération (50kW)	Pas de technologies concurrentes disponibles pour la production décentralisée En développement/tests : Moteur sterling Microturbines à gaz	Possibilité de cogénération Production décentralisée d'électricité Suivi de charge/rendement électrique Possibilité de gains économiques
Grand stationnaire pour cogénération (>150kW)	Turbine à gaz	Rendement électrique Gains économiques potentiels dus à la cogénération
Production décentralisée d'électricité	Production centralisée dans centrales électriques actuelles Turbine à gaz	Rendement électrique Diversification des sources de production d'électricité Gain environnemental (selon mix-énergétique en vigueur dans le pays)
Auxiliaires de puissance	Pas de technologies concurrentes disponibles Turbines à gaz (sur puissances élevées, e.g. avions et bateaux) En développement/tests : Batterie Ni-MH Batterie Lithium-ion Batterie Lithium polymère	Rendement électrique (récupération énergie de freinage) Alimentation des dispositifs électroniques à bord, de plus en plus nombreux Pollution en zones urbaines
Petites piles transport (<25kW)	Batteries plomb Moteur essence	Pollution réduite Silence Autonomie
Véhicule collectif Véhicule lourd (>150kW)	Moteur diesel	Pollution réduite
Véhicule individuel (>80-120kW)	Moteur diesel Moteur essence	Pollution réduite ou nulle (selon alimentation et production du combustible) Silence

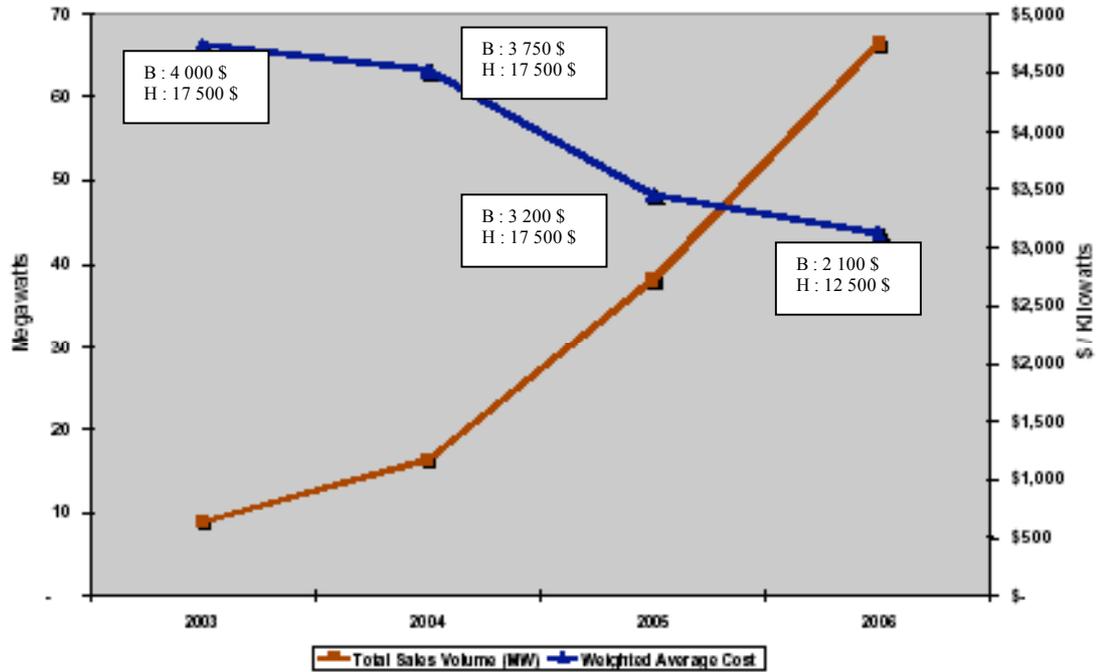
Annexe H Le système-pile, le cœur de pile et ses composants



Source : Plateforme Pile à Combustible Belfort

Annexe I Estimation des économies d'échelle

Evolution des coûts des PàC stationnaires selon les producteurs de PàC



Note : la courbe descendante indique le coût en \$/kW en hypothèse haute (H) et basse (B) en fonction des volumes de vente projetés. Ces données sont issues d'une enquête auprès des producteurs de PàC effectuée en 2003 (CaSFCC Fuel Cell Manufacturers Survey).

Source : CARB, 2004, Draft Fuel Cells Economic Analysis Report, Contract # 02-329, Avril.

Annexe J Verrous technologiques et voies de recherche pour le développement des PàC

Tableau 27 : Verrous technologiques et voies de recherche pour le développement de piles PEMFC

Composant / système	Niveau	Verrous	Pistes pour lever les verrous
AME	Compréhension des mécanismes	AME comme "boîte noire" nécessitant des avancées par processus d'essais et erreurs longs et coûteux Faible durée de vie Tenue au froid limitée	Recherche fondamentale niveau matériaux et AME pour compréhension approfondie des différents mécanismes (fonctionnel, réactionnel) à l'origine des phénomènes de dégradation et/ou de vieillissement de l'AME Développement d'instrumentation "fine" et d'outils de modélisation de la zone réactionnelle.
	Matériaux membrane et Electrodes	Température de fonctionnement limitée à 95°C Humidification nécessaire Faible durée de vie Coût élevé Impossibilité de caler l'AME sur les cahiers applications Tenue au froid limitée	Développement de membrane Haute Température (120-200°C), à humidité réduite et à durée de vie compatible avec les cahiers des charges Développement d'électrodes adaptées à ces membranes
	Matériaux catalyseurs	Teneurs en platine (électrocatalyseurs) trop élevées Sensibilité aux contaminants trop forte.	Développement de catalyseurs tolérants aux impuretés Réduction de la teneur en platine (< 0.1 mg Pt/cm ²).
	Conception AME	Température de fonctionnement limitée à 95°C Humidification nécessaire Faible durée de vie Coût élevé	Conceptions de nouvelles architectures, matériaux et procédés de fabrication innovants d'AME. Développement d'un référentiel d'évaluation des AME en laboratoire et calage avec les données de terrain (en lien avec expérimentations)
Plaques bipolaires, éléments de connexion et piles	Matériaux et conception	Coût élevé Densité massique faible Corrosion Fiabilité limitée Résistance interne trop élevée Tenue au froid limitée	Matériaux innovants Procédés de fabrication reproductibles Nouvelle architecture de pile limitant les facteurs de défaillance, optimisant le coût et les performances.

	Distribution des fluides, de la chaleur et des lignes de courant	Forte sensibilité aux conditions opératoires : humidité, température, distribution des gaz et de charge (courant électrique)	Augmentation des performances par l'amélioration et la modélisation des transferts fluidiques et thermiques et les transferts électriques Validation expérimentale des modèles développés (écoulement diphasiques...).
	Intégration de la pile	Fiabilité limitée Processus d'intégration non industriel Résistance interne globale trop élevée Puissances massique et volumique trop faibles.	Développement de nouvelles architectures de pile Développement de procédés d'industrialisation
Composants et auxiliaires	Circuit des fluides, intégration thermique	Faible rendement global du système due à des auxiliaires non optimisés Fiabilité globale Compacité et masse des auxiliaires Tenue de l'étanchéité pendant la durée de vie système.	Développement et/ou qualification des auxiliaires spécifiques aux « systèmes piles » afin de disposer d'une "banque d'auxiliaires" et améliorer l'intégration thermique. Optimisation des catalyseurs et du procédé de reformatage Amélioration système de purification (membrane de filtration d'hydrogène à faible coût et faible pertes de charge ou catalyseurs plus performants et moins chers, membrane de purification intégrée)
	Traitement du combustible	Faible rendement de la chaîne de traitement du combustible Temps de réponse trop long Fiabilité limitée Coût	Réduction de la complexité et du coût de la chaîne de traitement du combustible
Electronique, capteurs, contrôle commande		Durée de vie limitée du système pile Contrôle <i>in vivo</i> de l'état de la pile impossible	Développement de méthodes de diagnostic fiables utilisant des capteurs adaptés, permettant de limiter l'instrumentation, en vue de la surveillance, la régulation et la maintenance préventive (par exemple : auto-diagnostic en utilisant la pile comme capteur).
Intégration de prototype (pile système) et	Architecture système	Complexité du système Coût élevé du système Masse du système Compacité du système Fiabilité du système	Développement d'architectures système intégrées et optimisées (fluidique, électrique, thermique). Développement des procédures de fonctionnement optimisées
	Objets système pile utilisables	Retour d'expérience limité sur objets en grandeurs réelles et conditions réelles d'opération	Développement, expérimentation et industrialisation en vraie grandeur de solutions de systèmes de piles à combustible répondant au cahier des charges des diverses applications transport et stationnaire, notamment applications « court terme » pour retour d'expérience

Source : Pan-H

Tableau 28 : Verrous technologiques et voies de recherche pour le développement de piles SOFC

Composant / système	Niveau	Verrous	Pistes pour lever les verrous
Cellule	Matériaux de cellules	Température élevée (1000°C) Coûts de matériaux Coûts des procédés élevés Cyclage thermique limité	Développement de matériaux de cellules à température intermédiaire (< 700 °C), de matériaux de cellules à coefficient de dilatation thermique optimisé (cathode et électrolyte) ; Développement de matériaux d'anode résistants au cycle redox, au soufre et au "cokage".
	Design des cellules	Température élevée (1000°C) Coûts de matériaux Coûts des procédés élevés Cyclage thermique limité	Conceptions d'architectures et de procédés de fabrication innovants (ex : procédés sol-gel) Réduction de l'épaisseur des cellules Développement de méthodes de fabrication simples et à faible coût.
Stacks		Problème d'étanchéité aux gaz Forte sensibilité aux variations de conditions opératoires (température, distribution de gaz et courant électrique) Coût élevé Cyclage thermique limité.	Développement de plaques d'interconnexion métalliques moins coûteuses que les matériaux céramiques ; Développement de joints pour sceller les cellules; Modélisation des transferts fluidiques et thermiques Développement d'une architecture de pile limitant les contraintes mécaniques et intégrant les nouveaux design de cellules
Auxiliaires		Coût élevé Faible durée de vie des auxiliaires SOFC	Développement d'auxiliaires spécifiques pour SOFC : échangeurs thermiques à haute température ; Développement d'un système de désulfuration ne nécessitant ni H ₂ ni l'utilisation de charbon actif ; Qualification des circulateurs /compresseurs d'air et combustible.
Système	Intégration des prototypes	Complexité du système Coût élevé	développer une architecture système sur la base des cellules innovantes fonctionnant à température intermédiaire et à reformage interne (en particulier gaz naturel pour cogénération)
	Evaluation et expérimentation des prototypes	Sensibilité aux cyclages thermiques et mécaniques qui limitent la durée de vie du système dans les conditions de fonctionnement.	Evaluation par des essais de la durée de vie d'un stack en fonctionnement dynamique (cas de suivi de charges, cycles arrêt/démarrage...) Développement des procédures de fonctionnement optimisées (maintien en température, montée progressive en température...) en fonction de l'application.
	Expérimentation de terrain	Manque de retour d'expérience sur l'adéquation technologique et fonctionnelle du système de pile à combustible SOFC pour diverses applications	Expérimentation de systèmes SOFC dans les conditions réelles de l'application pour diverse applications (notamment micro-cogénération).

Tableau 29 : Verrous technologiques et voies de recherche pour le développement de piles PCFC

Composant / système	Niveau	Verrous	Pistes pour lever les verrous
AME	Matériaux innovants	Manque de retour d'expérience sur la compréhension des mécanismes de conduction protonique de matériaux céramiques dans le domaine de température 400-600°C.	Etude en amont et sélection de matériaux d'électrodes et matériaux conducteurs protoniques par modélisation moléculaire.
	Elaboration	A ce stade d'avancement, la conception des PCFC est elle même guidée par la volonté de lever les verrous des piles PEMFC et SOFC La PCFC, encore au stade de validation scientifique des matériaux céramiques conducteurs protoniques n'a pas encore de verrous propres	Elaboration et mise en forme de matériaux céramiques conducteurs protoniques et d'électrodes opérant entre 400 et 600°C.

Source : PanH

Annexe K Axes stratégiques du réseau PACo

Suite aux consultations engagées en 2001, le réseau PACo s'est fixé les objectifs suivants :

K.1 Piles PEMFC :

- développer des membranes aux caractéristiques adaptées aux applications. De façon schématique, cela signifie : une augmentation de la température de fonctionnement pour les applications transports et stationnaires ; un abaissement de la température pour les applications portables
- optimiser les voies de synthèse et les procédés d'élaboration des membranes (exemple : compréhension des phénomènes qui interviennent entre la solution et le film pour assurer une homogénéité et donc réduire les défauts)
- optimiser la fabrication des ensembles électrodes-membrane et améliorer les performances (conductivité, propriétés mécaniques, stabilité chimique)
- optimiser la fabrication des plaques bipolaires et améliorer les performances (distribution des gaz, tenue à la corrosion, ...)
- privilégier l'architecture du stack elle-même (conception fonctionnelle)
- étudier les phénomènes de dégradation dans le but de les limiter par la suite (en apportant des modifications chimiques ou autres), se doter d'outils de diagnostic permettant de comprendre les mécanismes de dégradation. Il s'agit par exemple de décrire les différentes étapes de modification d'une membrane fonctionnant entre le millier d'heures et la dizaine de milliers d'heures (synergie entre les recherches pour applications mobiles et stationnaires).
- gagner un ordre de grandeur dans les échelles de production (m², kg)
- proposer des procédés de recyclage
- satisfaire aux cahiers des charges des futurs utilisateurs : coût, intégration du système, aptitude aux transitoires (exemple : effet des impuretés dans le combustible), ...

K.2 Piles SOFC :

- développer de nouveaux matériaux (électrolyte, anode, cathode) pour abaisser la température de fonctionnement (typiquement de l'ordre de 650 °C) et/ou pour permettre un reformage interne du combustible (méthane, hydrocarbures, gaz de synthèse). Le développement des matériaux doit également prendre en compte l'application visée (par exemple, contraintes différentes pour les applications mobiles et stationnaires vis à vis de la capacité au cyclage thermique et du temps de mise en service).
- développer des interconnecteurs avec des matériaux adaptés à des températures de fonctionnement plus basses
- privilégier l'architecture du stack elle-même (conception fonctionnelle)

- améliorer les performances (conductivité, propriétés mécaniques, stabilité chimique).
- développer et optimiser les procédés d'élaboration et mise en forme des matériaux
- développer des technologies d'assemblage
- proposer des procédés de recyclage
- étudier l'effet de la composition et des impuretés du combustible alimentant la pile sur ses performances (sensibilité accrue à des températures de fonctionnement plus basses)
- satisfaire aux cahiers des charges des futurs utilisateurs :coût, intégration du système, aptitude aux transitoires, cycle thermique, temps de mise en service ...
- Pour le combustible :
- pour l'hydrogène, développer des technologies de stockage satisfaisantes du point de vue perméation et résistance mécanique en distinguant celles qui sont accessibles à court terme et celles qui sont accessibles à plus long terme
- développer des reformeurs économiques et compacts capables d'opérer avec une large gamme de combustibles (reformeur avancé)
- intégrer les normes et les réglementations
- satisfaire aux cahiers des charges des futurs utilisateurs (coût, intégration du système, qualité du combustible, recyclage...).

Source : <http://www.reseapaco.org/>

Annexe L Principaux laboratoires CNRS menant des recherches sur les piles PEMFC

Tableau 30 : Composition du Groupement De Recherche PACEM

Domaine de recherche	Établissement	Laboratoire et équipe	Responsable
Membranes	Université de Savoie, Lyon-Vernaison	Laboratoire des Matériaux Organiques à Propriétés Spécifiques (LMOPS), UMR 5041 Equipe "Polymères aromatiques hétérocycliques",	MERCIER Régis MARESTIN Kathy
	Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Montpellier (ENSCM)	Laboratoire de Chimie Macromoléculaire UMR 5076 Equipe "Dérivés fluorés"	AMEDURI Bruno GEBEL Gérard DIAT Olivier
	CEA-UJF Grenoble	Laboratoire "Structure et Propriétés d'Architectures Moléculaires" UMR 5819 Equipe "Polymères Conducteurs Ioniques",	POURCELLY Gérald DURAND Jean
	Université de Montpellier II	Institut Européen des Membranes (IEM) UMR 5635 Equipe "Matériaux Ioniques; Physicochimie et Procédés",	JONES Deborah ROZIERE Jacques
	Université de Montpellier II	Laboratoire des Agrégats Moléculaires (LAMMI) UMR 5072	

Composition du Groupement De Recherche PACEM (suite)

Domaine de recherche	Établissement	Laboratoire et équipe	Responsable
Catalyse	Lyon-Villeurbanne	Institut de Recherches sur la Catalyse, UPR 5401 Equipe "Catalyses et Chimie Fine" Equipe "Génie de la Réaction Catalytique"	PERRARD Alain
	ENSCM, Montpellier	Laboratoire de Matériaux Catalytiques et Catalyse en Chimie Organique UMR 5618,	COQ Bernard
	Université d'Orléans	Groupe de Recherches sur l'Energétique des Milieux Ionisés (GREMI) UMR6606,	BRAULT Pascal
	Université de Poitiers	Laboratoire de Catalyse en Chimie Organique (LACCO), UMR 6503 Equipe "Catalyse par les Métaux",	DUPREZ Daniel
			LAMY Claude LEGER Jean-Michel
	ENS Lyon	Laboratoire de Chimie, Equipe Réactivité Catalyse et Spectroscopie UMR 5182	SAUTET Philippe

Composition du Groupement De Recherche PACEM (suite)

Domaine de recherche	Établissement	Laboratoire et équipe	Responsable
Cœur de Pile	INP Grenoble	Laboratoire d'Electrochimie et de Physico-Chimie des Matériaux et des Interfaces (LEPMI) UMR 5631 Equipe "Génie des Procédés Electrochimiques et Bioélectrochimiques",	OZIL Patrick BULTELL Yann
	ENSIC Nancy	Laboratoire des Sciences du Génie Chimique (LSGC) UPR 6811 Groupe "Transferts et Réactions Electrochimiques et Polyphasiques",	LAPICQUE François VALENTIN Gérard
	INPL UHP Nancy	Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA) UMR 7563	DIDIERJEAN Sophie

Source : CNRS, GDR 2479 "PACEM"

Annexe M Performances-cibles européennes du Strategic Research Agenda

Tableau 31: Performances-cibles européennes (SRA) à l'horizon 2015 pour APU (10kW)

Critères de performances	Valeurs cibles APU
Durabilité	Entre 5 000 et 40 000 heures selon les applications
Température de fonctionnement	De -25°C à + 45°C
Efficience	>35%
Temps de démarrage maximal	<30 secondes
Niveau d'émission de gaz	Inférieur à la norme californienne SULEV
Poids	< 50 kg
Volume	< 50 l

Tableau 32: Performances-cibles européennes (SRA) à l'horizon 2015 pour véhicules individuels (100 kW)

Critères de performances	Valeurs cibles pour véhicule PàC
Durabilité	5 000 h
Température de fonctionnement	De -25°C à + 45°C
Efficience	>40%
Autonomie du véhicule	400 km
Coût (pour une production >150 000 unités par an)	100 € / kW
Puissance massique	1,5 kg/kW
Puissance volumique	1,5 l/kW

Tableau 33: Performances-cibles européennes (SRA) pour petites piles pour applications mobiles (1kW)

Critères de performances	Valeurs cibles petites piles pour applications mobiles 1kW
Puissance massique	5 kg/kW
Puissance volumique	5 l/kW
Efficience	>30%
Température minimale	- 10°C
Autonomie	50-100 km

Tableau 34: Performances-cibles européennes (SRA) à l'horizon 2015 pour applications stationnaires 1-10 kW

Critères de performances		Valeurs cibles petites piles stationnaires (1-10 kW)		
		Essai	Démonstration	Projets phares et déploiement
		2004-2006	2005-2008	2007-2010
Efficienc électrique (a)	%	30	32	34
Efficienc carburant (b)	%	>70	75	80
Coût du système	€/kW	20 000	10 000	4 000
Durabilité de la pile (c)	H	3 000	5 000	>10 000
Nombre de démarrage		20	35	50

(a) Electrical efficiency @ BOL (beginning Of Life), including DC/AC conversion

(b) Total fuel efficiency BOL; @ best point

(c) 90 % BOL performance

(d) low-temperature start-ups from 15 °C

Tableau 35: Performances-cibles européennes (SRA) à l'horizon 2015 pour applications stationnaires 100 kW

Critères de performances		Valeurs cibles grandes piles stationnaires (100 kW)		
		Essai	Démonstration	Projets phares et déploiement
		1998-2004	2004-2006	2007-2010
Efficienc électrique (a)	%	45	50	60
Efficienc carburant (a)	%	75	80	85
Coût du système	€/kW	12 000	3 000	1 500
Dégradation de la pile (c)	%	<1	<<1	<<1

(a) Electrical efficiency @ BOL (beginning Of Life), including DC/AC conversion

(b) Total fuel efficiency BOL; @ best point

(c) 1/1000h

Annexe N Les performances-cibles du DOE

Tableau 36: Performances-cibles du DOE pour pile 50kWe à alimentation directe en H2

Critère de performance		Unités	2001	2005	2010
Efficiéce		%	59	60	60
Puissance volumique	Avec stockage H2	W/L	-	150	220
	Sans stockage H2	W/L	400	500	650
Puissance massique	Avec stockage H2	W/Kg	-	250	325
	Sans stockage H2	W/Kg	400	500	650
Coût	\$/kW		200	125	45
Durabilité	Heures		1000	2000	5000
Temps de réponse	Sec		3	2	1
Temps de démarrage	à - 20°	Sec	120	60	30
	à + 20°	Sec	60	30	15
Résistance température	°C		-20	-30	-40

Source : DOE

Tableau 37: Performances-cibles du DOE pour piles inférieures à 50We pour électronique portable

Critère de performance	Unités	2006	2010
Puissance spécifique	W/kg	30	100
Puissance volumique	W/L	30	100
Energie volumique	Wh/L	500	1000
Coût	\$/kW	5	3
Durée de vie	Heures	1000	5000

Tableau 38: Performances-cibles du DOE pour générateurs de puissance auxiliaires 3-5kW en moyenne, 5-10kW en crête

Critère de performance	Unités	2006	2010
Puissance spécifique	W/kg	80	150
Puissance volumique	W/L	80	170
Efficiéce	%	25	35
Cyclabilité (démarrage à froid)	Nb de cycles	1500	400
Coût	\$/kW	20	500
Durée de vie	h	1000	5000
Temps de démarrage	min	30-45	15-30

Note : l'application de la pile pour des unités de réfrigération pour camion frigorifique est également mentionnée

Annexe O Performances-cibles du SRA

Tableau 39: Performances-cibles européennes (SRA) à l'horizon 2015 pour APU (10kW)

Critères de performances	Valeurs cibles APU
Durabilité	Entre 5 000 et 40 000 heures selon les applications
Température de fonctionnement	De -25°C à + 45°C
Efficience	>35%
Temps de démarrage maximal	<30 secondes
Niveau d'émission de gaz	Inférieur à la norme californienne SULEV
Poids	< 50 kg
Volume	< 50 l

Tableau 40: Performances-cibles européennes (SRA) à l'horizon 2015 pour véhicules individuels (100 kW)

Critères de performances	Valeurs cibles pour véhicule PàC
Durabilité	5 000 h
Température de fonctionnement	De -25°C à + 45°C
Efficience	>40%
Autonomie du véhicule	400 km
Coût (pour une production >150 000 unités par an)	100 € / kW
Puissance massique	1,5 kg/kW
Puissance volumique	1,5 l/kW

Tableau 41: Performances-cibles européennes (SRA) pour petites piles pour applications transports (1kW)

Critères de performances	Valeurs cibles petites piles pour applications transports 1kW
Puissance massique	5 kg/kW
Puissance volumique	5 l/kW
Efficience	>30%
Température minimale	- 10°C
Autonomie	50-100 km

Tableau 42: Performances-cibles européennes (SRA) à l'horizon 2015 pour applications stationnaires (1-10 kW)

Critères de performances		Valeurs cibles petites piles stationnaires (1-10 kW)		
		Essai	Démonstration	Projets phares et déploiement
		2004-2006	2005-2008	2007-2010
Efficienc électrique (a)	%	30	32	34
Efficienc carburant (b)	%	>70	75	80
Coût du système	€/kW	20 000	10 000	4 000
Durabilité de la pile (c)	H	3 000	5 000	>10 000
Nombre de démarrage		20	35	50

(e) Electrical efficiency @ BOL (beginning Of Life), including DC/AC conversion

(f) Total fuel efficiency BOL; @ best point

(g) 90 % BOL performance (d) low-temperature start-ups from 15 °C

Tableau 43: Performances-cibles européennes (SRA) à l'horizon 2015 pour applications stationnaires 100 kW

Critères de performances		Valeurs cibles grandes piles stationnaires (100 kW)		
		Essai	Démonstration	Projets phares et déploiement
		1998-2004	2004-2006	2007-2010
Efficienc électrique (a)	%	45	50	60
Efficienc carburant (a)	%	75	80	85
Coût du système	€/kW	12 000	3 000	1 500
Dégradation de la pile (c)	%	<1	<<1	<<1

(d) Electrical efficiency @ BOL (beginning Of Life), including DC/AC conversion

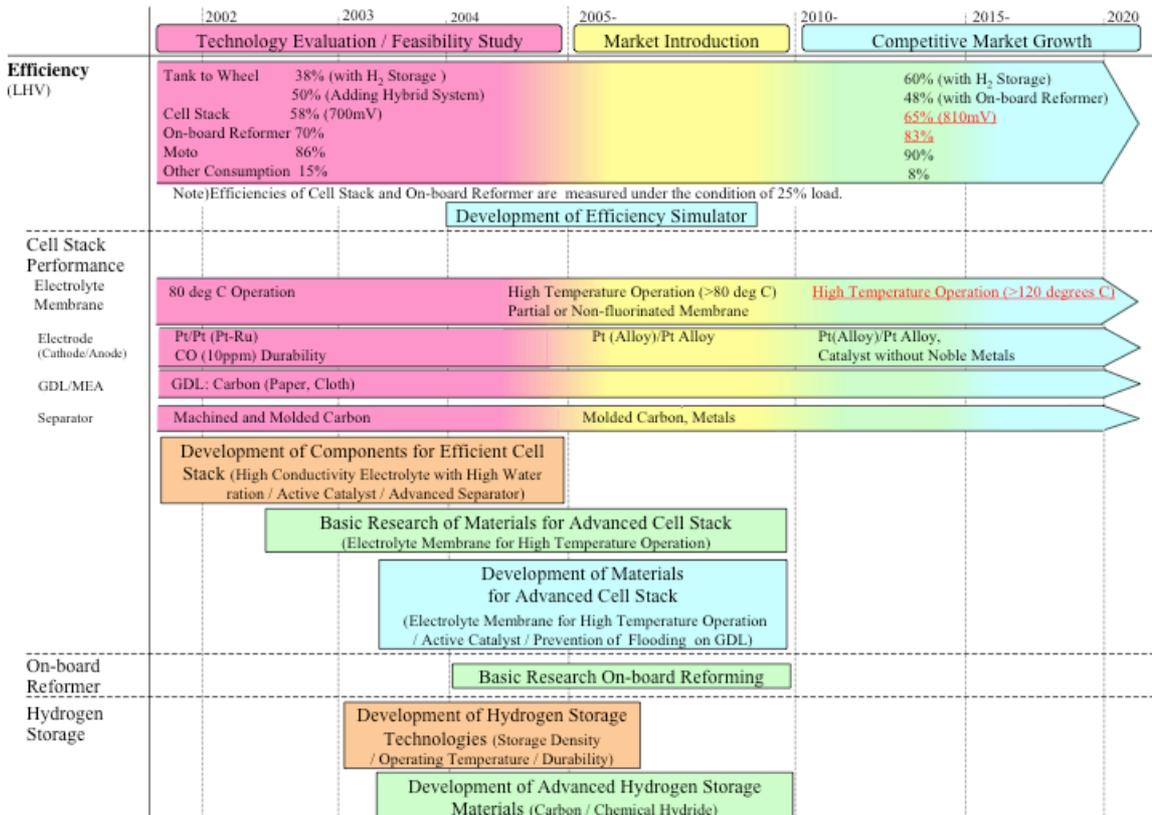
(e) Total fuel efficiency BOL; @ best point

(f) 1/1000h

Annexe P Roadmap japonaise de la FCCJ

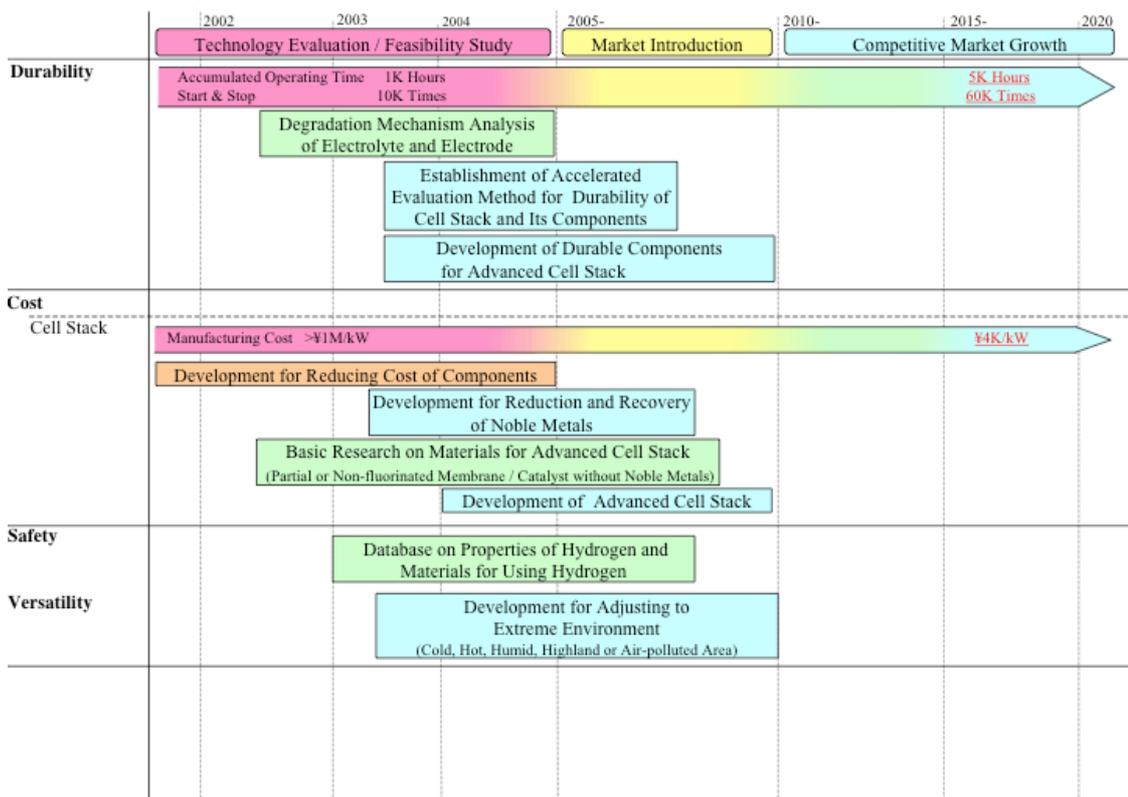
3. Fuel Cell Vehicle (1)

5



3. Fuel Cell Vehicle (2)

6



Annexe Q Programmes allemands régionaux de soutien à la PàC

Figure 14: Carte des programmes de soutien à la PàC mis en place dans les lands allemands



Tableau 44: Caractéristiques des principaux programmes de soutien à la PàC mis en place dans les lands allemands

Région (date de création)	Nom	Opérateurs	Financement	Projets	Membres	Contact et site internet
Baden-Württemberg	Brennstoffzellen Initiative Baden-Württemberg (initiative Piles à combustible) coordonnant: Forschungsallianz Brennstoffzellen Baden-Württemberg (FABZ): alliance pour la recherche sur les PàC Kompetenz- und Innovationszentrum Brennstoffzelle (KIBZ): centre de compétences et d'innovation sur les PàC Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle Ulm (WBZU): centre de formation continue sur les PàC d'Ulm (2001)	Pour le FABZ: Ministère des Sciences et de la Recherche et Ministère de l'Economie du Baden-Württemberg; Pour le WBZU: la région et le Ministère fédéral de l'Economie et du Travail; Pour le KIBZ: les membres	au total: environ 4M€/an	projets dans le domaine de la recherche, du développement, de la formation et de la mise en œuvre de technologies	Plus de 60 membres issus de l'éducation, de la recherche, de l'industrie et des associations	FABZ: Dr W.Lehnert, WBZU: Dipl.-Ing T.aigle, KIBZ: Dr B.Schaible http://www.brennstoffzellen-initiative.de
Bavière	Wasserstoff-Initiative Bayern (Wiba): initiative hydrogène de Bavière (1996)	Ministère bavarois des Affaires Economiques, des Infrastructures, des Transports et de la Technologie	environ 25M€	depuis 1997 plus de 30 projets avec un volume financier d'environ 75M€	environ 50 partenaires de projets	Prof.Dr-Ing U.Wagner http://www.wiba.de
Hesse	Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Initiative Hessen: initiative hydrogène et PàC de Hesse (2002)	Membres (compagnies, instituts, individus), Ministère régional de l'Economie, des Transports, du développement urbain et régional via la Fondation pour la Technologie de hesse (Technologie Stiftung Hessen GmbH)	pas de financement institutionnel	projets dans les domaines de la recherche, du développement, de la formation et de la mise en œuvre de technologies		Dr H. Lienkamp http://www.brennstoffzelle-hessen.de
Basse Saxe	Landesinitiative Brennstoffzelle Niedersachsen: initiative régionale pour les PàC (2004)	Ministère régional de l'Economie, du Travail et des Transports, Ministère régional des Sciences et de la Culture, Ministère régional de l'environnement	9,5M€ pour 2004-2007		actuellement environ 12 partenaires	Dipl.-Ing. W.Axthammer http://www.brennstoffzelle-nds.de

Rhénanie du Nord-Wesphalie	Kompetenz-Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff NRW: Réseau de compétences PàC et hydrogène de Rhénanie du Nord-Westphalie (2000)	Ministère régional de l'Energie, des Transports et de l'Agencement spatial, Ministère régional de la Science et de la Recherche	50M€ issus des Ministères de l'Energie et de la Science	50 projets, volume total: 100M€	environ 250 compagnies et 50 instituts de recherche	Prof Dr-Ing. D.Stolten, Centre de recherche Jülich http://www.brennstoffzelle-nrw.de
Mecklenbourg-Poméranie Occidentale	Wasserstofftechnologie-Initiative Mecklenbourg-Vorpommern e.V.: initiative technologies hydrogènes de Mecklenbourg-Poméranie Occidentale (2002)	Ministère régional de l'Economie, du Travail et des Transports, Ministère régional des Sciences et de la Culture, Ministère régional de l'environnement	financement de projets par la région pour 614 000 € jusqu'à 2006	depuis 2000, 10 projets avec un volume d'environ 15 M€		Dr-Ing Gerhard Buttkevit http://www.wti-mv.dez
Rhénanie-Palatinat	Zukunftstechnologie Brennstoffzelle Rheinland-Pfalz: Technologie d'avenir PàC Rhénanie-Palatinat (2002)	Ministère régional de l'Economie, des Transports, de l'Agriculture et de la Viticulture	360 000€ (pour 3 ans)			Prof. Dr K.Keilen
Saxe	Technologietransfer-Verbundprojekt PEM (Polymer-Elektrolyt-Membran)-Brennstoffzelle Sachsen: projet PàC PEM de Saxe (2003)	Ministère régional de l'Economie et du Travail			12	Dipl.-Ing. S.Stöhr http://www.pem-brennstoffzelle-sachsen.de
Saxe-Anhalt	Brennstoffzellenverband Sachsen-Anhalt: association PàC de Saxe-Anhalt					Dr I.Benecke http://www.brennstoffzelle-sa.de

Annexe R Benchmarking international des modes de coordination des sept fonctions de la courbe d'apprentissage

Tableau 45 : Tableau récapitulatif des initiatives publiques/privés étrangères dans le domaine de la PàC

Fonctions	Initiative (date début)	Type d'instrument	Financement public	Organisation et fonctionnement	Projets	Remarque
Coordination des relations recherche-industrie	PACo (1999) France	Réseau d'innovation	>10M€ par an	Labellisation par <i>peer review</i> et financement de projets liant entreprises et laboratoires suite à un AAP ouvert	52 projets labellisés, R&D, démonstration,	Se révèle très efficace pendant phases d'émergence Instrument <i>bottom-up</i> ,
	Future Investments Program (ZIP) Allemagne	Programme Fédéral Allemand	140 M€ pour piles stationnaires et 105 M€ pour piles transport 1990-2003	Programme très large sur l'ensemble des technologies d'énergie alternatives, de la recherche de base à la démonstration Fonctionne par appel à propositions Financement provenant des licences UMTS	Projets de recherche sur MCFC, SOFC, PEMFC Projet de démonstration	
	FreedomCar and Fuel Initiative (2002) Etats-Unis	Interface public-privé de coordination des recherche	Entre 150 et 200M\$ par an	Structure de coordination de divers projet de R&D co-financés par le DOE, généralement suite à un AAP spécifique ou encore au travers d'autres programmes (<i>e.g.</i> Small Business Innovation Research) Les grands industriels de l'automobile et du pétrole élaborent ensemble les besoins (performances-cibles, contenu des AAP) et priorités (roadmap) dans le domaine	Difficile à recenser du fait qu'il s'agit d'une structure « enveloppe » (<i>umbrella</i>) abritant et coordonnant des projets d'autres programmes et laboratoires	Interface permettant la coordination des relations des entreprises avec les interventions du DOE Domaine très large, non limité au PàC

Tableau récapitulatif des initiatives publiques/privés étrangères dans le domaine de la PaC (suite)

Fonctions	Initiative (date début)	Type d'instrument	Financement public	Organisation et fonctionnement	Projets	Remarque
Démonstration des nouvelles générations de systèmes-piles	California FC Partnership (1999) Etats-Unis	Programme de démonstration par partenariat	2M\$ par an	21 partenaires permanents payent 84 000\$/an, les constructeurs automobiles fournissent les véhicules, les pétroliers l'infrastructure et le carburant	65 véhicules et 15 stations en opération (objectif 2007: 300 véhicules, 24 stations)	
	Projet d'autoroute à hydrogène (The California Hydrogen Highway Networks) Etats-Unis	Projet de démonstration		Partenariat public/privé. Le secteur public doit intervenir pour faciliter la commercialisation de l'hydrogène par la formation, des incitations financières, des garanties salariales...	Objectif de mise en service de 50 à 100 stations à hydrogène dans une phase I jusqu'en 2010. La phase II prévoit la construction de 250 stations en usage restreint. L'usage de ces stations sera élargi lors de la phase III	Projet de démonstration type « communauté de l'hydrogène » où est démontrée une filière entière, de la fourniture d'H2 à sa valorisation dans diverses applications
	Projet Hynor Norvège	Projet de démonstration	4,6 M\$	Initiative de l'État après un vote du Parlement	Autoroute à hydrogène de 580 km construite entre 2005 et 2008 qui concerne plusieurs moyens et systèmes de transport: bus, taxis et voitures privées; urbain, inter-villes, régionaux et nationaux.	
	Munich Airport Demonstration Project (1999) Allemagne	Programme de démonstration intégré	42 M € sur 6 ans	Les entreprises participant au projet font la démonstration de systèmes de distribution d'hydrogène et de l'utilisation quotidienne de véhicules fonctionnant avec des systèmes-piles à hydrogène direct	Démonstration de 3 systèmes de distribution d'hydrogène et de l'utilisation quotidienne de véhicules (3 bus, 1 véhicule). Production locale d'hydrogène (reformage de gaz naturel). D'autres applications à venir (monte-charges...)	
	Programme APh2 Canada	Programme de démonstration par AAP	7M\$CAN	Financement sur la base de proposition effectuées auprès de Partenariat technologique Canada (PTC), organisme de service spécial d'Industrie Canada. Industrie Canada finance 50 à 75% du coût des projets.	3 projets de démonstration de véhicules utilitaires et système de chauffage et UPS	

Tableau récapitulatif des initiatives publiques/privés étrangères dans le domaine de la PàC (suite)

Fonctions	Initiative (date début)	Type d'instrument	Financement public	Organisation et fonctionnement	Projets	Remarque
Orientation stratégique	Integrated PEM Fuel Cell R&D Workshop (1997) Etats-Unis	Sélection collective des directions de recherche		Groupe de travail intégré sur les PEMFC, organisé par le Département EERE (<i>Energy Efficiency and Renewable Energy</i>) du DOE. 40 participants provenant des entreprises-clés dans cette technologie, des pouvoirs publics, des laboratoires fédéraux et des organisations professionnelles	Recherche d'un consensus sur les performances requises des différents segments de marché, les capacités présentes et futures des piles PEM à satisfaire ces performances, identification des initiatives de R&D et de démonstration multi-applications, de démonstrations spécifiques aux différents segments, et identification des rôles et responsabilités des pouvoirs publics dans l'accélération du développement des piles PEM.	
	Ensemble des <i>roadmaps</i> et autres éléments de programmation stratégique (Cf. Tableau 20)					
Coordination des activités de recherche de base	Programme de coordination des instituts du CNRC Canada	Programme CNRC		Réseau d'instituts travaillant avec les organisations de R&D locales, les universités, les agences gouvernementales et l'industrie locale pour soutenir le développement de clusters régionaux sur les PàC	Soutien au niveau de la recherche et de l'innovation dans les secteurs de la mise au point des composants, de l'intégration et de la fabrication des systèmes, de la simulation et de la conception, du contrôle et de l'évaluation environnementales, et de la recherche sur les combustibles	Réseau décentralisé, avec des nœuds de réseau forts (Institute for Fuel Cell Innovation, Centre de technologie des piles à combustible (CTPC))

Tableau récapitulatif des initiatives publiques/privés étrangères dans le domaine de la PàC (suite)

Fonctions	Initiative (date début)	Type d'instrument	Financement public	Organisation et fonctionnement	Projets	Remarque
Soutien au décollage des marchés précoces	« <i>Clean Energy Fund</i> » au Connecticut Etats-Unis	Structure d'incitation à l'offre de systèmes-piles	Budget total de 9 M€ en 2002 pour les PàC	Géré par Connecticut Innovations Inc., une agence quasi-publique qui investit notamment dans l'équité pour étendre le secteur des hautes-technologies du Connecticut.	Porte avant tout sur le stationnaire, et sur la démonstration de PàC proches de la commercialisation, et d'autre part sur l'installation de PàC prêtes commercialement à haute valeur ajoutée	
	« <i>Renewable Energy Loans</i> » de l'Ohio Etats-Unis	Structures d'incitation à l'achat de systèmes-piles	12M\$ pour 1999-2002	Incitation à la mise en œuvre de projets d'efficacité énergétique et d'énergies renouvelables de particuliers, d'entreprises, d'écoles etc. La mesure réduit le taux d'intérêt auprès de 11 banques de l'Ohio pour l'emprunt d'argent visant à financer un projet. Financé par une taxe sur les factures d'électricité des clients de 5 compagnies électriques (environ 9% par mois)	Les projets doivent être situés sur le territoire d'une des 5 compagnies de distribution d'électricité partenaires. Les prêts pour les projets résidentiels représentent de 5 000 à 25 000 \$, et les projets commerciaux et institutionnels de 5 000 à 500 000 \$. Les industries éligibles doivent être des PME au sens de la Small Business Administration	
	Memoranda of Agreement / ZEV Mandate (1996) Etats-Unis	Structure d'incitation liant offre et demande	Jamais mis en place en réalité	Initiative concertée et négociée visant au développement parallèle du marché du VE et des technologies de systèmes électrochimiques pour VE. Les crédits accordés aux constructeurs automobiles pour chaque véhicule proposé pour l'usage quotidien sont différenciés selon les technologies de systèmes électrochimiques utilisées		Mis en place dans le contexte d'une réglementation très contraignante créant une demande <i>de facto</i>
	Kraft-Wärme-Kopplung Gesetz (loi cogénération) (2002) Allemagne	Subvention du prix de l'électricité produite par cogénération	4.4 Milliards € d'ici 2010	Subvention du prix de l'électricité produite par cogénération	Taille maximale des installations : 50 kW Prime de 0,0511 €/kW pendant 10 ans après installation si investissement avant 2005	
Instauration de performances-cibles et évaluation des systèmes-piles						

Annexe S Les fondements de la stratégie de niches de marché

Bien que pratiquée de longues dates par les entrepreneurs pour faire évoluer leur portefeuille de produits, la stratégie de niche de marché, n'a été conceptualisée au niveau sectoriel et appliquée au cas des technologies émergentes qu'à la fin des années 90 par un groupe de chercheur mené par René Kemp⁵⁵. Bien que ces auteurs ont permis de poser des bases solides pour justifier l'intérêt d'une telle stratégie, ils n'ont à notre connaissance que peu poussé leur réflexion vers l'analyse des différentes modes de coordination permettant aux acteurs public et privés de mettre en œuvre une telle stratégie.

S.1 Le « strategic niche management »

Les auteurs partent du constat que les nouvelles technologies lors de leurs étapes préliminaires de développement se confrontent le plus souvent à un paradigme établi autour des technologies existantes. Sans mise en œuvre d'une stratégie collective, ce paradigme établi laisse peu de chances de succès aux nouvelles venues, quels que soient les problèmes engendrés par le système en place et les promesses de la technologie alternative. Le problème est d'autant plus prégnant pour les technologies environnementales dont les avantages ne sont que peu valorisés par les mécanismes de marchés. Le véhicule à PAC est un exemple caractéristique d'une telle situation : il doit arriver à concurrencer en termes de service rendu et de coûts le véhicule thermique établi depuis plus d'un siècle et bénéficiant d'infrastructures technologique, industrielle financière et sociale sans équivalent⁵⁶.

Selon le « *strategic niche management* » proposé par les auteurs, la sortie de cette situation caractéristique d'enfermement (« *lock-in* ») dans un paradigme ne peut se faire que progressivement par l'introduction de premières générations de technologies sur des segments de marchés limités. Ces niches de marchés sont des « espaces protégés » permettant de se soustraire à la concurrence frontale avec la technologie en place :

« 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 enhancing the rate of application of the new technology. »

Ces niches peuvent être soit des segments valorisant une caractéristique particulière de la technologie alternative (quel que soit le « sacrifice » sur les autres

⁵⁵ Voir notamment :

R. Kemp, J. Schot and R. Hoogma , 1998, Regime shifts to sustainability through processes of niche formation: the approach of strategic niche management. *Technology Analysis and Strategic Management*, 10 2 , pp. 175-195.

R. Kemp, J. Schot and R. Hoogma , 1996, Regime Shifts through Processes of Niche Formation. The Case of Transport, *Greening of Industry Conference*, Heidelberg, 24-27 Novembre.

⁵⁶ Cette stratégie de niche de marché a d'ailleurs été conceptualisée au travers de l'exemple du véhicule électrique dans le projet "*Strategic Niche Management as a Tool for Transition to a Sustainable Transportation System*" appartenant au programme "*Environment and Climate*" de la DG XII.

caractéristiques), soit des niches créées ou subventionnées par les pouvoirs publics (via des expérimentations en conditions réelles, des réglementations favorisant la nouvelle technologie, des subventions à l'achat des technologies alternatives, etc.). Les apprentissages issus de ces technologies pionnières permettent de soutenir le développement technologique des générations ultérieures de cette même technologie, d'accroître son acceptabilité et de construire les réseaux et l'infrastructure nécessaire à son déploiement. Dans la situation d'incertitude radicale qui caractérise les phases d'émergence d'une nouvelle technologie, la notion « d'espace protégé » renvoie également à la mise en place de projets parallèles sur ces différentes options technico-économiques alternatives afin de révéler et d'éprouver leurs mérites respectifs. Cette « compétition coordonnée » permet non seulement de protéger ces options alternatives des technologies en place mais également de préserver au niveau de l'industrie émergente la variété technologique, évitant ainsi une focalisation trop rapide sur un petit nombre d'options aux potentiels encore très incertains.

S.2 Stratégie de niches de marché versus politiques technologiques « monolithiques »

La stratégie de montée en niche de marché s'affranchit de l'éternel débat opposant les politiques « monolithiques » *technology-push* ou *demand-pull*⁵⁷. Le succès des premières est conditionnée par l'avènement d'une rupture technologique, généralement attendue de la recherche fondamentale, permettant le déploiement de la technologie.

Les Etats-Unis, la Grande-Bretagne et la France ont longtemps été couramment cités pour illustrer le modèle *technology-push*. L'hypothèse qui sous-tend ces politiques est, qu'une fois le sous-investissement des entreprises en recherche de base corrigé par l'Etat, les entrepreneurs aidés par les signaux de marché prendront d'eux-mêmes le relais pour convertir ces connaissances scientifiques en innovation. Très peu d'attention est portée aux structures ou aux procédures d'accompagnement et de transfert, permettant de relier la recherche et l'industrie.

Les politiques *demand-pull* accentuent leur soutien sur l'éducation, la formation professionnelle et les structures de liaisons entre les producteurs et les utilisateurs. Ce modèle de politique souffre quant à lui des maux inverses à ceux des politiques orientées vers la mission : une base scientifique trop faible pour nourrir les développements industriels et un certain conservatisme à l'encontre des « paradigmes émergents » qui ne reçoivent alors que peu d'attention. La politique technologique et industrielle (les deux se confondent dans ce cas) menée par le Japon durant les années 50 et 60 est généralement citée comme représentative de ce modèle. Pendant cette période, l'action du MITI a façonné des industries étroitement dépendantes des importations de technologies génériques occidentales, mais qui ont prouvé leur efficacité pour en faire des innovations commerciales réussies. Les multiples analystes qui se sont penchés sur le « miracle japonais » attribuent cette réussite en premier lieu à sa capacité à effectuer des améliorations incrémentales sur des technologies génériques existantes, en adéquation avec les besoins des utilisateurs et

⁵⁷ Aussi appelées politiques technologiques respectivement « orientées vers la mission » et « orientées vers la diffusion ». Enfin, pour distinguer ces politiques intervenant principalement aux extrémités de la chaîne d'innovation des politiques mixtes telles que la stratégie de niche de marché, on oppose parfois les « *single stage strategies* » et les « *multi stage strategies* ».

consommateurs (comme ont pu le constater les constructeurs automobiles ou électroniques américains et européens dans les années 70-80...).

S.3 Des structures de coordination de la stratégie de niche de marché toujours incertaines

La stratégie de niche de marché ne repose pas sur la seule mise en place de projets de recherche, aussi ambitieux soient-ils, ni sur des programmes de démonstration des technologies alternatives, mais bien sur la liaison entre ces initiatives. De plus au-delà du soutien au changement technologique et au décollage du marché, il s'agit également de favoriser les changements institutionnels nécessaires, par exemple en favorisant le changement progressif de normes sociales, d'initier la construction des réseaux et de l'infrastructure correspondant à la nouvelle technologie, de soutenir l'émergence d'une base de fournisseurs compétitives et de techniciens expérimentés.

La stratégie de montée en niche de marché met au centre des dispositifs de soutien et des modes de coordination à mettre en place les relations entre les phases amont et aval de la chaîne d'innovation afin que s'établissent les processus d'apprentissage. Cependant, si la conceptualisation et la justification de cette stratégie est novatrice, les instruments de la « *politique intégrée et coordonnée* » que les auteurs appellent de leurs vœux pour soutenir cette stratégie de niche de marché restent peu développés.

Les auteurs se contentent de décomposer le processus de mise en œuvre de cette stratégie en 4 phases (Kemp *et al.*, 1996) :

- le choix d'une technologie à soutenir (notamment sur la base de la pertinence de leurs promesses par rapport aux priorités sociales)
- la sélection des niches de marchés sur lesquelles expérimenter les premières générations de la technologie (segments sur lesquels la technologie sous sa forme actuelle est attractive malgré ses désavantages et sur lesquels elle ne constitue pas une discontinuité majeure ; il peut s'agir également d'une expérimentation dans une région favorable à la mise en place de la technologie)
- la mise en place des expérimentations (phase la plus complexe car devant arbitrer entre « *protection* » et « *sélection* », afin de soutenir la technologie tout en l'éprouvant).
- la montée en échelle (« *scaling-up* ») des expérimentations (ce qui nécessite, même dans le cas d'un succès sur la niche de marché, un fort volontarisme politique).