

Stratégie PàC-Transport : Etude de la stratégie du développement de la pile à combustible dans le domaine des transports

Rapport final

Lettre de commande n°04MT5 040

Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du territoire, du Tourisme et de la Mer

**Direction de la recherche et des affaires scientifiques et techniques
Mission transport**

Paris, le 7 septembre 2005

**Philippe Larrue
Bastiaan de Laat
Sophie Bussillet**

Sommaire

Remerciements	8
Introduction	9
1.1 Les stratégies françaises et européennes de niches de marché	9
1.1.1 Le Plan d'Action Pan-H	9
1.1.2 La Stratégie de Déploiement de la Plateforme Européenne HFP	10
1.1.3 Le point commun entre les stratégies française et européenne	10
1.2 Une étude en deux étapes	11
1.2.1 Les deux conditions de succès d'une stratégie de niche de marché	11
1.2.2 Le point de départ des deux parties : une analyse des cahiers des charges technologiques et fonctionnels	11
PARTIE 1 : Construction De La Courbe D'apprentissage De La Pile A Combustible	14
1 Le cadre d'analyse de la courbe d'apprentissage	14
1.1 La courbe d'apprentissage des systèmes-piles	14
1.1.1 Les synergies au cœur de la courbe d'apprentissage	14
1.1.2 Représentation de la courbe d'apprentissage	17
1.2 L'unité élémentaire de l'analyse : les groupes d'applications homogènes	19
1.2.1 Méthodologie de formation des groupes	19
1.2.2 Les groupes d'applications de la pile à combustible	19
1.3 Associations préliminaires entre technologies de pile et groupes d'applications	21
2 Les déterminants des synergies	22
2.1 Les proximités comme déterminant principal des synergies	22
2.2 Les proximités des cahiers des charges	24
2.2.1 Les applications portables	24
2.2.2 Les applications stationnaires	24
2.2.3 Les applications transports	25
2.3 Les vecteurs de synergies	26
2.3.1 Synergies provenant du partage d'un même cœur de pile	26
2.3.2 Synergies provenant du partage de mêmes composants du système	27
2.3.3 Synergies provenant du partage d'une même base de connaissances scientifiques et technologiques	27
2.3.4 Synergies provenant du partage d'une même base de fournisseurs	28
2.3.5 Synergies provenant du partage d'une même base d'utilisateurs	28
2.3.6 Synergies provenant du partage d'une même infrastructure de fourniture de carburant	29
3 Identification des synergies entre groupes d'applications	29
3.1 Synergies entre applications stationnaires	29
3.2 Synergie entre applications stationnaires et transport	31
3.3 Synergie entre applications portables et les applications stationnaires et transports	33
3.4 Synergies entre applications transport	34
3.5 Résumé des résultats de la cartographie	36

4	Proposition d'un calendrier de la courbe d'apprentissage	38
4.1	Détermination de l'ordre de succession des générations de systèmes-piles	38
4.1.1	Les verrous de la « durabilité » et de la « cyclabilité » des systèmes-piles	38
4.1.2	Le verrou de l'infrastructure de distribution de carburant	39
4.1.3	Le verrou du coût des systèmes-piles	39
4.2	Proposition de calendrier	40
4.2.1	Un axe de synergies entre systèmes-piles pour applications stationnaires	40
4.2.2	Un axe de synergies entre systèmes-piles pour applications transports	41
4.2.3	Un axe de synergies entre systèmes-piles pour applications stationnaires et transports	41
PARTIE 2 : Construction De La Structure De Pilotage De La Courbe D'apprentissage Des Systemes-Piles		44
1	Le cadre d'analyse de la structure de pilotage	45
1.1	De l'analyse de la courbe d'apprentissage à l'analyse fonctionnelle de la structure de pilotage	45
1.2	Des expériences multiples à l'étranger	47
2	Fonction de coordination des activités de recherche de base	50
2.1	Les bases de la fonction	50
2.2	Le Programme du CNRC sur les piles à combustible	50
2.3	L'Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program du DOE	51
3	Fonction de coordination des relations recherche industrie	53
3.1	Les bases de la fonction	53
3.2	La FreedomCAR and Fuel Initiative	54
3.3	Le réseau PACo	56
4	Fonction de normalisation et modularisation des systèmes-piles	59
4.1	Les bases de la fonction	59
4.2	Un programme de développement de piles modulaires multi-applications : la SECA	59
4.3	Un projet de développement de piles modulaire multi-application : FEBUSS	61
5	Fonction de démonstration des nouvelles générations de systèmes-piles	62
5.1	Les bases de la fonction	62
5.2	Le <i>California Fuel Cell Partnership</i>	62
5.3	Les autoroutes, villages et aéroports de l'hydrogène	63
5.4	Le Programme canadien des Adhérents Pionniers H2 (Aph2)	65
6	Fonction de soutien au décollage de marchés précoces	67
6.1	Les bases de la fonction	67
6.2	Structures d'incitation à l'offre de systèmes-piles aux Etats-Unis	68
6.3	Structures d'incitation à l'achat de systèmes-piles aux Etats-Unis	69
6.4	Structure d'incitation liant offre et demande aux Etats-Unis	69
7	Fonction instauration de performances-cibles et évaluation des systèmes	71
7.1	Les bases de la fonction	71
7.2	Les ensembles de performances-cibles publics et privés au sein des programme de recherche ou des plans stratégiques nationaux	72

7.3	L'évaluation des systèmes-piles et le développement d'infratechnologies	73
8	Fonction d'orientation stratégique de la filière	74
8.1	Les bases de la fonction	74
8.2	Un exemple de sélection collective des directions de recherche aux Etats-Unis: <i>l'Integrated PEM Fuel Cell R&D Workshop</i>	76
8.3	De la Vision au Plan d'Action nord-américain	77
8.3.1	La Vision du DOE	77
8.3.2	La <i>roadmap</i> du DOE	78
8.3.3	Le plan d'action du DOE	79
8.4	La « Vision » britannique	80
8.5	La <i>roadmap</i> canadienne	81
9	Proposition d'une structure de pilotage de la courbe d'apprentissage	84
9.1	L'intégration des fonctions au sein de la structure de pilotage	84
9.2	La mise en cohérence des fonctions au sein de la structure de pilotage	86
9.2.1	La Fuel Cell Conference of Japan	86
9.2.2	Le groupe de pilotage HYBERT au niveau fédéral allemand	88
9.2.3	Les initiatives Piles à combustible du Bade-Wurtemberg et de Rhénanie du Nord-Westphalie	89
9.3	Proposition de structure de pilotage de la courbe d'apprentissage	91
9.3.1	Le programme intégré de R&D et démonstration	91
9.3.2	Le groupe de pilotage de la filière	93
	Conclusion	96
	Annexes	98

Index des tableaux et figures

Figure 1: Représentation de la démarche adoptée et organisation du rapport	13
Figure 3: Représentation stylisée de la courbe d'apprentissage du système-pile	18
Tableau 1: Classification en groupes d'applications homogènes	20
Tableau 2: Associations technologies de pile / groupes d'applications	21
Figure 4: Diagramme des causalités entre vecteurs de synergies	23
Tableau 3: Intensité des synergies entre applications stationnaires	30
Tableau 4: Intensité des synergies entre applications stationnaires et transport	32
Tableau 5: Intensité des synergies entre applications portable et stationnaire	34
Tableau 6: Intensité des synergies entre applications portable et transport	34
Tableau 7: Intensité des synergies entre applications transport	35
Tableau 8: Synthèse des synergies entre technologies de systèmes-piles pour différents groupes d'applications	37
Figure 5: Un scénario de courbe d'apprentissage des systèmes-piles	43
Figure 6: Identification des fonctions de la structure de pilotage de la courbe d'apprentissage	46
Tableau 9: Tableau synthétique des initiatives publiques de soutien à la pile à combustible	48
Tableau synthétique des initiatives publiques de soutien à la pile à combustible (Suite)	49
Tableau 10: Performances-cibles du DOE pour pile 50kW à alimentation directe en H2	52
Tableau 11: Performances-cibles du DOE pour piles inférieures à 50We pour électronique portable	52
Tableau 12: Performances-cibles du DOE pour générateurs de puissance auxiliaires 3-5kW en moyenne, 5-10kW en crête	52
Tableau 13: Performances-cibles du véhicule hybride de la FreedomCAR and Fuel Initiative à l'horizon 2010	55
Tableau 14: Calendrier des <i>milestones</i> du programme FreedomCAR	56
Figure 6 : Nombre de projets labellisés et terminés par année au sein du réseau PACo	58
Figure 7 : Les aides attribuées par financeur et par année	58
Figure 8: Schéma de présentation du concept de pile ciblée par le programme SECA	60
Tableau 15: Performances-cibles du module multi-applications du programme SECA (3-10kW)	61
Figure 9 : Le tracé de l'autoroute de l'hydrogène de Vancouver	64
Tableau 16: Projets financés dans le cadre du programme des adhérents pionniers H2	67
Figure 10 : Les programmes de commercialisation des piles à combustible dans les Etats des Etats-Unis	68
Tableau 17 : Nombre de crédits ZEV alloués en fonction de l'énergie spécifique	70
Tableau 18 : Nombre de crédits ZEV alloués en fonction de l'autonomie du véhicule	70
Tableau 19 : Performances-cibles établies aux USA et en Europe	73
Tableau 20: Récapitulatifs des éléments de programmation dans les principaux pays engagés sur la PàC	75
Tableau 21 : Vision de la transition américaine vers l'économie de l'hydrogène	78
Tableau 22 : Les défis principaux de la conversion d'hydrogène par PàC	79
Tableau 23 : Les besoins principaux de la conversion d'hydrogène par PàC	79
Tableau 24 : Calendrier d'ensemble du plan d'action du DOE	80
Tableau 25 : Objectifs de la « Vision Britannique préliminaire »	81
Tableau 26 : Segmentation des technologies et marchés de la PàC	83
Figure 11 : Structure des groupes de travail de la FCCJ	87
Figure 12 : Représentation de la structure de pilotage fédérale allemande	89

Encadré 1 : Comparaison entre le programme « systèmes-piles Pan-H » et le programme intégré de R&D et démonstration	92
Figure 7 : Schéma de la structure de pilotage proposée	95
Tableau 27 : Verrous technologiques et voies de recherche pour le développement de piles PEMFC	108
Tableau 28 : Verrous technologiques et voies de recherche pour le développement de piles SOFC	110
Tableau 29 : Verrous technologiques et voies de recherche pour le développement de piles PCFC	111
Tableau 30 : Composition du Groupement De Recherche PACEM	114
Tableau 31: Performances-cibles européennes (SRA) à l'horizon 2015 pour APU (10kW)	117
Tableau 32: Performances-cibles européennes (SRA) à l'horizon 2015 pour véhicules individuels (100 kW)	117
Tableau 33: Performances-cibles européennes (SRA) pour petites piles pour applications mobiles (1kW)	117
Tableau 34: Performances-cibles européennes (SRA) à l'horizon 2015 pour applications stationnaires 1-10 kW	118
Tableau 35: Performances-cibles européennes (SRA) à l'horizon 2015 pour applications stationnaires 100 kW	118
Tableau 36: Performances-cibles du DOE pour pile 50kWe à alimentation directe en H2	119
Tableau 37: Performances-cibles du DOE pour piles inférieures à 50We pour électronique portable	119
Tableau 38: Performances-cibles du DOE pour générateurs de puissance auxiliaires 3-5kW en moyenne, 5-10kW en crête	119
Tableau 39: Performances-cibles européennes (SRA) à l'horizon 2015 pour APU (10kW)	120
Tableau 40: Performances-cibles européennes (SRA) à l'horizon 2015 pour véhicules individuels (100 kW)	120
Tableau 41: Performances-cibles européennes (SRA) pour petites piles pour applications transports (1kW)	120
Tableau 42: Performances-cibles européennes (SRA) à l'horizon 2015 pour applications stationnaires (1-10 kW)	121
Tableau 43: Performances-cibles européennes (SRA) à l'horizon 2015 pour applications stationnaires 100 kW	121
Figure 14: Carte des programmes de soutien à la PàC mis en place dans les lands allemands	123
Tableau 44: Caractéristiques des principaux programmes de soutien à la PàC mis en place dans les lands allemands	124
Tableau 45 : Tableau récapitulatif des initiatives publiques/privés étrangères dans le domaine de la PàC	126

Index des annexes

Annexe A	Glossaire	99
Annexe B	Bibliographie sommaire	100
Annexe C	Composition du comité de pilotage	101
Annexe D	Liste des personnes interviewées	101
Annexe E	Guide d'entretien indicatif	102
Annexe F	Les applications potentielles de la PàC	103
Annexe G	Avantages des PàC par groupes d'applications	105
Annexe H	Le système-pile, le cœur de pile et ses composants	106
Annexe I	Estimation des économies d'échelle	107
Annexe J	Verrous technologiques et voies de recherche pour le développement des PàC	108
Annexe K	Axes stratégiques du réseau PACo	112
K.1	Piles PEMFC :	112
K.2	Piles SOFC :	112
Annexe L	Principaux laboratoires CNRS menant des recherches sur les piles PEMFC	114
Annexe M	Performances-cibles européennes du Strategic Research Agenda	117
Annexe N	Les performances-cibles du DOE	119
Annexe O	Performances-cibles du SRA	120
Annexe P	Roadmap japonaise de la FCCJ	122
Annexe Q	Programmes allemands régionaux de soutien à la PàC	123
Annexe R	Benchmarking international des modes de coordination des sept fonctions de la courbe d'apprentissage	126
Annexe S	Les fondements de la stratégie de niches de marché	130
S.1	Le « strategic niche management »	130
S.2	Stratégie de niches de marché versus politiques technologiques « monolithiques »	131
S.3	Des structures de coordination de la stratégie de niche de marché toujours incertaines	132

REMERCIEMENTS

L'équipe de Technopolis France remercie François Perdrizet, Directeur de la DRAST, et Michel Muffat, Chargé de Mission à la DRAST, pour la confiance qu'ils nous ont accordée dans la réalisation de cette étude.

Nous tenons également à remercier sincèrement pour leur participation active les membres du Comité de Pilotage qui s'est réuni quatre fois de Décembre 2004 à Juin 2005 (la composition du comité est donnée en Annexe C).

Philippe Larrue remercie personnellement l'ensemble des personnes qui ont répondu à ces questions durant les entretiens (la liste des entretiens et le guide d'entretien sont donnés en Annexe D et Annexe E) ainsi que Noëlle Tassin qui nous a assisté dans le travail de cartographie des synergies.

Enfin, tous nos remerciements à Nelly Bruno et Aurélie Tricoire, respectivement stagiaire et doctorante CIFRE à Technopolis pour leur aide dans la finalisation du projet.

INTRODUCTION

Dans un contexte d'avancées importantes mais encore fragiles de la filière française de la Pile à Combustible (PàC) – tant en termes scientifiques et techniques, qu'industriels – et de forte concurrence internationale dans un domaine aux enjeux économiques, environnementaux et énergétiques très importants, la DRAST a initié en novembre 2004 une réflexion sur la stratégie de la France en matière de PàC. L'objectif de cette réflexion est de contribuer, au côté des initiatives françaises et européennes récentes – notamment le Plan d'Action Pan-H et la Stratégie de Déploiement de la Plateforme HFP – à l'élaboration de la stratégie de la filière française de la PàC dans un cadre européen.

Technopolis France a été chargé de mener cette réflexion en concertation avec les principaux acteurs de la filière PàC française. Les résultats de cette réflexion ont été soumis et discutés avec le comité de pilotage lors des principales étapes du projet¹.

1.1 Les stratégies françaises et européennes de niches de marché

Les stratégies françaises et européennes ont en commun de proposer une stratégie de développement et déploiement progressif de la PàC sur des générations d'applications de plus en plus contraignantes en termes de cahier des charges.

1.1.1 Le Plan d'Action Pan-H

En France, un groupe de travail constitué des acteurs publics et privés français de la PàC et coordonné depuis avril 2004 par le Ministère délégué à la Recherche a abouti en octobre de la même année à la formulation d'une stratégie de recherche, de développement technologique, d'innovation et de déploiement commune. Cette initiative, dite « Plan d'Action Pan-H », représente l'événement institutionnel le plus important dans la filière depuis la création du réseau PACo en 1999. Le Plan d'Action représente une nouvelle étape du soutien français à la PàC, s'appuyant en grande partie sur les résultats obtenus dans la recherche et l'industrie – et plus encore dans les rapprochements entre ces deux mondes auparavant trop cloisonnés – au sein des projets labellisés et financés par le réseau PACo.

Le Plan d'Action Pan-H repose sur une montée en puissance graduelle de la PàC sur différentes niches de marchés intermédiaires. Les activités de R&D ou de déploiement sur chaque niche contribuent à améliorer les générations de technologies suivantes par le biais de synergies, préparant les technologies de PàC pour l'application « véhicule individuel » – la plus prometteuse mais aussi la plus contraignante de toutes les applications potentielles de la pile – à l'horizon 2015. On peut lire dans le document Pan-H intégré au rapport produit par le groupe

¹ La composition du comité de pilotage est fournie en annexe. Le lecteur trouvera également en annexe la liste des personnes sollicitées à divers titres (entretiens, documents à compléter *etc.*) dans le cours de l'étude.

interministériel chargé de donner une suite opérationnelle au rapport Chambolle sur les nouvelles technologies de l'énergie :

« Le projet 'Systèmes pile' vise à développer, sur la période 2005-2010, une technologie centrée sur la pile à combustible PEMFC (proton exchange membrane fuel cell) compatible avec l'usage final automobile, considéré comme le plus prometteur à long terme, tout en favorisant le déploiement industriel de cette technologie dans des marchés de niche moins exigeants à plus court terme (applications stationnaires, résidentielles, tertiaires ; transports collectifs...) qui prépareront le marché automobile »².

1.1.2 La Stratégie de Déploiement de la Plateforme Européenne HFP

La Plateforme Européenne HFP (*Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform*) a été créée en janvier 2004 par la Commission Européenne suivant les recommandations émises en 2003 par le panel d'experts *High Level Group on hydrogen and fuel cells*³. L'objectif de cette structure de coordination est de faciliter et d'accélérer le développement et le déploiement de systèmes PàC dans des applications transport, stationnaire et portables.

La « *stratégie intégrée* » développée au sein de la Plateforme HFP repose sur la valorisation progressive et jusqu'en 2020 des synergies entre les différents marchés de la PàC. Ainsi, selon le document décrivant la Stratégie de Déploiement de la Plateforme Européenne :

« Regarding niche applications it is crucial from a deployment view that these applications are on a clear pathway for reaching the end goal of mass markets since a "niche - hopping" is not fostering the broad penetration of hydrogen and fuel cell technologies. Properly planned and thought through, the niche market applications may however constitute a strong enabler of technology consolidation, infrastructure build up, cost reduction, and public acceptance »⁴.

1.1.3 Le point commun entre les stratégies française et européenne

Le Plan d'Action français comme la Stratégie de Déploiement européenne proposent tous deux la mise en œuvre d'une stratégie reposant sur la coordination entre recherche, innovation et déploiement sur des niches de marchés intermédiaires. L'objectif est de préparer les technologies et marchés des PàC sur les premières générations d'applications, profitant de synergies pour atteindre les prochaines générations d'applications, jusqu'à l'application de la pile dans un véhicule individuel⁵.

² Pan-H, Oct. 2004, Document intégré au Rapport NTE, Chapitre 1, *Plan d'Action National sur l'Hydrogène et les PàC : PAN-H*.

³ Le groupe d'expert a été nommé par la Commission Européenne en octobre 2002 et les recommandations ont été formulées en 2003 dans le rapport intitulé « *Hydrogen Energy and Fuel Cells - A vision of our future* ».

⁴ The European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform, *Deployment Strategy*, Rapport Draft from the Steering Panel for the Advisory Council, 12nd December 2004.

⁵ Les fondements théoriques de la stratégie de niche de marché (*Strategic Niche Management*) sont rappelés en Annexe R.

Cette « stratégie progressive » se distingue notablement de la « stratégie de la rupture » reposant sur l'accomplissement d'une innovation radicale comme préalable à toute tentative de déploiement. Dans un contexte de raréfaction des réserves pétrolières et de problèmes environnementaux croissants, une telle stratégie est apparue nécessaire avec la prise de conscience des verrous technologiques restant à lever pour assurer le succès commercial de ces technologies. Suites aux anticipations positives largement partagées durant la seconde moitié des années 1990 – nourries par de réels progrès notamment en termes d'énergie massique et volumique – la « résistance » de certains paramètres comme la durabilité de la pile et son coût, constatée de plus en plus clairement au début des années 2000, a incité les acteurs de la filière à proposer un tel changement de stratégie.

1.2 Une étude en deux étapes

Le caractère novateur et ambitieux de cette stratégie implique que soit menée une réflexion exploratoire mais pragmatique sur la manière de la conduire. En effet, si cette stratégie ne peut que séduire « sur le papier », son succès est loin d'être garanti quand il s'agit de la mettre en pratique. La réussite de cette stratégie repose notamment sur la valorisation de synergies entre les différentes générations de piles pour différentes applications.

1.2.1 Les deux conditions de succès d'une stratégie de niche de marché

Cette valorisation des synergies est soumise à deux conditions :

- L'existence de synergies potentielles sur lesquelles il est possible de s'appuyer pour maximiser les chances de succès et accélérer le développement et le déploiement de la PàC ;
- La mise en place de modes de coordination spécifiques permettant de réaliser ces synergies potentielles.

La réflexion proposée s'articule autour de ses deux conditions – respectivement d'existence et de valorisation – des synergies :

- La première partie de l'étude a pour objectif d'établir une cartographie des synergies potentielles entre technologies de piles pour différentes applications.
- Sur la base de cette cartographie, la seconde partie développe une analyse fonctionnelle permettant d'identifier les modes de coordination et de soutien public pertinents à mettre en place pour valoriser les synergies.

1.2.2 Le point de départ des deux parties : une analyse des cahiers des charges technologiques et fonctionnels

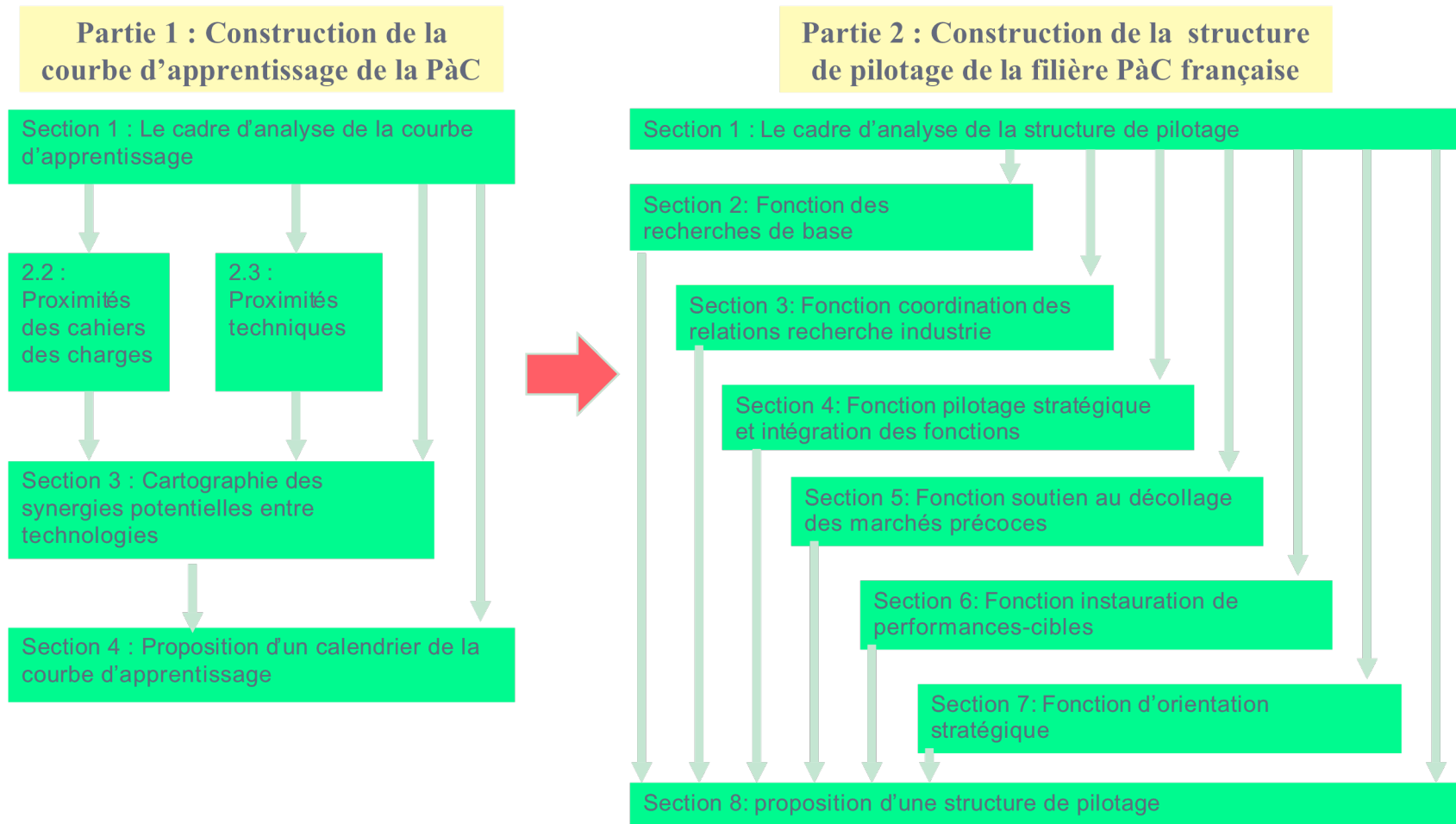
Ces deux parties ont en commun d'adopter une démarche nouvelle consistant à partir des cahiers des charges – respectivement technologiques et fonctionnels – pour proposer des activités et modes de coordination de ces activités permettant de satisfaire les besoins identifiés. Le raisonnement habituel, qui part des activités et organisations en place pour déterminer les besoins qu'il sera possible de satisfaire à différents horizons temporels est ici inversé.

Ainsi, la première débute par une analyse des cahiers des charges associés aux principaux groupes d'applications afin d'identifier les technologies de systèmes-piles

à développer et les synergies potentielles entre ces technologies. Ceci permet d'aboutir, au final, à un calendrier possible de succession des générations de systèmes-piles et à une priorisation des verrous technologiques associés à ces technologies.

La seconde partie débute par une explicitation du cahier des charges fonctionnel que la structure de pilotage à mettre en place doit satisfaire pour valoriser les synergies potentielles identifiées dans la première partie. À partir de ces fonctions élémentaires à assurer, complétées et confirmées par les attentes des acteurs et une revue des expériences étrangères en la matière, l'objectif est de proposer, une organisation pertinente de la filière PàC française.

Figure 1: Représentation de la démarche adoptée et organisation du rapport



PARTIE 1 : CONSTRUCTION DE LA COURBE D'APPRENTISSAGE DE LA PILE A COMBUSTIBLE

L'enjeu de cette première partie est de recueillir des informations et opinions permettant de « tracer » la courbe d'apprentissage de la pile sur les différentes applications, jusqu'à atteindre les performances demandées par l'application « véhicule individuel ». Les questions centrales sont les suivantes : quels sont les déterminants qui définissent l'existence et l'intensité des synergies? Entre quelles applications et quelles technologies existe-il des synergies potentielles? Quel calendrier réaliste et pertinent d'enchaînement des applications et technologies de piles peut-on proposer sur la base des verrous technologiques à lever le long de cette courbe d'apprentissage ?

Les entretiens avec les experts rencontrés ont montré le fort intérêt suscité par ces questions. Ils ont également révélé leur complexité et leur nouveauté, conférant à la démarche poursuivie un caractère exploratoire. Il ne s'agit donc pas d'apporter des réponses définitives à ces questions en fournissant une courbe d'apprentissage « prête à l'emploi ». Il s'agit avant tout de fournir un cadre de réflexion stratégique et de discussion avec les acteurs de la filière en avançant une vision de l'évolution possible des technologies et des marchés des systèmes-piles.

1 Le cadre d'analyse de la courbe d'apprentissage

La construction de la courbe d'apprentissage des systèmes-piles nécessite la mise en place préalable d'un cadre d'analyse spécifique. Ce cadre opérationnel a servi de trame pour les investigations empiriques.

1.1 La courbe d'apprentissage des systèmes-piles

Les synergies sont un élément clé mais peu étudié des courbes d'apprentissage qui sous-tendent les stratégies de niche de marché proposées aussi bien en France qu'au niveau européen.

1.1.1 Les synergies au cœur de la courbe d'apprentissage

Le terme de synergie désigne une économie de moyens et/ou un rendement supérieur résultant de la mise en commun de plusieurs actions concourant à un effet unique. Il s'agit dans le cas qui nous intéresse de profiter des activités de développement et déploiement des piles sur une première génération d'applications – une niche de marché – pour favoriser le développement et déploiement des piles sur une ou plusieurs autres applications contemporaines ou futures.

Ce concept, s'il est souvent employé dans la littérature et dans le processus décisionnel (pour justifier des choix technologiques, des opérations industrielles de fusion et acquisition...), fait rarement l'objet d'une réflexion approfondie. Ainsi, la

nature et l'intensité des synergies entre différentes applications de la PàC de même que les actions et structures à mettre en place pour les exploiter, condition *sine qua non* de la réussite de la stratégie de niche de marché, sont encore largement passées sous silence.

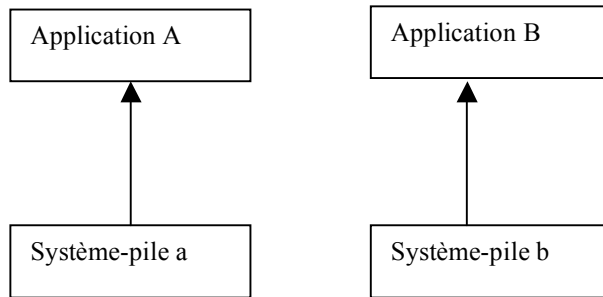
Une réflexion préliminaire permet d'avancer que les synergies entre technologies pour différentes applications agissent de deux manières.

En synchronique, le développement et/ou l'utilisation de piles pour une application peut profiter à une ou plusieurs applications contemporaines de la première. On distingue deux types de synergies synchroniques selon qu'elles soient valorisées dans la production de la pile ou dans son usage:

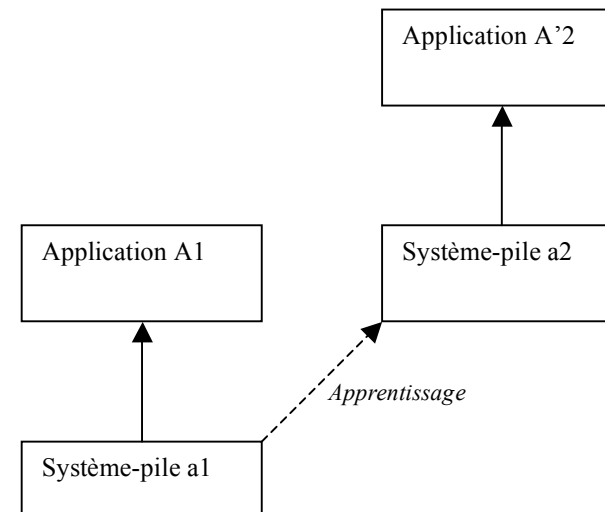
- Synergies provenant de l'utilisation d'un même dispositif technique (*i.e.* système-pile ou composants) pour deux applications différentes. C'est le cas par exemple des piles permettant de satisfaire à la fois certaines applications stationnaires et transports (encore au stade de la recherche). Ce type de synergie repose sur l'usage de modules ou composants standardisés, permettant des économies d'échelle et d'apprentissage.
- Synergies provenant d'une connexion directe entre deux applications d'un système pile. Certains évoquent par exemple la possibilité de voitures à PàC qui deviendraient à l'arrêt des générateurs électriques pour divers usages (voire pour produire et revendre sur le réseau...). Ou encore d'un couplage distribution d'hydrogène / production d'électricité par le biais de stations services hydrogène pour véhicules à PàC qui serviraient également de stations de production décentralisée d'électricité grâce à des piles stationnaires de grande capacité. Ces synergies, très futuristes et vendeuses auprès du grand public, s'inscrivent dans la perspective de l'avènement de « l'économie de l'hydrogène ».

Figure 2 : Représentation des différents types de synergies

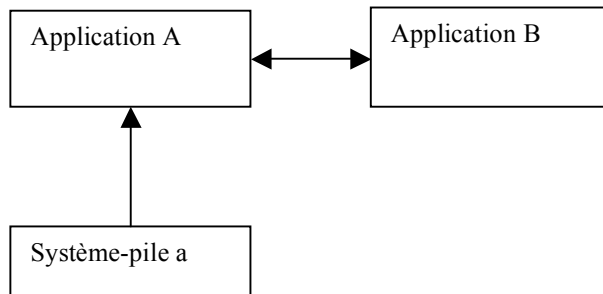
Aucune synergie



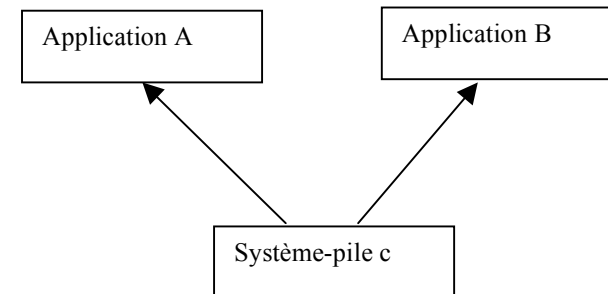
Synergie diachronique



*Synergie synchronique
valorisée dans l'usage*



*Synergie synchronique
valorisée dans la production*



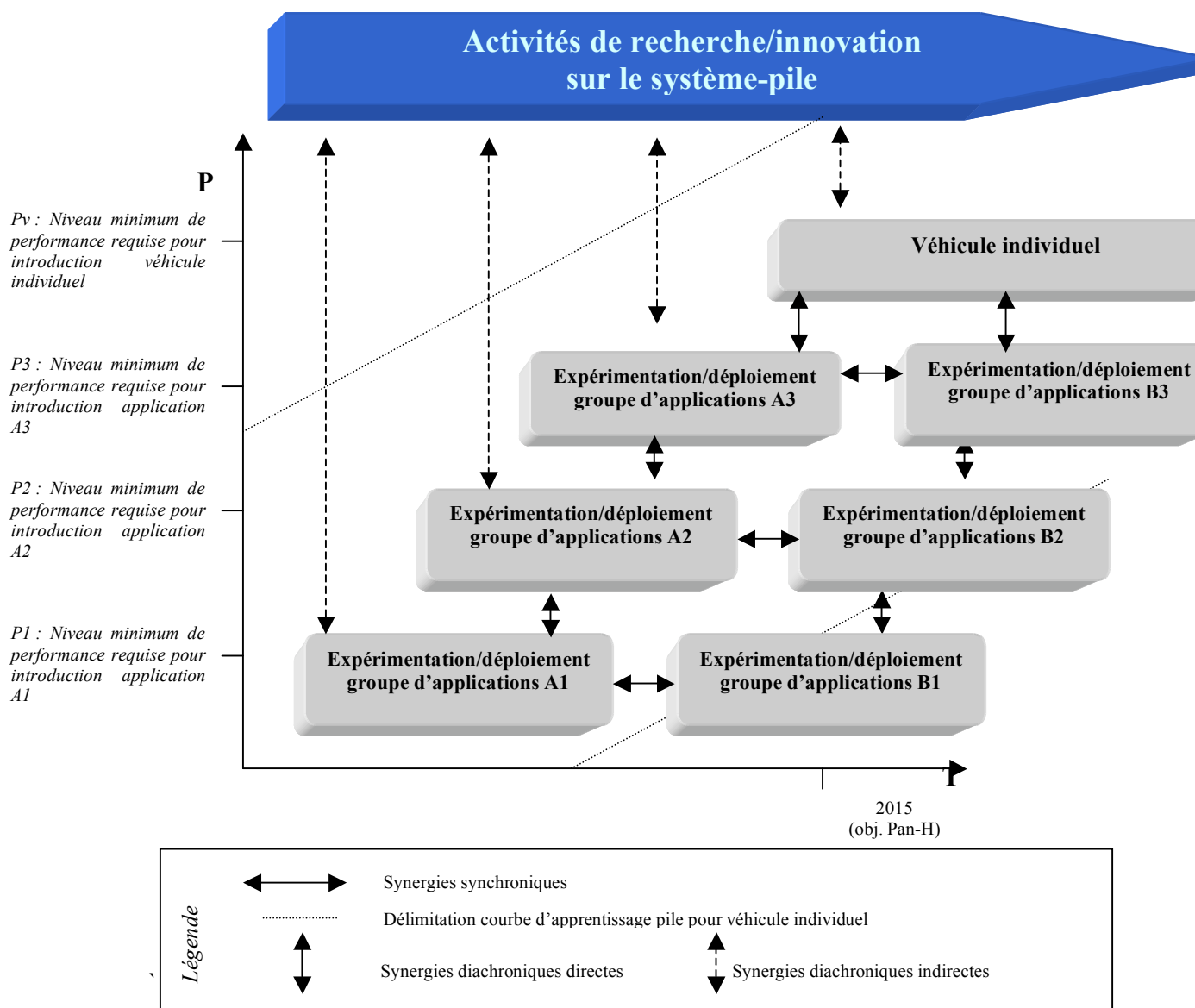
En diachronique le développement et/ou l'utilisation de piles pour une application peut profiter à une ou plusieurs générations d'applications ultérieures. Ces synergies transitent principalement par les connaissances accumulées dans la R&D et le déploiement des premières générations de systèmes-piles (levée progressive des verrous technologiques, économies d'apprentissage du côté de l'offre comme de la demande). Selon cette stratégie, l'accumulation des connaissances et la baisse des coûts issue de l'usage des premières générations de systèmes-piles sur des niches de marché moins contraignantes permet d'atteindre des niveaux de performances plus élevés. Ces progrès résultent notamment des améliorations techniques issues de l'expérimentation et du déploiement des piles sur les niches intermédiaires via des retours d'expérience vers les activités de R&D (synergies diachroniques « indirectes ») ainsi que par la baisse des prix provenant de l'usage de composants et matériaux communs ou par un accroissement de l'acceptabilité de la technologie (synergies diachroniques « directes »). Les niveaux de performances des piles de « seconde génération » satisfont des applications plus exigeantes qui elles-mêmes permettront des apprentissages et des économies d'échelle, synonymes de progrès technologiques et de baisse supplémentaire des coûts⁶. Ces avancées par paliers successifs doivent permettre progressivement aux technologies de piles d'atteindre les performances requises par l'application la plus contraignante, à savoir le véhicule individuel.

1.1.2 Représentation de la courbe d'apprentissage

La stratégie de niche de marché proposée dans le plan d'action PAN-H et dans la stratégie de déploiement européenne peut être représentée sur un diagramme à deux axes (*cf.* Figure 2) : un axe P de performances des piles, représentant un indice synthétique des différents arbitrages possibles entre critère de performances (puissance, durée de vie, coûts, *etc.*) et un axe T temporel, d'aujourd'hui à 2015.

⁶ La Stratégie de Déploiement européenne emploie le terme de « *synergistic pathway* » pour évoquer cette trajectoire d'amélioration progressive de la pile jusqu'au véhicule individuel (IHP, 2004, p. 21).

Figure 3: Représentation stylisée de de la courbe d'apprentissage du système-pile⁷



⁷ Par souci d'homogénéité, la terminologie du plan d'action PAN-H est reprise dans ce rapport: « système-pile », « recherche/innovation », « technologie/système » et « expérimentation/déploiement ».

1.2 L'unité élémentaire de l'analyse : les groupes d'applications homogènes

Avant de s'intéresser aux synergies entre systèmes-piles pour différents types d'applications, il est nécessaire de former des groupes représentant des applications homogènes en termes de technologies sous-jacentes. Ainsi au sein d'un même groupe d'applications, les systèmes-piles commercialisés pour ces applications sont identiques (ou sont des gammes dérivées très proches) et les marchés acceptent des coûts proches. Les systèmes-piles développés sont par contre différents (design, arbitrage entre performances) pour deux groupes d'applications ainsi définis. Bien que la plupart des technologies de piles pour ces applications ne soient pas encore disponibles, il est évident qu'une multitude de systèmes différents seront développés pour répondre aux différents cahiers des charges.

1.2.1 Méthodologie de formation des groupes

Le recensement de l'ensemble des applications potentielles de la PàC est le point de départ de la définition de groupes d'applications homogènes.

A partir de cette liste dressée au moyen de recherches sur Internet et d'une revue de la littérature, des groupes d'applications homogènes ont été identifiés sur la base de :

- Leur gamme de puissance : ce critère de « taille » de la pile est déterminant. L'électrochimie de base (par exemple sur les plaques bipolaires) de même que la gestion du système (Balance Of Plant, BOP par la suite) ne sont pas les mêmes pour les petites piles et les grandes piles. De plus, il n'est possible que dans une certaine limite d'assembler des petites piles pour monter en puissance. Des indivisibilités existent, ne permettant qu'une modularité réduite.
- Leur profil d'utilisation respectif : deux applications nécessitant une gamme de puissance identique ne requièrent que rarement des arbitrages entre performances identiques (coûts, durée, etc.). Ceci différencie notamment les piles stationnaires des piles automobiles, mais également – au sein même des applications stationnaires – les piles qui seront utilisées pour la cogénération des autres piles (la température de fonctionnement est là déterminante pour sélectionner les technologies de systèmes-piles pertinents).

1.2.2 Les groupes d'applications de la pile à combustible

La classification qui résulte de ces regroupements est proposée dans le Tableau 1. Cette classification, qui peut encore évoluer, a été amendée et validée par les experts rencontrés.

Tableau 1: Classification en groupes d'applications homogènes

Groupes d'applications		Applications
(A1) Portable (de 1W à 100W)		<ul style="list-style-type: none"> • Electronique portable (téléphones, ordinateurs,...) • Signalisations routières • Générateurs portables récréatifs • Générateurs portables commerciaux • Générateurs portables militaires
Stationnaire	(A2) Petit/moyen stationnaire pour groupe électrogène et alimentation sites isolés (1 à 50kW)	<ul style="list-style-type: none"> • Générateurs pour groupes de secours • Générateurs pour régulation qualité courant • Générateur principal hors réseau/sites isolés
	(A3) Petit/moyen stationnaire pour résidentiel et petits commerces en cogénération (1 à 50kW)	<ul style="list-style-type: none"> • Maisons individuelles • Petits bâtiments publics et commerciaux • Équipements de télécommunication • Petits logements récréatifs (cabanon,...) • Bâtiments et équipements comme ci-dessus, de plus grande superficie
	(A4) Grand stationnaire pour cogénération (>150kW)	<ul style="list-style-type: none"> • Hôpitaux • Usines de traitement • Sites industriels et résidentiels lointains • Stockage saisonnier et restitution d'H2 en couplage avec EnR • Cogénération de forte puissance (Gaz Naturel, biomasse, biogaz) • Valorisation de l'H2 fatal sur site industriel
	(A5) Production décentralisée d'électricité (>500kW)	<ul style="list-style-type: none"> • Production décentralisée d'électricité à haut rendement • Applications militaires
Transport	(A6) Générateur auxiliaire de puissance (GAP) (2kW à 1MW))	<ul style="list-style-type: none"> • GAP pour tous types de véhicules légers et lourds, pour avions, bateaux • Unité de réfrigération pour camions frigorifiques
	(A7) Petites piles transports (<25kW)	<ul style="list-style-type: none"> • Véhicules industriels (monte-charges, ...) pour aéroports, véhicule récréatif (voiture de golf, véhicule de voisinage,...) • Générateurs de traction pour véhicules à moteur deux temps • Piles pour véhicules hybrides PàC/batterie parallèle • Piles pour véhicules hybrides PàC/batterie série et <i>Range extender</i>⁸ • Véhicules pour personnes handicapées • Véhicules pour déplacement dans espaces protégés
	(A8) Véhicule collectif Véhicule lourd (>150kW)	<ul style="list-style-type: none"> • Bus • Véhicules militaires (transports de troupes,...) • Sous-marins • Bateaux de transport • Camions • Locomotives
	(A9) Véhicule individuel (>80-120kW)	<ul style="list-style-type: none"> • Véhicules légers pour flottes captives • Véhicules légers individuels • Bateaux de plaisance

Note : les gammes de puissance sont indicatives et peuvent ne pas être pertinentes pour l'ensemble des applications comprises dans un groupe

⁸

Dans la configuration *range extender* la pile est utilisée pour charger les batteries d'un système de propulsion électrique. Il s'agit donc d'un système de propulsion hybride série pile/batterie. Le terme de Générateur Auxiliaire de Puissance (GAP) dans ce rapport est réservé aux systèmes-piles alimentant les besoins en énergie non liés à la propulsion du véhicule. Dans un système de propulsion hybride parallèle pile/batterie, le générateur et la pile sont tous les deux reliés au moteur électrique.

1.3 Associations préliminaires entre technologies de pile et groupes d'applications

Du fait de leur homogénéité, les applications au sein d'un même groupe sont susceptibles de voir leurs cahiers des charges remplis par le même type de technologies. Une première proposition d'associations technologies de pile / groupes d'applications est présentée dans le Tableau 2 sur la base des entretiens et d'une revue de la littérature.

Les technologies de piles telle que les PCFC (Protonic Ceramic Fuel Cell) ou SAFC (Solid Acids Fuel Cell), issues de filières nouvelles dont les principes scientifiques et matériaux de base sont encore sujet à des recherches, ne sont pas incluses dans le tableau. En l'état actuel des connaissances elles ne peuvent être associées à quelques applications que ce soit et il est peu probable que ces technologies soient développées dans les 10 ans.

Tableau 2: Associations technologies de pile / groupes d'applications

Groupes d'applications	Technologies de piles susceptibles de satisfaire cette application	
	Moyen terme (dans les 5 ans environ)	Long terme (dans les 10 ans)
Portable (>100W)	<ul style="list-style-type: none"> DMFC PEMFC basse température H2 direct 	<ul style="list-style-type: none"> DMFC DEFC PEMFC basse température H2 direct
Petit/moyen stationnaire pour groupe électrogène et alimentation sites isolés (<50kW)	<ul style="list-style-type: none"> PEMFC basse température température, H2 direct 	<ul style="list-style-type: none"> PEMFC basse température température, H2 direct PEMFC haute température (si couplage avec énergie renouvel.)
Petit/moyen stationnaire pour résidentiel et petits commerces en cogénération (50kW)	<ul style="list-style-type: none"> SOFC reformeur externe gaz naturel 	<ul style="list-style-type: none"> SOFC « basse température », reformage interne gaz naturel PEMFC haute température, reformeur externe gaz naturel
Grand stationnaire pour cogénération (>150kW)	<ul style="list-style-type: none"> SOFC MCFC PAFC 	<ul style="list-style-type: none"> SOFC PEMFC haute température, reformeur gaz naturel
Production décentralisée d'électricité	<ul style="list-style-type: none"> SOFC MCFC PAFC 	<ul style="list-style-type: none"> SOFC « basse température »a très haut rendement, reformeur gaz naturel
Auxiliaires de puissance (<25kW)	<ul style="list-style-type: none"> SOFC 	<ul style="list-style-type: none"> SOFC « basse température » reformage interne PEMFC direct H2
Petites piles transports (<25kW)	<ul style="list-style-type: none"> PEMFC basse température (combustible ?) 	<ul style="list-style-type: none"> PEMFC
Véhicule collectif Véhicule lourd (>150kW)	<ul style="list-style-type: none"> PEMFC 	<ul style="list-style-type: none"> PEMFC PEMFC haute température SOFC
Véhicule individuel (>80-120kW)	<ul style="list-style-type: none"> PEMFC basse température 	<ul style="list-style-type: none"> PEMFC haute température avec reformer PEMFC haute température H2 direct

2 Les déterminants des synergies

Cette section a pour objet d'identifier et d'analyser les facteurs qui déterminent l'existence et l'intensité des synergies entre technologies de systèmes-piles pour différents groupes d'applications.

En d'autres termes, la question qui est ici posée est la suivante : comment et pourquoi le développement et/ou déploiement d'une technologie de systèmes-piles peut-elle influencer sur les possibilités de développement et/ou déploiement d'une autre technologie de systèmes-piles ?

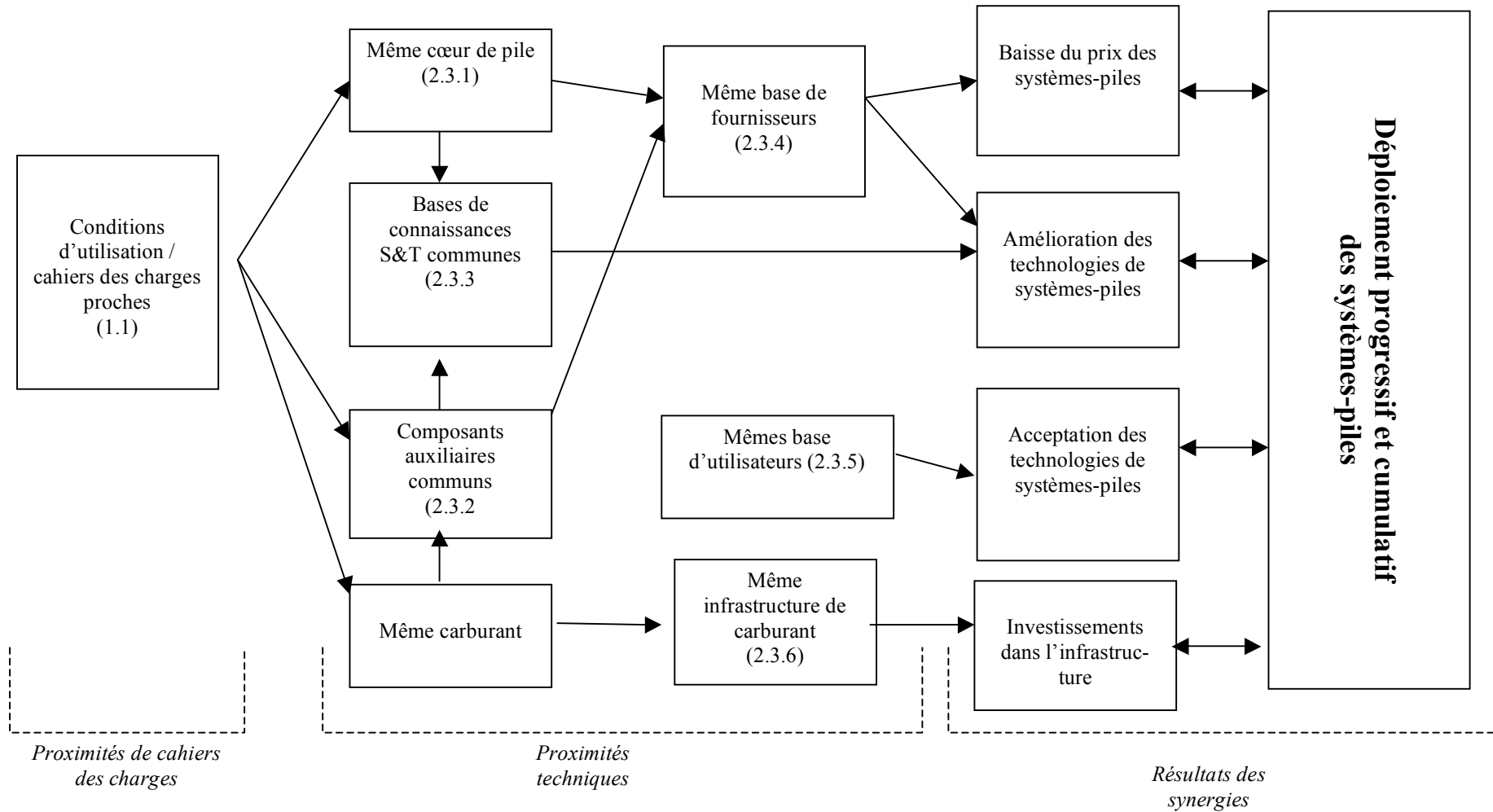
2.1 Les proximités comme déterminant principal des synergies

Deux technologies pour des applications différentes sont dites proches si elles ont des profils d'utilisation semblables, partagent une même base de connaissances scientifiques et techniques, utilisent des composants ou matériaux identiques, ont une même base de fournisseurs ou d'utilisateurs ou encore une même infrastructure de distribution de carburant.

Ces proximités permettent des synergies se matérialisant par des progrès technologiques cumulatifs, des économies d'échelle et de variété se traduisant par des baisses de prix, d'investissements collectifs dans l'infrastructure...

La Figure 4 permet d'établir que les synergies dépendent des proximités entre technologies de systèmes-piles pour différentes applications. On distingue les proximités des cahiers des charges (2.1) des proximités techniques (2.3).

Figure 4: Diagramme des causalités entre vecteurs de synergies



Note : Les flèches indiquent une causalité. Elles doivent ainsi se lire comme « implique... ».

2.2 Les proximités des cahiers des charges

Les proximités de profils d'utilisation entre des technologies de systèmes-piles pour des applications différentes fixent les proximités entre applications. Elles déterminent en quelques sortes la topologie de l'espace des technologies et applications de PàC. Ce paragraphe identifie les critères déterminants des cahiers des charges des différentes applications.

2.2.1 Les applications portables

Les *densités de puissance massique et volumiques*, gages de faible poids et d'encombrement sont bien sûr parmi les premiers critères de sélection des technologies de système-pile. La demande en termes de puissance et d'énergie des appareils électroniques augmentent rapidement avec l'ajout de fonctions nouvelles (écrans, lecture de musique, etc.).

Le *combustible utilisable*, sans reformage possible, est la variable fondamentale qui justifie que la plupart des grands groupes de l'électronique aient choisis la technologie DMFC permettant d'utiliser directement le méthanol sans reformeur, plus facile à stocker que l'hydrogène.

La *température de fonctionnement*, nécessairement basse dans des dispositifs maniés par les individus dans des conditions très diverses et ne pouvant de plus être couplé à un système de gestion thermique trop encombrant et complexe, renforce le choix de la DMFC.

2.2.2 Les applications stationnaires

Les usages stationnaires offrent un large éventail d'applications des PàC. Ces applications sont à la fois nombreuses et très diverses en termes de cahiers des charges. A cette diversité de cahiers des charges correspond une diversité des technologies envisagées pour y répondre (PEMFC, PAFC, MCFC, SOFC).

Les principales variables différenciant les cahiers des charges des applications sont la gamme de puissance, la température de fonctionnement, le fonctionnement en continu ou ponctuel, le combustible et enfin le coût acceptable.

La *gamme de puissance* est le premier axe qui différencie les divers usages de la pile, du « petit stationnaire » (générateurs auxiliaires) au « grand stationnaire » (production décentralisée).

La *température de fonctionnement* détermine en grande partie la possibilité de cogénération. Ainsi les piles SOFC à haute température semblent particulièrement adaptées à cet usage. Les quelques retours d'expérience dont on dispose sur l'usage de piles PEMFC en cogénération montre que leur température de fonctionnement – aux environs de 60° actuellement – ne leur permet pas une rentabilité suffisante. La montée en température de la PEM motive donc un volume important de recherche dans cette perspective.

L'*usage de la pile en continu ou ponctuel* est un autre facteur de diversité dans les cahiers des charges à ne pas négliger. Les cycles thermiques et d'humidification liés aux démarrages et arrêt de la pile sont un facteur important de limitation de la durée et de la fiabilité des piles. De plus le fonctionnement en base permet d'augmenter l'efficacité énergétique de la pile.

Le *combustible* à partir duquel est produit l'hydrogène (si la pile n'est pas alimentée directement en hydrogène) a une influence importante non seulement sur les technologies de reformer mais également sur celles des piles car les AME sont plus ou moins tolérantes aux impuretés contenues dans l'hydrogène reformé. Les piles à haute température, SOFC et PEMFC HT, sont moins sensibles à la pollution au monoxyde de carbone.

La dernière variable transversale – mais non la moindre – est le *coût acceptable*. Celui-ci dépend de la valeur ajoutée du service fourni par la pile (gain environnemental, fiabilité de la fourniture d'énergie, valorisation de la chaleur, *etc.*) et du coût des technologies alternatives à la pile, qu'elles soient déjà en place ou potentielles. Il existe ainsi quelques niches d'applications stationnaires à forte valeur ajoutée (domaine spatial-défense, activités tertiaires sensibles aux micro-coupures d'électricité et variations de courant).

2.2.3 Les applications transports

Les piles pour applications transport s'étalent sur une gamme de puissance moins étendue que les applications stationnaires. Elles sont également plus continues en termes de cahiers des charges, si l'on excepte les auxiliaires de puissance qui sont spécifiques. De fait, les technologies de piles susceptibles de satisfaire les applications transport sont moins nombreuses et convergent vers la PEMFC. Seules les auxiliaires de puissance génèrent des recherches sur les SOFC.

Une des variables fondamentales est la possibilité de proposer des solutions compactes et de faible poids, ayant des *densités de puissances massique et volumique* élevées.

Notamment pour les applications de transport individuel, le *coût acceptable*, le plus faible de toutes les applications envisageables de la pile, est également essentiel du fait de la concurrence des véhicules à combustion interne. Avec l'augmentation inéluctable du prix du pétrole – et en l'absence de modes de propulsion alternatif – le coût acceptable de la pile pourrait cependant s'élever dans le futur.

Comme pour les applications stationnaires, *l'usage de la pile en continu ou ponctuel* joue un rôle important dans la détermination de la technologie adaptée à chaque application. Ainsi les générateurs auxiliaires de puissance et les piles pour véhicule hybride série fonctionnant avec de faible variation de régime ne nécessiteront pas des designs de piles aussi résistants que ceux nécessités par les véhicules individuels « tout-pile ».

La *température de fonctionnement* de la pile distinguera sans doute des types de piles pour applications transport. La nécessité de fonctionner à une température plus élevées pour les applications transports tient à la plus grande résistance des

catalyseurs à la pollution par les impuretés et le monoxyde de carbone, ce qui est le cas si l'hydrogène est obtenu par reformage. La plupart des constructeurs automobiles ont abandonné la solution du reformeur embarqué, Renault restant aujourd'hui un des seuls constructeurs automobiles impliqués officiellement dans les recherches sur les reformers. L'autre raison tient à ce que la membrane doit pouvoir supporter des températures supérieures à 80° (limite des membranes perfluorées de type Nafion développées par DuPont) afin de permettre un échange thermique suffisant avec le circuit de refroidissement automobile usuel. La variable déterminante ici est la différence de température de fonctionnement de la pile et celle du liquide de refroidissement entrant dans la pile. Une différence de 10 ou 20° seulement est jugée insuffisante⁹. Enfin, le fonctionnement à température plus élevée permet également de relâcher la contrainte d'humidification de la membrane.

Enfin, le *combustible* distingue les applications privilégiant le reformage embarqué sur le stockage de l'hydrogène. Les SOFC qui pourraient à terme offrir la possibilité de reformage interne de l'essence ou du diesel sont pour le moment envisagés plus favorablement que la PEMFC pour des applications telles que les générateurs auxiliaires.

2.3 Les vecteurs de synergies

Les proximités de cahiers des charges déterminent en très grande partie les types de synergies pouvant s'instaurer entre applications et les « vecteurs » par lesquels ces synergies transitent.

2.3.1 Synergies provenant du partage d'un même cœur de pile

Le cœur de pile est le lieu de la réaction électrochimique combinant l'hydrogène à l'anode et l'oxygène à la cathode pour produire l'électricité et la chaleur. Cet élément est donc essentiel pour déterminer non seulement les caractéristiques directement liées à la fourniture d'électricité (densité de puissances volumique et massique notamment) mais également la durabilité et cyclabilité du fait de la fragilité et faible tolérance des membranes polymères actuelles.

Cependant, le calage des performances des systèmes-piles sur les applications par un développeur se fait encore aujourd'hui en grande partie par le choix des applications accessibles aux technologies actuelles. La variable d'ajustement est donc plus l'application que la conception des systèmes-piles. Ce choix des applications, outre les variables tenant aux anticipations de marché et positionnement stratégique propres à chaque développeur, tient à la recherche d'applications moins contraignantes sur les « points durs ». La cyclabilité par exemple figure en bonne place parmi ces points durs car les AME résistent mal aux cycles thermiques. C'est pourquoi les premières niches visées sont souvent des applications à faible nombre de démarrage/arrêt. C'est le cas des groupes de secours ou des piles fonctionnant en base. C'est également un des avantages de l'utilisation de la pile dans des véhicules hybrides où le couplage avec une batterie permet d'absorber une grande partie des appels de puissance.

⁹ Les experts rencontrés ne sont pas d'accord sur la température nécessaire.

Rappelons également qu'il est encore très difficile de caler précisément des AME sur des cahiers des charges précis¹⁰. Le paramétrage et la garantie des performances délivrées, quant cela est possible, se fait généralement au détriment des coûts. Les performances des membranes seules et/ou des AME fournies par les polyméristes américains (Gore, Dow, 3M) ne sont que grossièrement spécifiées et ne sont pas garanties.

2.3.2 Synergies provenant du partage de mêmes composants du système

Si une grande partie de l'attention se focalise sur l'AME, la gestion du système apparaît également essentielle quant à la durabilité, la cyclabilité et les conditions d'opération de la pile¹¹. Les premiers retours d'expérience, encore limités, ont montré que les défaillances des systèmes-piles testés, bien que s'exerçant sur l'AME, n'étaient pas liées à l'électrochimie de base des AME mais souvent aux composants de gestion thermique, atmosphérique ou hydraulique du système qui conditionnent le fonctionnement de l'AME. Le BoP apparaît donc également comme une variable clé du paramétrage des performances du système-pile.

Les composants des systèmes-piles, permettant en grande partie leur adaptation à leur environnement (H₂, air/O₂, température), sont le plus souvent spécifiques aux groupes d'applications. Il n'est donc pas évident que de fortes économies d'échelle soient à attendre.

2.3.3 Synergies provenant du partage d'une même base de connaissances scientifiques et technologiques

Les synergies peuvent transiter par les connaissances scientifiques (science des matériaux, compréhension des processus électrochimiques de base, dynamiques des fluides, *etc.*) si les technologies de systèmes-piles partagent une base de connaissances scientifiques commune (on parle alors de proximité scientifique). Les synergies sont à ce niveau fondamental fortes par nature du fait du caractère générique de ces connaissances. Les technologies de piles s'appuient sur les mêmes éléments de compréhension des mécanismes de base. La spécification des connaissances sous-jacentes aux différents systèmes-piles s'effectue plus en aval (cf. connaissances technologiques).

Cependant, des différences importantes séparent les communautés travaillant sur les technologies PEMFC et SOFC, comme en témoigne l'existence distincte de deux groupements de recherche au sein du CNRS¹² :

- le Groupement De Recherche PACEM
- le Groupement De Recherche ITSOFC

¹⁰ C'est le cas par exemple des systèmes-piles pour applications aérospatiales dont la très grande fiabilité s'acquière à un prix très élevé (augmentation de la teneur en platine par exemple) qui n'est pas accessible aux autres applications.

¹¹ Une représentation d'un système-pile est fournie en Annexe H.

¹² Il nous a été confirmé que ces deux GDR ont peu d'interactions scientifiques, si ce n'est au sein d'un groupe de travail animé par C. Lamy du Programme Energie. Ceci ne signifie évidemment pas que les chercheurs des deux groupes ne coopèrent pas dans certains cas mais qu'il n'y a pas de coordination des activités des deux groupes. La composition de ces deux GDR est donnée en annexes.

Des systèmes-piles peuvent également partager des connaissances technologiques, relatives par exemple à l'ingénierie, l'intégration et la gestion du système (BOP), les techniques de production ou encore les performances de la technologie en condition d'usage réel (constitution de base de données répertoriant les informations issues de l'expérimentation/déploiement, par exemple concernant la durabilité en conditions d'usage réel). Ces connaissances sont plus spécifiques que les connaissances scientifiques, mais des synergies sont à attendre dans les procédures de gestion du système, de réglage du BoP, même si le design du système est différent. Les apprentissages issus des essais et erreurs peuvent être riches d'enseignement pour plusieurs designs différents.

Concernant l'usage de matériaux communs, il est nécessaire de souligner que des baisses de prix consécutives à une augmentation des volumes demandés sont peu probables dans le cas de matériaux précieux (platine notamment).

2.3.4 Synergies provenant du partage d'une même base de fournisseurs

Des technologies de systèmes-piles peuvent être interdépendantes du fait qu'elles ont des acteurs industriels en commun. Par exemple, la mise en application d'une première génération de piles peut permettre la survie – et dans le meilleur des cas la croissance – des acteurs existants jusqu'à l'application véhicule individuel. En France, deux PME (Axane et Hélion) sont susceptibles de contribuer au développement de la pile française, ce qui semble intéresser autant les constructeurs automobiles (pour des questions stratégiques) que les pouvoirs publics (pour des questions de compétitivité, d'emplois etc.). La stratégie de niche de marché élaborée par Pan-H a en partie pour objectif de permettre à ces entreprises de se développer et de progressivement améliorer leur offre, en attendant le décollage de marchés de masse.

Plus que la survie des industriels en place, les premières générations de piles peuvent attirer de nouveaux acteurs dans l'industrie en démontrant que les piles sont une réalité et non un simple objet de laboratoire. Des acteurs industriels essentiels, comme par exemple Saint-Gobain, sont encore en position d'attente. Leur engagement, suscité par le constat du développement de marchés préliminaires de la PàC, pourrait être un atout pour le développement de la filière française.

2.3.5 Synergies provenant du partage d'une même base d'utilisateurs

Les synergies peuvent également transiter par les connaissances et la légitimité issues de l'application de premières génération de technologies si elles partagent une même base d'utilisateurs. Ces synergies se manifestent par :

- L'accroissement des connaissances des caractéristiques et potentiels des différents marchés (segmentation, cahiers des charges, volumes, prix limite et élasticité)
- La découverte de nouveaux usages dans des industries connexes
- L'amélioration de l'acceptabilité et la légitimité de la technologie. Les pouvoirs publics anglo-saxons insistent beaucoup sur cette condition (« *awareness* ») du développement des marchés de la PàC.
- La révision et actualisation des codes et standards permettant un usage sûr des systèmes-piles sans que les réglementations en vigueur freinent leur déploiement.

2.3.6 Synergies provenant du partage d'une même infrastructure de fourniture de carburant

Enfin il existe également des synergies dues au partage d'une infrastructure de fourniture de carburant. Dans ce cas, les investissements dans l'installation de l'infrastructure de distribution pour une application profite à l'autre application. Ceci concerne principalement l'application véhicule individuel. Les applications stationnaires, notamment la cogénération résidentielle, s'appuieront sur l'infrastructure existante de distribution de gaz naturel.

Le même argument vaut également pour les investissements dans l'installation de l'infrastructure de production du carburant, en particulier l'hydrogène.

3 Identification des synergies entre groupes d'applications

Une cartographie des synergies entre groupes d'applications est dressée sur la base d'entretiens avec des industriels et scientifiques du domaine et d'une revue de la littérature. Cette cartographie a également fait l'objet d'un travail de contrôle qualité avec une experte de la PàC, Mme Noëlle Tassin¹³.

3.1 Synergies entre applications stationnaires

Les synergies entre différentes applications stationnaires sont *a priori* limitées par la diversité des cahiers des charges requis et la coexistence de deux options, les piles PEMFC et SOFC, entre lesquelles très peu de synergies sont à attendre.

Des synergies peuvent être raisonnablement attendues entre les piles pour système de cogénération sur différentes gammes de puissance, correspondant aux différents types de logements individuels et collectifs, de même que les locaux industriels et tertiaires. Remarquons cependant que du fait des configurations socio-économiques, énergétiques et météorologiques très différentes selon les pays, il n'est pas certain que les mêmes piles soient utilisables sur les divers marchés nationaux (Nomura Research).

Enfin, il est possible que les piles pour production décentralisée d'électricité soient proches des systèmes pour co-génération si elles utilisent des piles à haute température SOFC ou MCFC.

¹³ Noëlle Tassin a été responsable de laboratoire à la SORAPEC de 1991 à 2004. La SORAPEC, société de recherche en électrochimie fermée en 2004, a produit plusieurs AME et cœurs de pile PEMFC (quelques centaines de W à quelques kW). Elle a participé à plusieurs projets PACo, notamment avec Renault.

Tableau 3: Intensité des synergies entre applications stationnaires

	(A3) Petit/moyen stationnaire pour cogénération (50kW)	(A4) Grand stationnaire pour cogénération (>150kW)	(A5) Production décentralisée d'électricité
(A2) Petit/moyen stationnaire pour groupe électro. et sites isolés (<50kW)	CC : A3 plus contraignant sur cycles thermiques, haute température et coûts S&T : Synergies technologiques faibles sur EME si A3 PEMEFC HT, nulle si SOFC A2 important pour acceptabilité et démonstration des PEMFC stationnaires	CC : A4 plus contraignant sur cycles thermiques, haute température et coûts. Taille très différente S&T Synergies technologiques très faibles Clients différents, effet mutuel sur acceptabilité faible	CC : Taille très différente, synergie faible S&T Synergies technologiques faibles Clients différents, effet mutuel sur acceptabilité faible
(A3) Petit/moyen stationnaire pour cogénération (50kW)		CC : proches S&T synergie dépendra de possibilité éco d'échelle malgré différence de puissance Acceptabilité de la pile (démonstration pile cogénération)	CC : différent, taille, usage, modèle économique S&T Synergies technologiques très fortes (mêmes technologies, différentes puissances)
(A4) Grand stationnaire pour cogénération (>150kW)			CC : incertain S&T : forte synergie si A5 pile haute température Synergie sur attractivité ou concurrence pour production d'électricité dépendra des stratégies industrielles

CC : proximité des cahiers des charges

S&T : proximités scientifiques et techniques

3.2 Synergie entre applications stationnaires et transport

- Les deux applications les plus prometteuses en termes de volume et de gains environnementaux (le véhicule individuel et la cogénération résidentielle) partagent – pour des raisons différentes – une même technologie, encore aujourd’hui dans les laboratoires : les PEMFC à haute température. Rappelons cependant qu’aucun développeur de membranes n’a encore prouvé les performances de membranes haute température. Diverses voies sont explorées.
- Des synergies sont également à attendre entre petites piles stationnaires pour générateurs de secours et petites piles transport et ou GAP, comme l’indique les auteurs de la stratégie de déploiement européenne.

Une voie possible pour accroître les synergies repose sur la mise au point de modules standardisés capables de satisfaire plusieurs applications différentes. FEBUSS¹⁴, SECA (cf encadré 1). Cependant, la pertinence de ce type de projet ne fait pas l’unanimité. Les avis sont très partagés parmi les personnes rencontrées : pour certains les cahiers des charges respectifs des applications stationnaires et transports sont trop différents pour permettre des compromis valorisables sur les deux types d’applications.

Plus généralement, il existe deux approches du développement de piles pour le stationnaire :

- Une approche autonome, où les piles pour applications stationnaires sont développées spécifiquement pour ces marchés, notamment celui de la micro-cogénération. Les inconvénients se comptent en coût d’opportunité du fait de la non-exploitation de synergies potentielles. Les avantages proviennent du développement de solutions technologiques spécifiques pour un marché très important et aux gains environnementaux sensibles dans le futur¹⁵.
- Une approche « synergétique » où l’on sélectionne au sein des projets de R&D sur les piles stationnaires, celles qui seraient valorisables dans les applications transports par la suite. Cette option peut entraîner un moindre développement des marchés stationnaires du fait de solutions techniques moins adaptées au cahier des charges spécifiques du stationnaire. Les marchés de niche dans le stationnaire, plus aisés à satisfaire et plus proches des applications transports en termes de technologies sous-jacentes, sont dans ce cas privilégiés au détriment des piles pour le véritable marché de masse du stationnaire, celui de la micro-cogénération pour logement résidentiel.

¹⁴ FEBUSS est un projet européen sur 5 ans visant le développement d’un module standardisé multiclients de 100kW pour applications stationnaires et transports (avec un coût de 300€/kW). Le fournisseur de la pile est le français Axane.

¹⁵ L’éventualité et la temporalité des gains environnementaux obtenus par la production décentralisée d’électricité sont fortement déterminés par les hypothèses sous-jacentes concernant l’évolution du mix-énergétique français. Si on retient les scénarii du Rapport Charpin-Pellat-Dessus du Commissariat Général au Plan concernant l’évolution de la part du nucléaire dans le mix-énergétique, des gains environnementaux pourraient être non négligeables à partir de 2012/2013. En 2050, la part du nucléaire pourrait descendre à 50% (estimation EDF).

Tableau 4: Intensité des synergies entre applications stationnaires et transport

	(A6) Auxiliaires de puissance	(A7) Petites piles transport (<25kW)	(A8) Véhicule collectif / lourd (>150kW)	(A9) Véhicule individuel (>80-120kW)
(A2) Petit/moyen stationnaire pour groupe électro. et sites isolés (<50kW)	CC : différents S&T Synergies technologiques nulles si A6 SOFC	CC : différents S&T Synergies technologiques moyennes à forte	CC : très différents S&T Synergies technologiques moyennes PEMFC	CC : très différents, température S&T Synergies technologiques faibles
(A3) Petit/moyen stationnaire pour cogénération (50kW)	CC : combustibles différents S&T Synergies technologiques fortes si SOFC (cf. prog SECA)	CC : combustibles différents S&T Synergies technologiques faibles	CC : combustibles différents S&T Synergies technologiques fortes si SOFC (cf. prog SECA)	CC : fortes contraintes sur coûts pour A3 et A9 mais durabilité A3>A9, cyclabilité et compacité A9>A3 S&T Synergies technologiques fortes sur AME PEMFC HT Même base clients, effet mutuel sur acceptabilité fort
(A4) Grand stationnaire pour cogénération (>150kW)	Synergies nulles	Synergies nulles	Synergies nulles	Synergies nulles
(A5) Production décentralisée d'électricité	Synergies nulles ?	Synergies nulles ?	Synergies nulles ?	Synergies nulles ?

CC : proximité des cahiers des charges
S&T : proximités scientifiques et techniques

3.3 Synergie entre applications portables et les applications stationnaires et transports

Des synergies technologiques entre les applications portables et les autres applications de la PàC (stationnaires et transports) porteront essentiellement sur les connaissances scientifiques et techniques nécessaires au développement de l'AME car les systèmes-piles pour applications portables sont le plus souvent plus simples que ceux pour les applications stationnaires et, plus encore, transports. Les systèmes conçus par PaxiTech par exemple n'ont ni compresseur, ni convertisseur, ni humidificateur.

Bien que les cahiers des charges et gamme de puissance soient très différents, des synergies au niveau de l'AME sont à attendre sur les procédés de production et de recyclage à grande échelle. Le déploiement des PàC sur les applications portables permettra également de mieux comprendre le comportement des performances de l'AME – notamment en ce qui concerne la durée de vie qui ne peut toujours pas être certifiée – en fonction des matériaux et options de design afin de caler précisément les AME sur le cahier des charges spécifique à chaque application. La base de fournisseurs des composants de l'AME (membranes, plaques bipolaires, catalyseurs) pour applications de faible ou très faible puissance est déjà relativement diversifiée, ce qui permet de tester en usage réel des spécifications différentes. Il s'agit donc sur ces applications portables de développer une compréhension plus systématique du design des AME, un élément essentiel du système-pile qui reste encore trop souvent une boîte noire dont le calage sur les cahiers des charges se fait par essais et erreurs.

Des apprentissages sont également à attendre sur l'utilisation de combustible et la pollution des AME par les impuretés de l'hydrogène reformé. Les premières applications portables seront sans doute sur des marchés professionnels pour lesquels l'usage d'hydrogène pur ne pose pas de problème. Au fur et à mesure de l'amélioration de la résistance des AME à la pollution, notamment par le monoxyde de carbone, de l'hydrogène « moins pur », possiblement reformé sur place, pourra être envisageable. Cette question reste un enjeu important pour assurer le déploiement de la PàC sur l'application cogénération résidentielle par exemple qui nécessitera un reformage du gaz naturel.

Au niveau du système-pile, des synergies potentielles très importantes entre les applications portables et les autres applications des PàC porteront sur l'acceptabilité des piles auprès des particuliers. L'utilisation des PàC dans les dispositifs électroniques portables permettra aux PàC de pénétrer le quotidien des consommateurs qui seront alors plus réceptifs et ouverts à l'utilisation des piles pour remplacer leur chaudière ou encore leur moteur thermique...

Tableau 5: Intensité des synergies entre applications portable et stationnaire

	(A2) Petit/moyen stationnaire pour groupe électro. et sites isolés (≤50kW)	(A3) Petit/moyen stationnaire pour cogénération (50kW)	A4) Grand stationnaire pour cogénération (>150kW)	(A5) Production décentralisée d'électricité
(A1) Portable (>100W)	CC : différents S&T Synergies technologiques fortes sur AME (> 10W), connaissances techniques production de masse sur PEMFC BT Effet introduction A1 sur acceptabilité A3 très important	CC : très différents (température) S&T Synergies technologiques très faibles sur PEMFC HT (AME et composants différents) Bases clients identiques, effets positifs de A1 sur attractivité A3	CC : très différents (température, taille) S&T Synergies technologiques nulles Bases clients différentes	CC : très différents S&T Synergies technologiques nulles Bases clients différentes

CC : proximité des cahiers des charges

S&T : proximités scientifiques et techniques

Tableau 6: Intensité des synergies entre applications portable et transport

	(A6) Auxiliaires de puissance	(A7) Petites piles (≤25kW)	(A8) Véhicule collectif / lourd (>150kW)	(A9) Véhicule individuel (>80-120kW)
(A1) Portable (>100W)	CC : très différents S&T Synergies technologiques nulles Effet introduction A1 sur acceptabilité A3 très important	CC : très différents S&T Synergies technologiques nulles Effet introduction A1 sur acceptabilité A3 très important	CC : très différents S&T Synergies technologiques nulles	CC : très différents S&T Synergies technologiques nulles Effet introduction A1 sur acceptabilité A3 très important

CC : proximité des cahiers des charges

S&T : proximités scientifiques et techniques

3.4 Synergies entre applications transport

Le véhicule hybride (batterie/PàC) permet, par augmentation progressive du taux d'hybridation, de débiter avec des piles de petites puissances, peu sollicitées et dont le coût a un moindre impact sur le coût total du véhicule et le volume sur le design du véhicule. Cette stratégie est en France poursuivie par PSA. L'objectif est d'apprendre sur les petites piles version *range extender* (aux environs de 8kW) concernant notamment leur durabilité, leur fonctionnement, et d'améliorer progressivement la technique¹⁶. Notons que la frontière entre les véhicules tout-électrique ou tout-thermique et les véhicules hybrides s'estompe car du fait de la croissance de l'intérêt suscités par les systèmes de freins régénératifs et de l'augmentation des besoins en énergie embarqué (pour l'électronique de bord). Ces deux tendances plaident pour des batteries relativement puissantes sur les prochaines générations de véhicules, couplées avec la source d'énergie principale, que ce soit un véhicule thermique ou à PàC. La

¹⁶ PSA se dit également intéressé par les applications pleines puissances car de toute façon « la technologie est la même ».

question essentielle n'est donc plus tant « véhicule hybride ou tout-électrique ? » mais bien « quel taux d'hybridation ? ».

Les synergies seront sans doute fortes entre les piles pour petits véhicules et les auxiliaires de puissance, à la différence que les premières devront avoir une capacité de réponse rapide aux appels de puissance, alors que les secondes pourront fonctionner à régime plus régulier.

Tableau 7: Intensité des synergies entre applications transport

	(A7) Petites piles transports (<25kW)	(A8) Véhicule collectif / lourd (>150kW)	(A9) Véhicule individuel (>80-120kW)
(A6) Auxiliaires de puissance (<25kW)	CC : incertain S&T Synergies technologiques nulles si A6 SOFC, moyennes à fortes si A6 PEMFC Synergie sur acceptabilité de la pile continuum/ <i>scale-up</i> de solutions A6-A7	CC : Différents : durée de vie, compacité, masse, coût, combustible S&T Synergies technologiques nulles si A6 SOFC Synergies faibles si A6 PEMFC M	CC : incertain S&T Synergies technologiques nulles si A6 SOFC Si A6 PEMFC, continuum/ <i>scale-up</i> de solutions A6-A7 ?
(A7) Petites piles transports (<25kW)		CC : Différents : durée de vie, compacité, masse, coût, combustible S&T Synergies technologiques faibles	CC : incertain S&T Synergies technologiques fortes (AME, intégration véhicule, BOP, ...) Acceptabilité de la pile continuum/ <i>scale-up</i> de solutions A7-A9
(A8) Véhicule collectif / lourd (>150kW)			CC : relativement différents : durée de vie, compacité, masse, coût. Même combustible ? S&T Synergies technologiques moyennes à fortes (possibilité. utilisation même module de base) Synergie sur acceptabilité de la pile si introduction dans transport collectif

CC : proximité des cahiers des charges
S&T : proximités scientifiques et techniques

Enfin, bien qu'ils appartiennent à un même groupe dans notre classification, les piles pour véhicules hybrides et piles pour petits véhicules relèvent de marchés distincts desquels des synergies très fortes sont à attendre, pouvant aller jusqu'à l'utilisation des mêmes modules de piles.

3.5 Résumé des résultats de la cartographie

Une synthèse des principaux résultats de la cartographie est proposée dans le Tableau 8.

Cette cartographie a fait apparaître des synergies potentielles significatives entre les groupes d'applications suivants :

- entre petites piles stationnaires et petites piles transports dans les premières générations de technologies de piles.
- entre petites piles transports et piles pour véhicules hybrides : les première piles pour véhicules faiblement hybridées pourront être proches des piles pour les applications transports de première générations, c'est à dire pour des véhicules encore très peu exigeants.
- entre piles pour véhicules hybrides et piles pour véhicules individuels : dans une perspective dynamique, il s'agit ici d'améliorer les technologies de systèmes-piles pour véhicules faiblement hybridés et d'augmenter progressivement le taux d'hybridation
- entre piles pour cogénération et piles pour véhicules individuels : il s'agit là d'exploiter les synergies entre les deux applications des systèmes-piles les plus exigeantes en termes de performances comme de coûts.

Les synergies entre GAP et petites piles transports ou piles pour hybrides restent très incertaines, du fait de l'incertitude sur la technologie de piles qui satisfera l'application GAP (SOFC ?).

Tableau 8: Synthèse des synergies entre technologies de systèmes-piles pour différents groupes d'applications

	(A2) Petit/moyen stationnaire pour groupe électro. et sites isolés	(A3) Petit/moyen stationnaire pour cogénération	(A4) Grand stationnaire pour cogénération	(A5) Production décentralisée d'électricité	(A6) Auxiliaires de puissance	(A7) Petites piles transport	A8) Véhicule collectif / lourd	(A9) Véhicule individuel
(A1) Piles pour élec portable	CC : Ø S&T : ✓ A/M : ✓✓	CC : ØØ S&T : ✓ A/M : ✓✓	CC : ØØØ S&T : ØØ A/M : ØØ	CC : ØØØ S&T : ØØ A/M : ØØ	CC : ØØØ S&T : ØØ A/M : ✓✓	CC : ØØØ S&T : ✓ A/M : ✓✓	CC : ØØØ S&T : Ø A/M : Ø	CC : ØØØ S&T : ✓ A/M : ✓✓
(A2) Petit/moyen stationnaire	CC : ✓✓✓ S&T : ✓✓✓ A/M : ✓✓✓	CC : Ø S&T : Ø A/M : ✓✓	CC : ØØ S&T : Ø A/M : Ø	CC : ØØ S&T : Ø A/M : Ø	CC : ØØ S&T : ØØ A/M : ✓✓	CC : ✓✓ S&T : ✓✓ A/M : ✓✓	CC : Ø S&T : Ø A/M : Ø	CC : ØØ S&T : Ø A/M : ✓✓
(A3) Petit/moyen stationnaire pour cogénération			CC : ✓ S&T : ✓ A/M : ✓	CC : Ø S&T : Ø A/M : ✓	CC : Ø S&T : ? A/M : ✓✓	CC : ØØ S&T : Ø A/M : ✓✓	CC : Ø S&T : ✓ A/M : ✓	CC : Ø S&T : ✓✓ A/M : ✓✓
(A4) Grand stationnaire pour cogénération				CC : ✓ S&T : ✓✓ A/M : ✓✓	CC : ØØ S&T : ? A/M : ØØ	CC : ØØ S&T : Ø A/M : ØØ	CC : Ø S&T : ? A/M : ØØ	CC : ØØ S&T : ✓ A/M : ØØ
(A5) Production décentralisée d'électricité					CC : ØØ S&T : ? A/M : ØØ	CC : ØØ S&T : ? A/M : ØØ	CC : Ø S&T : ? A/M : ØØ	CC : ØØ S&T : ? A/M : ØØ
(A6) Auxiliaires de puissance						CC : ✓✓ S&T : ? A/M : ✓✓✓	CC : Ø S&T : ? A/M : ✓✓	CC : S&T : ? A/M : ✓✓✓
(A7) Petites piles transport							CC : ✓ S&T : ✓ A/M : ✓✓	CC : ✓✓ S&T : ✓✓ A/M : ✓✓✓
A8) Véhicule collectif / lourd								CC : ✓ S&T : ✓✓ A/M : ✓✓

CC : proximité cahiers des charges

S&T : proximités technologiques

A/M : synergies par acceptabilité et marché

Intensité des synergies potentielles : Ø Ø Ø nulles Ø Ø très faibles Ø faibles ✓ moyennes ✓✓ fortes ✓✓✓ très fortes

Encadré en vert: synergies entre applications stationnaires (cf. section 4.2.1) Encadré en rouge : synergies entre applications transports (cf. section 4.2.2)

Encadré en bleu: synergies entre applications transports et stationnaires (cf. section 4.2.3)

4 Proposition d'un calendrier de la courbe d'apprentissage

La dernière étape permettant de tracer la courbe d'apprentissage consiste à intégrer les résultats de la cartographie – jusque-là statique – sur un axe temporel. En utilisant la cartographie des synergies permettant de positionner les systèmes-piles les uns par rapport aux autres et en considérant les verrous à lever pour identifier l'ordre de succession des différentes générations de technologies, il est possible maintenant de construire la courbe d'apprentissage.

Cette courbe d'apprentissage est à prendre comme un scénario possible, celui correspondant à un développement progressif et synergétique des technologies de piles. Bien qu'il repose sur l'argumentation développée précédemment, ce scénario inclue des hypothèses fortes concernant les technologies mais également les stratégies qui seront poursuivies par les acteurs publics et privés de la filière¹⁷. L'objet est ici d'avancer une proposition concrète et précise pour susciter des réactions et discussions avec les acteurs de la filière.

4.1 Détermination de l'ordre de succession des générations de systèmes-piles

S'il n'est pas possible de déterminer des dates possibles d'introduction, un ordre de succession des différentes générations de systèmes-piles peut être proposé en considérant les verrous technologiques qui doivent être levés pour que ces technologies satisfassent les cahiers des charges des différentes applications. Selon cette perspective, l'ordre d'introduction possible des différentes générations de piles sur les diverses applications dépend de l'exigence de leurs cahiers des charges respectifs par rapport à l'état de l'art de la technique à un moment donné¹⁸.

4.1.1 Les verrous de la « durabilité » et de la « cyclabilité » des systèmes-piles

La durabilité reste un des problèmes persistants des systèmes-piles. Ni les 5 000 heures de durabilité en usage transport sur les quelques expériences effectuées, ni les 40 000 heures en usage stationnaire, n'ont été à ce jour atteints d'après les informations disponibles.

Des applications jusqu'à 10 000 ou 20 000 heures doivent donc être privilégiées pour les applications stationnaires. Ceci invalide donc les applications de cogénération résidentielle pour les premières générations de piles introduites.

Les applications transport exerçant des sollicitations très exigeantes sur les piles, le verrou de la durabilité des systèmes-piles doit être lié à celui de leur cyclabilité. Plus les cycles sont exigeants, plus la durabilité est réduite du fait des chocs thermiques et des cycles d'humidification de la membrane.

¹⁷ Un de ces hypothèses étant que les systèmes-piles se développeront d'abord sur des gammes de puissance peu élevées. La grande cogénération n'est ainsi pas incluse dans le scénario proposée.

¹⁸ Un recensement plus précis des verrous affectant les technologies de systèmes-piles est fourni en Annexe J sur la base du premier appel à proposition Pan-HS.

Les applications où la pile est utilisée à régime constant ou avec des variations faibles doivent donc être privilégiées, notamment pour les piles pour véhicules « faiblement hybridés ». Dans ce cas, couplée à une batterie, le système-pile ne répond pas directement à l'ensemble des appels de puissance. Le nombre d'heure de fonctionnement effectif est également moins élevé que dans le cas d'un véhicule individuel.

Enfin, les applications transports pour des véhicules industriels présentent aussi l'avantage d'imposer des cycles moins exigeants.

4.1.2 Le verrou de l'infrastructure de distribution de carburant¹⁹

L'infrastructure de distribution d'hydrogène n'étant pas disponible en France – et quasi-inexistante dans les autres pays sauf quelques expériences au Canada, en Scandinavie et au Japon – le déploiement des véhicules à PàC individuels est impossible. Le déploiement progressif et coordonné de l'infrastructure et des technologies de véhicule est également peu probable, chacune des deux industries attendant de l'autre qu'elle investisse massivement en premier.

Il est donc nécessaire de privilégier des applications transport ne nécessitant qu'une infrastructure limitée, notamment les applications de flottes captives dans les services publics et quelques grandes entreprises.

Pour les applications stationnaires, l'infrastructure de distribution est moins cruciale du fait non seulement de la non mobilité des piles mais également de la possibilité de s'appuyer sur l'infrastructure de distribution de gaz naturel pour les applications dans les foyers.

4.1.3 Le verrou du coût des systèmes-piles

Pour des raisons évidentes de coûts, les premières générations de systèmes-piles disponibles seront des piles de taille modeste quel que soit le type d'application. Les services fournis par les systèmes-piles (énergie, gain environnemental) n'étant pas encore assez valorisée pour leur permettre d'être introduite sur des applications à gamme de puissance élevée²⁰.

Dans les applications transports, l'entrée devra se faire par le « bas » de la gamme de puissance pour abaisser le prix d'acquisition du véhicule qui sera encore dans les prochaines décennies l'élément essentiel de comparaison avec le véhicule thermique. Tout d'abord, le calcul du coût d'usage sur l'ensemble du cycle de vie, qui pourrait justifier économiquement le surcoût à l'achat, n'est en effet pas encore entré dans les mœurs des acheteurs individuels. De plus, le comportement des acheteurs individuels en réaction à la montée du prix du pétrole est encore incertain.

¹⁹ Les verrous tenant à l'infrastructure de production d'hydrogène n'entrant pas dans le cadre de l'étude, ils ne sont pas abordés ici.

²⁰ La valeur ajoutée est évidemment conditionnée par la valorisation des gains environnementaux de la pile (et réciproquement, des dommages engendrés par les systèmes en place reposant sur le pétrole). Nous faisons l'hypothèse qu'une taxe environnementale ou une subvention assez importante pour compenser les différences de coûts actuels ne sera pas instaurée dans la décennie à venir.

Dans les applications stationnaires, le bilan économique de la pile reste incertain sur la plupart des applications où la pile est en concurrence avec des systèmes énergétiques existants. C'est le cas notamment des applications de cogénération résidentielle en France où le prix de l'électricité produite grâce au nucléaire réduit fortement la fenêtre d'opportunité pour la PàC. L'introduction de la PàC devrait donc privilégier des applications où la pile :

- n'est pas en concurrence frontale avec d'autres systèmes énergétiques existants (c'est-à-dire préférentiellement des sites isolés, non connectés au réseau)
- offre une valeur ajoutée élevée, comme c'est le cas pour les applications UPS dans des activités de service haut de gamme (banque, finance, informatique)

4.2 Proposition de calendrier

Sur la base des synergies identifiées entre groupes d'applications et des verrous associés à ces applications, un calendrier d'introduction des différentes générations de technologies de systèmes-piles PEMFC est proposé (Figure 5). Trois grands axes de développement synergétique sous-tendent ce scénario : un axe de synergies entre systèmes-piles pour applications stationnaires (encadré en vert dans la Tableau 8), un axe de synergies entre systèmes-piles pour applications transports (encadré en rouge dans la Tableau 8) et un axe de synergies entre systèmes-piles pour applications stationnaires et transports (encadré en bleu dans la Tableau 8).

4.2.1 Un axe de synergies entre systèmes-piles pour applications stationnaires

Il a déjà été précisé que les différents groupes d'applications stationnaires présentent une large gamme de profils d'utilisation différents (taille des systèmes, température des systèmes selon les besoins en co-génération). Il est probable que des technologies de piles différentes (PEMFC, SOFC mais également peut être MCFC ou PAFC) permettront de satisfaire ces groupes d'applications. Les synergies attendues entre groupes d'applications stationnaires sont par conséquent le plus souvent faibles. Elles sont également soumises à de fortes incertitudes. L'analyse de ces synergies devront être actualisées pour intégrer les progrès accomplis dans les connaissances de ces applications (notamment en ce qui concerne les applications de « grand stationnaire » dont les caractéristiques restent à déterminer).

Cependant, rappelons qu'il s'agit ici de synergies entre groupes d'applications. Des synergies sont également à attendre au sein d'un même groupe, notamment au sein du groupe des petites piles stationnaires qui inclut une multitude d'applications pouvant représenter, toutes ensemble, un volume de marché assez important pour initier le démarrage de la courbe d'apprentissage.

Il demeure que ces applications ne motiveront sans doute pas à elles seules des investissements en R&D suffisants pour un développement autonome de ces technologies. Elles devront par conséquent être liées aux marchés des applications transports selon des modalités qui restent à déterminer (*cf.* partie II). Des programmes de démonstrations, subventions et commandes publiques devront également soutenir le développement et déploiement de ces piles stationnaires.

4.2.2 Un axe de synergies entre systèmes-piles pour applications transports

Les premières piles transports sont appliquées sur des petits véhicules industriels, récréatifs et à environnement contrôlé (hôpitaux, ...) qui ne sont pas vendus à des particuliers. Leur cycle d'usage est simple et ne nécessite pas de performances élevées. Leur coût par kW est élevé mais le coût d'achat reste soutenable du fait de leur faible puissance et de leurs clients exclusivement industriels et publics et d'aides publiques dans le cadre de programmes de tests.

Les véhicules se déploient ensuite par relâchement de certaines contraintes du fait des progrès technologiques et des économies d'échelle. Les premiers véhicules particuliers sont déployés sur des versions faiblement hybridées (comme c'est le cas actuellement pour les véhicules électriques à batterie). L'utilisation de batteries avancées comme source d'énergie principale les réserve à un usage exclusivement intra-urbain. Les retours d'expérience sur ces véhicules permettent d'élever progressivement le taux d'hybridation en intégrant des piles de plus forte puissance, permettant ainsi une autonomie supérieure au véhicule qui accède ainsi au péri-urbain. Les premières générations de véhicules sont utilisées au sein de flottes captives de grandes entreprises et de services publics.

Les performances croissantes des véhicules et le développement de l'infrastructure de distribution par des industriels qui investissent massivement, offre un marché plus large, ce qui se traduit par des économies d'échelle. Le cercle vertueux entre baisse des coûts, croissance du marché et progrès technologique est engagé, aboutissant finalement aux premières générations de véhicules individuels.

4.2.3 Un axe de synergies entre systèmes-piles pour applications stationnaires et transports

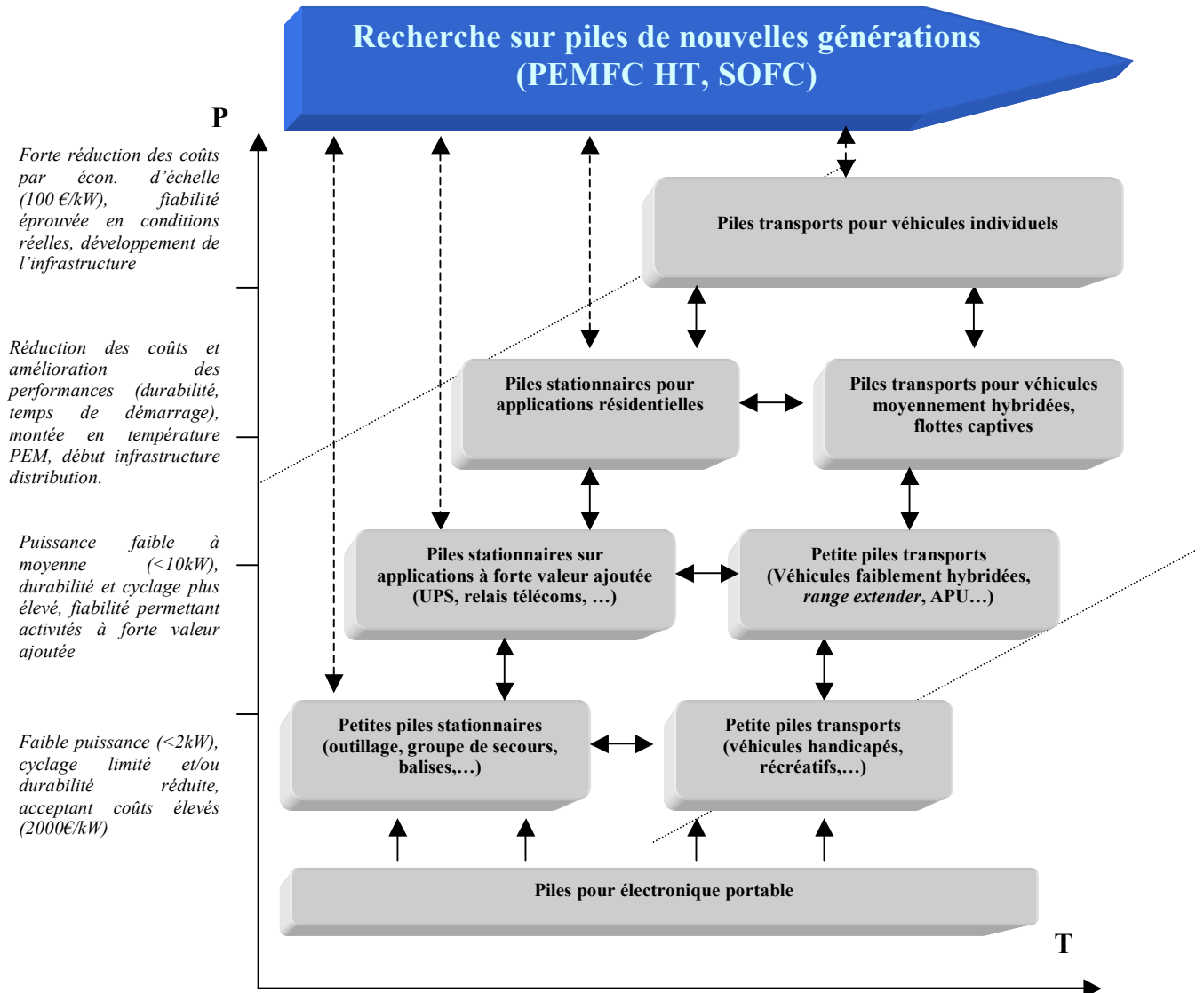
Les systèmes-piles peinent à trouver des applications précoces dans les transports, très exigeants en termes de coûts et de performances, en dehors d'expériences de démonstrations ponctuelles et limitées (quelques dizaines de véhicules). Les applications stationnaires permettent d'introduire des systèmes-piles relativement peu coûteux dont les retours d'expérience profitent aux premières générations de piles transports. Ces marchés précoces des systèmes-piles stationnaires sont très divers bien que peu volumineux acceptent des coûts élevés, de l'ordre de 2000 €/kW.

Les synergies sont technologiques avec les premières générations de véhicules aux cahiers des charges encore peu exigeants (véhicules aux performances très réduites, pour personnes handicapés, véhicules récréatifs, véhicules de voisinage, etc). Elles permettent également aux premiers acteurs engagés dans le développement de systèmes-piles de survivre, croître et améliorer leur offre en attendant des marchés plus volumineux.

Les générations de piles pour les applications transports suivantes étant plus complexes (on passe aux premiers véhicules hybrides), les synergies deviennent plus faibles entre les piles pour applications stationnaires et transports. Ces dernières acquièrent une dynamique propre du fait des synergies entre applications transports décrites précédemment. Sur les générations suivantes, ce sont donc les piles transports qui « tirent » les piles stationnaires.

Seul le marché de la cogénération résidentielle offre des perspectives assez importantes pour motiver des recherches sur les systèmes-piles à haute performance et faibles coûts. Ces recherches sur les PEMFC à haute température pour la cogénération résidentielle se conjuguent avec celles qui visent les applications transports. Des synergies sont également à attendre sur les recherches de « petites » SOFC pour applications résidentielles et pour les GAP dans les transports.

Figure 5: Un scénario de courbe d'apprentissage des systèmes-piles



PARTIE 2 : CONSTRUCTION DE LA STRUCTURE DE PILOTAGE DE LA COURBE D'APPRENTISSAGE DES SYSTEMES-PILES

Le Plan d'Action Pan-H et la Stratégie de Déploiement européenne proposent toutes deux, selon des modalités différentes, un développement progressif des technologies et applications des systèmes-piles sur des niche de marchés intermédiaires, aboutissant au final à l'application véhicule individuel. Une telle stratégie repose sur l'existence et la valorisation de synergies entre technologies de systèmes-piles pour différentes générations de technologies.

La première partie de cette étude a permis de cartographier les synergies potentielles entre ces technologie de systèmes-piles et, sur la base de cette cartographie, de proposer un calendrier de succession des différentes générations de systèmes-piles. L'argumentation utilisée pour mettre à jour ces synergies potentielles a été jusque là presque essentiellement limitée à l'examen de facteurs techniques et de marché.

Les facteurs organisationnels et institutionnels doivent maintenant être pris en compte dans une seconde partie pour étudier la possible valorisation et réalisation de ces synergies potentielles. En effet, si le volume des synergies potentielles est fortement contraint par les possibilités à un niveau donné de l'état de l'art des techniques et des performances demandées par les utilisateurs, leur réalisation et valorisation reposent sur les liens entre différents acteurs de la filière PaC détenant les connaissances, produisant les piles ou encore les utilisant. La multiplicité des liens et accords entre recherche, innovation, démonstration et déploiement des systèmes piles au sein de chaque phase et le calendrier complexe de succession des phases que suppose le bon déroulement de la courbe d'apprentissage nécessite une coordination forte des activités de la filière. La structure de pilotage à mettre en place a donc une importance déterminante sur les possibilités de succès de la stratégie proposée.

Cette seconde partie a ainsi pour objet de « construire » cette structure de pilotage pertinente à partir des fonctions élémentaires à assurer pour que la dynamique de la courbe d'apprentissage proposée précédemment puisse s'établir et permettre le développement coordonné des marchés et technologies de systèmes-piles. Le cahier des charges de la structure de pilotage est tout d'abord passé en revue, décrivant les sept fonctions à assurer. Ces fonctions élémentaires sont ensuite successivement analysées, en les illustrant par une analyse de quelques-unes des *best practices* étrangères se rapportant à ces fonctions. Enfin, une dernière partie s'attache à proposer une structure de pilotage de la filière PaC française en répondant aux deux questions suivantes :

- Quel est le degré d'intégration pertinent de ces différentes fonctions au sein d'une même organisation ?
- Comment assurer la cohérence d'ensemble de l'ensemble des fonctions ?

1 Le cadre d'analyse de la structure de pilotage

De l'argumentation présentée dans la première partie, il est possible de définir un cahier des charges fonctionnel de la structure de pilotage à mettre en place. Pour faire apparaître les différentes fonctions que devra assurer la structure de pilotage, il est nécessaire de partir de la courbe d'apprentissage.

1.1 De l'analyse de la courbe d'apprentissage à l'analyse fonctionnelle de la structure de pilotage

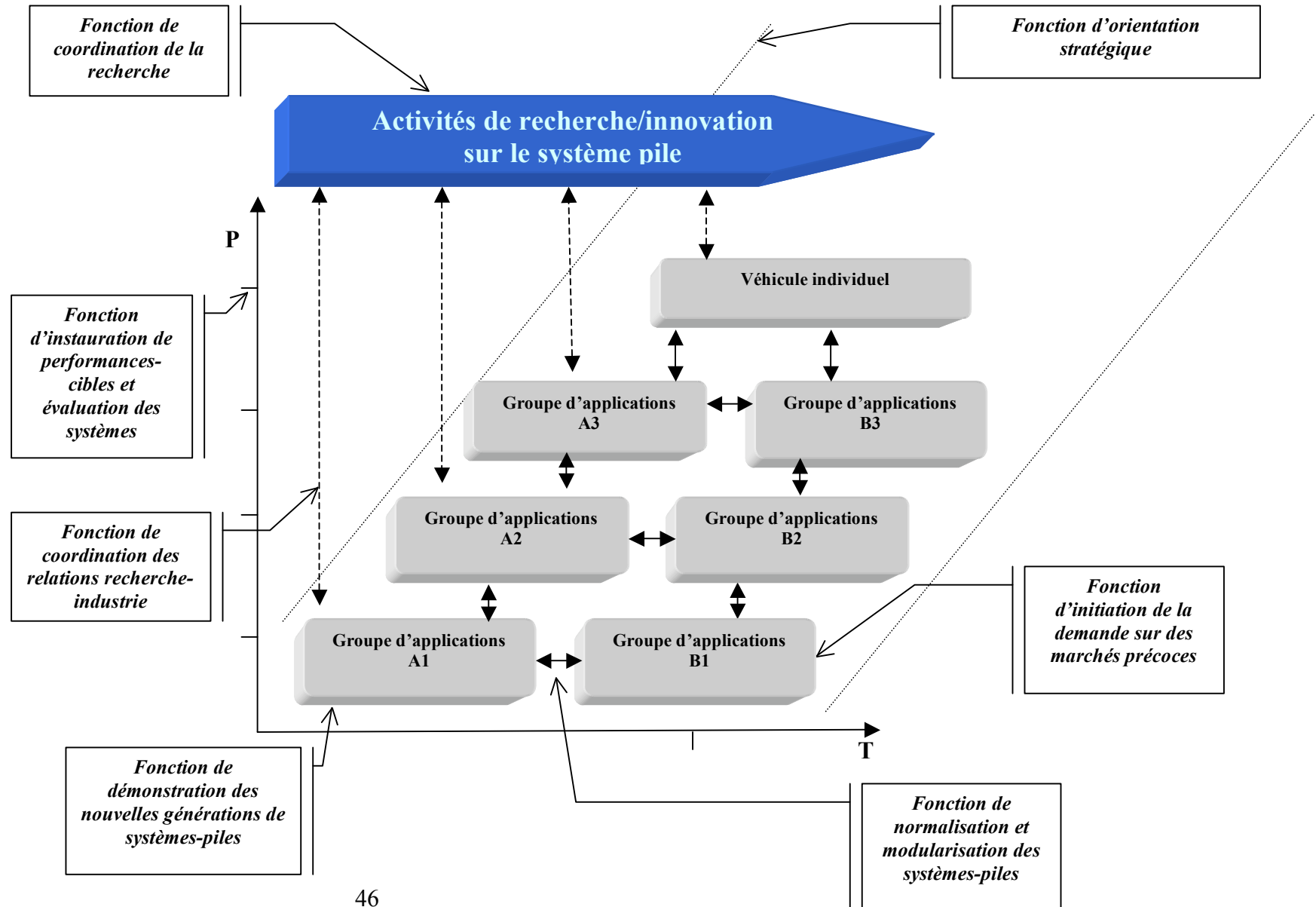
La courbe d'apprentissage nécessite une coordination sur les divers éléments, activités et interactions entre groupes d'acteurs qui la compose :

- Les activités de démonstration dès l'introduction d'une nouvelle génération de pile.
- Les activités de soutien au décollage des marchés précoces (premières générations de systèmes-piles), lorsque les technologies et marchés sont encore incertains.
- Les activités de recherche scientifique afin de permettre une meilleure efficacité de ces activités dans le cadre du plan stratégique proposé tout en laissant une place aux recherches « libres », notamment sur des options technologiques actuellement délaissées.
- Les liens permettant les apprentissages entre recherche et industrie, et notamment le retour d'expérience sur les premières applications des systèmes-piles.
- Les performances minimales et consensuelles qui doivent être atteintes pour satisfaire les différents groupes d'applications.
- Les activités de normalisation des systèmes-piles et de leurs composants afin de maximiser les économies d'échelle tout en permettant à ces systèmes de satisfaire des applications aux cahiers des charges multiples.
- Enfin, ces fonctions élémentaires doivent être intégrées afin de permettre un pilotage d'ensemble à la fois cohérent et stratégique

On dérive ainsi de ces impératifs de coordination au sein de la courbe d'apprentissage sept fonctions élémentaires dont la structure de pilotage doit être dotée (*cf.* Figure 6) :

- Fonction de coordination des activités de recherche de base
- Fonction de coordination des relations recherche-industrie
- Fonction de normalisation et modularisation des systèmes-piles
- Fonction d'initiation de la demande sur des marchés précoces
- Fonction de démonstration des nouvelles générations de systèmes-piles
- Fonction d'instauration de performances-cibles et évaluation des systèmes
- Fonction d'orientation stratégique de la filière

Figure 6: Identification des fonctions de la structure de pilotage de la courbe d'apprentissage



1.2 Des expériences multiples à l'étranger

Afin d'assurer ces fonctions élémentaires, l'ensemble des principaux pays impliqués dans les activités de recherche, développement et déploiement de systèmes-piles ont mis en place des structures et mécanismes de financement et de soutien à la coordination de ces activités.

Si elles permettent généralement d'assurer plusieurs de ces fonctions, elles ont le plus un positionnement (plus ou moins amont/aval par exemple) ou une mission les amenant à privilégier une fonction particulière. A ce jour, dans l'industrie de la pile à combustible, il existe ainsi très peu de structure intégrée regroupant ces différentes fonctions de coordination. Seules la FCCJ japonaise et, dans une moindre mesure, le DOE américain ont un « portefeuille de missions » aussi complet.

Le Tableau 9 présente par fonction certaines des initiatives publiques-privés déjà mises en place sur la scène internationale. Cette revue ne prétend pas à l'exhaustivité que ce soit par fonction ou par pays. L'objectif est d'isoler certaines initiatives remarquables afin de les mobiliser par la suite lors de l'analyse successive de chaque fonction.

Un tableau récapitulatif par fonction de l'ensemble des initiatives étrangères présentées dans le rapport est donné en Annexe Q. Ce tableau donne une idée de la variété des modes de coordination des fonctions identifiées dans les principaux pays impliqués dans la PàC. Pour chacun de ces initiatives, quelques informations concernant leur budget et leur organisation sont présentées. Il n'y a bien sûr pas de « one best way » en la matière. Chaque mode de coordination mis en place dans un pays correspond à une certaine tradition de politique publique, à des rapports de pouvoir entre acteurs publics et privés ainsi qu'à divers arbitrages stratégiques.

Tableau 9: Tableau synthétique des initiatives publiques de soutien à la pile à combustible

Fonction	Etats-Unis	Japon	France	Allemagne	EU	Canada
Nombre d'organisations dans l'industrie (1)	-	-	-	350	-	-
Nombre d'employés	3 800	-	-	2 800	-	2 700
Financement public de la R&D sur les 5 prochaines années	1,4 milliards €	1 milliards €	-	70 millions € (fédéral) 70 millions € (lands)	240 millions € (6 ^{ème} PCRD + Quickstart)	700 millions €
Coordination des activités de recherches de base	DOE (Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program) FreedomCar	FCCJ Programme METI	GDR CNRS (PEM et SOFC) Pan-H (pôle recherche ; <i>proposition</i>)	Programme fédéral ZIP (50M€ sur 1990-2002) Programme des Lands (cf. FABZ en Bade-Wurtemberg, coordonne 15 instituts)	Repose principalement sur les Etats Membres	Programme CNRC (dont Institute for Fuel Cell Innovation)
Coordination des relations recherche-industrie	FreedomCar	FCCJ	Réseau PACo (par projets) Pan-H (pôle Technologies et innovations; <i>proposition</i>)	Programme fédéral ZIP (250M€ sur 1990-2003) Programme des Lands (WiBa, en Bavière, ...)	Projets 6 ^{ème} PCRD / HFP	Programme CNRC Programme de R-D sur l'hydrogène et les piles à combustible, RNCan
Standardisation et modularisation	SECA (Programme module pile)	FCCJ et associations industrielles (JARI, JEVA, ENAA)	PACo (projet SEREPAC par exemple) Pan-H (tâches transversales, <i>proposition</i>)	Programme fédéral ZIP (14 M€ sur 2001-2005 pour recherche normative et éducation)	FEBUSS (Projet module pile) European Integrated Hydrogen Project (EIHP, 5 m €) / HFP FCTESTNET,...	Canadian Transportation Fuel Cell Alliance (Standards and Codes Working Group Standards Council of Canada,)
Soutien aux décollage des marchés précoces	Diverses incitations à l'achat et/ou à l'investissement au niveau des Etats Commandes publiques civiles et militaires	Achat de véhicule à PaC et piles co-génération par METI	Achats publics militaires Pas de programme de commandes publiques civiles	Loi Cogénération Pas de programme de commandes publiques civiles	Nombreuses mesures d'incitation à l'achat et/ou à l'investissement par Etats Pas de programme de commandes publiques civiles	Early Adopters Program ?

Tableau synthétique des initiatives publiques de soutien à la pile à combustible (Suite)

Fonction	Etats-Unis	Japon	France	Allemagne	EU	Canada
Démonstration des premières générations de piles	California FC Partnership DOE DoD Residential PEM Demonstration Projects	FCCJ / JHFC Demonstration Project	Pan-H (pôle démonstration; <i>proposition</i>) PACo (projets type « Pile à Paris »)	Programme fédéral ZIP (102 M€ sur 2001-2005 pour démonstration) Programme de démonstration de l'aéroport de Munich, de la ville de Berlin	Projets 6 ^{ème} PCRD / HFP <i>Lighthouse projects</i> Quick Start Initiative	Hydrogen Airport (Montreal), Highway (Vancouver), Village (Toronto) Early Adopters Program
Orientation stratégique	DOE (Vision, Roadmap, Action Plan)	FCCJ (roadmap)	Plan d'Action Pan-H (proposition)	Stratégie du Federal Ministry of Economics and Labour « Strategy Report on Research Needs in the Field of Hydrogen Energy Technology » (2005) Programme Bavarois WiBa	HFP (<i>Deployment Strategy</i>) HyNet (roadmap)	Fuel Cell Canada (<i>Roadmap</i>)
Instauration de performances-cibles et évaluation des systèmes	FreedomCar (PEM) SECA (SOFC) DOE	FCCJ (au sein de la roadmap)	Pan-H (par appel à proposition) Plateforme pile à combustible de Belfort		HFP (SRA) FCTestNet	Centre de technologie des piles à combustible (CTPC)

(1) Les indications de nombre d'organisations, d'employés et de financements publics sont issues de Amorelli *et al.*, 2005, Assessing the International Position of EU's Research and Technological Development and Demonstration (RTD&D) on Hydrogen and Fuel Cells, EUR No: 21685 EN, IPTS.

2 Fonction de coordination des activités de recherche de base

2.1 Les bases de la fonction

La recherche de base nécessite deux types de coordination :

- une coordination de ses relations avec la recherche menée au sein de l'industrie
- une coordination horizontale entre ses différentes composantes permettant de mener des recherches multidisciplinaires et d'éviter les duplications excessives. Elle permet également de maintenir un lien avec les recherches « libres » et à très long terme.

Cette section a pour objet la coordination horizontale au sein de la recherche de base

2.2 Le Programme du CNRC sur les piles à combustible

Le Programme du CNRC sur les piles à combustible constitue un réseau d'Instituts du CNRC dispersés sur le territoire du Canada. Chaque Institut travaille 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 piles à combustible. Le but est de permettre au CNRC d'être davantage en mesure de répondre aux besoins stratégiques de l'industrie canadienne naissante des piles à combustible. Le programme apporte un 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. Les Instituts suivants font partie du Programme :

- NRC Institute for Fuel Cell Innovation (Institut d'Innovation en Piles à Combustible IIPC-IFCI)
 - Headquarters of the NRC Fuel Cell Program
 - Piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC)
 - Piles à combustible à oxyde solide (SOFC)
 - Intégration, essais et prototypage de systèmes, évaluation
- NRC Industrial Materials Institute
 - Formulation and microstructure of materials
 - Process simulation and modelling software for materials forming
 - Process Instrumentation
- NRC Institute for Chemical Processes and Environmental Technologies
 - Materials for cell components and catalysts
 - Modelling SOFC, PEMFC and Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) systems
 - Technology integration - sensor development for measuring fuel and exhaust concentrations
- NRC Integrated Manufacturing Technologies Institute
 - Systems Integration and Control Research - 3D visualization
 - Production Technologies Research - laser based - rapid prototyping - machining
- NRC Steacie Institute for Molecular Sciences
 - Functional materials, molecular spectroscopy, molecular interfaces, organometallic and cluster chemistry

- NRC Institute for Research in Construction
 - Residential FC systems testing

Le Centre de technologie des piles à combustible (CTPC) fait partie intégrante du Programme ; il a été créé dans le cadre de l'Initiative nationale de recherche et d'innovation dans le domaine des piles à combustible lancée conjointement par le CNRC, RNCAN et le CRSNG en août 1999. Il est situé dans l'Institut d'innovation en piles à combustible.

D'après le site de l'IICP, le CTPC, « plate-forme de R-D pour l'Initiative nationale de recherche et d'innovation dans le domaine des piles à combustible, soutiendra la validation et l'essai des projets sur les composants et sous-composants menés dans d'autres instituts du CNRC. Il fournira aussi à l'industrie canadienne l'infrastructure de mise au point de produits requise pour le développement des entreprises. De plus, le Centre permettra la démonstration de produits et de systèmes nouvellement mis au point, la formation du personnel et l'interaction avec d'autres programmes internationaux. Le CTPC est un élément vital du Programme national sur les piles à combustible du CNRC et il bénéficie de l'appui total du Programme de recherche sur les piles à combustible du CNRC et du Programme de partenariat de recherche CRSNG/CNRC dans le domaine des piles à combustible. Le CTPC constituera une vitrine pour la technologie des piles à combustible canadienne et il offrira des occasions pour le développement des compétences techniques et la formation des jeunes chercheurs et techniciens. Fonction toute aussi grande, le Centre sera une plate-forme où chercheurs du gouvernement, des universités et de l'industrie pourront échanger des idées et former des liens de collaboration. »

Le CTPC comprend une « chambre environnementale » simulant nombre de conditions atmosphériques et géographiques, de manière à permettre aux entreprises et aux chercheurs d'évaluer les véhicules et autres produits fonctionnant avec des piles à combustible. Cette chambre environnementale est le fruit d'un partenariat entre le gouvernement et l'industrie.

2.3 L'Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program du DOE

L'ensemble des activités de R&D du DOE relatives à l'hydrogène, de sa production à sa conversion par PàC, sont rassemblées et coordonnées au sein du Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program. Ce programme, qui encadre les recherches des laboratoires fédéraux et celles des laboratoires universitaires et entreprises financées par le DOE, est intégré au sein des initiatives auxquelles participent le DOE, le programme FreedomCAR ainsi que le programme SECA (cf. infra). Il répond également aux directions proposées par le Posture Plan précédemment évoqué. Ce programme est donc un élément essentiel de connexion entre la stratégie nationale, les projets de R&D soutenu par le DOE et les partenariats de grande envergure entre le DOE et les grands industriels des industries pétrolières, électriques et automobiles.

Au-delà des recherches sponsorisées par le DOE, ce programme fournit des éléments importants de programmation sous la forme de performances-cibles précises pour

diverses applications. Ces targets servent de référents aux divers projets et sont également reprises au sein des programmes.

Tableau 10: Performances-cibles du DOE pour pile 50kWe à alimentation directe en H2

Critère de performance		Unités	2001	2005	2010
Efficiencia		%	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 11: 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 12: 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
Efficiencia	%	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

3 Fonction de coordination des relations recherche industrie

3.1 Les bases de la fonction

Cette fonction est au cœur de la dynamique de la courbe d'apprentissage, elle permet :

- D'orienter la recherche de base vers les besoins de l'industrie, identifiées dans les activités de R&D mais également au cours des opérations de démonstration.
- De produire collectivement et transférer les nouveaux concepts issus de la recherche de base vers l'industrie.

Rappelons que de nombreuses études détaillent le rôle croissant de la recherche de base dans le processus de développement industriel. Il ressort cependant de ces analyses que²¹ :

- La recherche de base renforce la base de connaissances concernant les options technologiques connues, celles qui appartiennent à l'état de l'art actuel. Ces connaissances scientifiques sont utilisées par les firmes pour conduire leurs activités de R&D. L'apport de la recherche de base est en fait très large, il consiste en modèle de simulations et méthodes de mesure comme en une compétence plus diffuse issue de la compréhension des phénomènes, permettant de faire progresser ces options et de mieux appréhender les applications qui peuvent en découler. Plus généralement, on peut avancer que la recherche de base augmente le rendement de la recherche appliquée : « *en permettant un niveau de compréhension plus profond des phénomènes naturels, la recherche de base peut servir de guide précieux dans des directions où les probabilités de rendements de la recherche appliquée sont supérieures* »²². A ce titre, elle peut donc être utile dans les prises de décision stratégique concernant les voies de recherche à privilégier ou éviter.
- La recherche de base permet de découvrir de nouvelles options technologiques non accessibles avec l'état de l'art précédent. Si l'on considère le caractère cumulatif du changement technologique, ceci peut ouvrir un champ entier de développement de nouvelles options²³.
- Recherche appliquée et fondamentale ne sont pas exclusives mais complémentaires. Non seulement les acteurs scientifiques et industriels doivent entrer en interaction pour valoriser leurs activités réciproques, mais bien souvent il faudra que chaque acteur maintienne l'une et l'autre des deux activités : pour s'approprier les connaissances académiques, même codifiées, les entreprises doivent elles-même, en interne, maintenir actives (c'est à dire pratiquer) des connaissances scientifiques. Rosenberg propose alors une vision de la recherche de base comme « *ticket d'admission à un réseau d'informations* ».

²¹ Seuls sont recensés ici les effets les plus directs de la recherche de base sur la recherche appliquée. Une multitude d'autres effets, positifs ou négatifs, ne sont pas présentés (parmi lesquels, pour les effets positifs, l'aspect « formation par la recherche » et, pour les effets négatifs, les effets d'éviction et autres facteurs de « *crowding out* »).

²² Rosenberg N., 1990, Why do firms do basic research (with their own money) ?, *Research Policy*, vol 19, pp. 165-174. Voir aussi : Rosenberg N., 1992, Science and technology in the twentieth century, in Dosi G., Giannetti R., Toninelli P.A., *Technology and enterprise in a historical perspective*, Clarendon Press, Oxford, pp. 63-96.

²³ Steinmueller W.E., 1994, Basic research and industrial innovation, in Dogson M., Rothwell R., *The handbook of industrial innovation*, Edward Elgar Publisher, pp. 54-66.

Il ne s'agit donc plus d'un passage de relais entre recherche et innovation mais bien d'une intégration croissante entre ces deux composantes du processus d'innovation. Cette fin du modèle linéaire a nécessité que les autorités publiques changent leurs modes de coordination de ces activités. En France, les Réseaux d'Innovation et de Recherche Technologique – dont fait parti le réseau PACo – sont sans aucun doute un des instruments de politique technologique les plus novateurs mis en place pour lier recherche et industrie, notamment dans les phases d'émergence d'une nouvelle filière comme cela était le cas à la fin des années quatre-vingt dix .

3.2 La FreedomCAR and Fuel Initiative

La FreedomCAR and Fuel Initiative initiée en janvier 2002 à la suite de la dissolution du PNGV par l'administration Bush est un programme public/privé de recherche pré-compétitive regroupant le DOE, les grands groupes pétroliers américains et les trois grands constructeurs automobiles américains²⁴. L'objectif est de développer des technologies propres liées à l'infrastructure et aux véhicules individuels. Les PàC sont une des principales technologies soumises à des recherches dans ce programme. Caractéristique des programmes pré-compétitifs américains, la FreedomCAR and Fuel Initiative a avant tout un rôle de coordination des activités de R&D des partenaires au travers de la détermination en commun de priorités de recherche, de performances-cibles et d'une gestion commune (sélection, évaluation des résultats) des recherches commanditées aux fournisseurs et laboratoires.

Les recherches de chacun des constructeurs automobile, et surtout l'intégration des dispositifs au sein de leurs prototypes respectifs, restent menées au sein de programmes « propriétaires » confidentiels.

Ce programme étant limité aux technologies de transport, l'exploitation des synergies entre applications des piles mobiles et stationnaires n'est pas un axe structurant les activités de R&D. Seules les synergies entre véhicules à PàC et véhicules hybrides batterie/thermique, reposant sur de nombreux composants communs, sont mises en avant. Les technologies dans les domaines des matériaux légers, de l'électronique de puissance, des moteurs électroniques et des batteries doivent ainsi pouvoir être valorisées sur les deux types de véhicules. De même, les activités sur les véhicules hybrides sont coordonnées sur les applications véhicule léger (FreedomCAR) et lourd (21st Century truck Partnership).

²⁴ DOE, BP America, ChevronTexaco Corporation, ConocoPhillips, Exxon Mobil Corporation,, Shell Hydrogen, USCAR (DaimlerChrysler Corporation, Ford Motor Company,, General Motors).

Tableau 13: Performances-cibles du véhicule hybride de la FreedomCAR and Fuel Initiative à l'horizon 2010

Composants	Efficience	Puissance	Energie	Coût	Durée de vie	Poids
Système pile	60% (H2) 45% (avec reformeur)	325 W/kg 220W/L		125\$/kW (2006) 45\$/kW (2010) 30\$/kW (2015)		
Production/distrib. H2	70% de la source à la pompe			1,5\$/gallon (équivalent essence 2001)		
Stockage H2			2 kWh/kg (2010) 1.5 kWh/L (2010) 3 kWh/kg (2015) 2.7 kWh/L (2015)	4 \$/kWh (2010) 2 \$/kWh (2015)		
Propulsion électrique		55kW sur 18 secondes 30 kW en continu		12\$/kW	15 ans	
Stockage électricité		25kW sur 18 secondes	300Wh	20\$/kW	15 ans	
Matériaux						50% de moins
Chaîne de traction	45% en crête			30\$/kW	15 ans	

Note : les coûts du système pile n'incluent pas l'électronique associé

Tableau 14: Calendrier des *milestones* du programme FreedomCAR

Date	Activités et livrables
1 ^{er} trimestre 2003	Prototype de pré-production du module de puissance automobile intégré
3 ^{ème} trimestre 2004	Décision Go/No-Go et sélection des technologies de reformage embarqué permettant d'atteindre les performances-cibles 2010 (<i>décision effectivement prise, la solution pile + reformeur est abandonnée pour les applications mobiles</i>)
4 ^{ème} trimestre 2004	Validation sur modèle de simulation des batteries lithium-ion au niveau système-pack
4 ^{ème} trimestre 2005	Validation des performances-cibles intermédiaires concernant le coût du système pile
2 nd trimestre 2006	Validation des premières séries de technologies de chaîne de traction électrique
4 ^{ème} trimestre 2006	Sélection par le DOE des technologies de stockage d'hydrogène permettant d'atteindre les performances-cibles 2010
4 ^{ème} trimestre 2006	Validation des technologies de contrôle durable des émissions de particules et d'oxyde de nitrate pour les moteurs à combustion interne
4 ^{ème} trimestre 2006	Validation sur modèle de simulation des systèmes de stockage d'énergie avancés
4 ^{ème} trimestre 2007	Démonstration de stations de distribution d'hydrogène utilisant des composants avancés permettant d'atteindre les performances-cibles 2010

3.3 Le réseau PACo

Le réseau national « Piles à Combustibles » (PACo) est un des réseaux de recherche et d'innovation technologiques dont la création, annoncée par le Premier ministre lors des Assises de l'innovation, a été confirmée par le Comité interministériel de la recherche scientifique et technologique (CIRST) en juin 1999.

Il a pour but de favoriser, dans le domaine des piles à combustible, le couplage entre la recherche publique et la recherche industrielle.

Précisément, le réseau répond aux objectifs suivants :

- Identification des marchés et des défis technico-économiques correspondants
- Préparation du contexte réglementaire et normatif
- Soutien de la recherche
- Actions de démonstration (pilote)
- Promotion de collaborations internationales
- Réflexion prospective

Le réseau s'organise autour d'équipes de recherche et de développement issues du monde industriel et de leurs directions scientifiques et techniques (grands groupes, PME/PMI, ingénieries) ou du secteur public (universités, organismes de recherche, écoles d'ingénieurs).

Le réseau est piloté par un comité d'orientation où sont représentés les laboratoires et les industriels concernés par le domaine de la PàC. Le comité définit les orientations de recherche et développement et garantit que les actions engagées répondent aux besoins identifiés. Une cellule d'animation et de coordination assure le

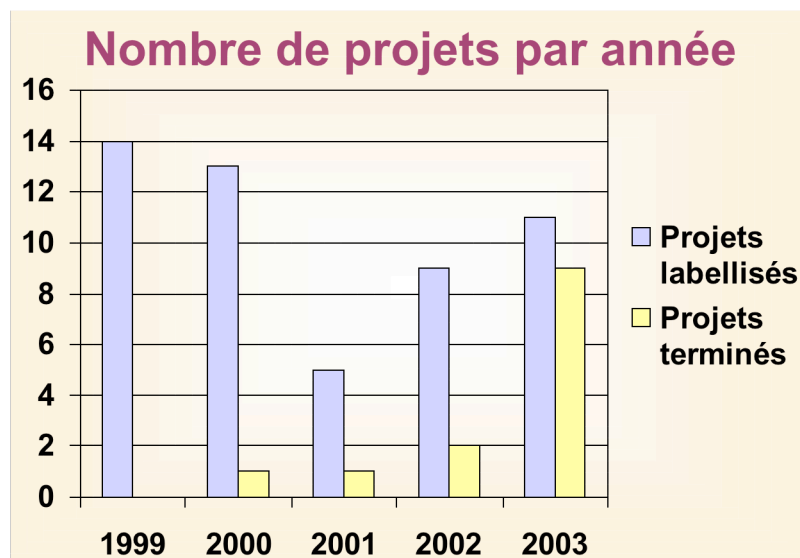
fonctionnement et l'animation scientifique et technique de l'ensemble du réseau. Elle est animée conjointement par L'ADEME et par le CEA. Les financements des projets labellisés sont assurés par les Ministères de la Recherche, de l'Industrie, des Transports et de la Défense ainsi que par l'ADEME et l'ANVAR.

Une des premières actions du réseau a été d'initier un appel à propositions qui s'est clos en octobre 1999. En avril 2001, 29 projets de R&D correspondant à différentes thématiques étaient labellisés (50 % dédiés aux PàC, 25 % concernant les combustibles, 25 % concernant des actions transverses comme la veille, la sûreté et les analyses technico-économiques). Après les deux premières années de fonctionnement, le réseau PACo a souhaité consolider ses actions en les adossant à une stratégie clairement exprimée. A cette fin, il a consulté différents acteurs du domaine (organismes de recherche, industriels) qui se sont exprimés par le biais d'une enquête (mai 2000), d'interviews individuels (avril 2001) et d'un atelier de travail (3 mai 2001). Cette analyse stratégique a révélé qu'un certain nombre d'axes technologiques méritaient un approfondissement. Le comité a alors défini des objectifs stratégiques ciblés qui correspondent aux besoins affirmés. Les projets R&D présentés au réseau doivent donc répondre depuis à ces objectifs.

Comme les autres réseaux d'innovation français (RRIT), le réseau PACo reste avant tout un instrument *bottom-up* dont les projets financés sont alloués au terme d'un processus en deux étapes, labellisation puis financement.

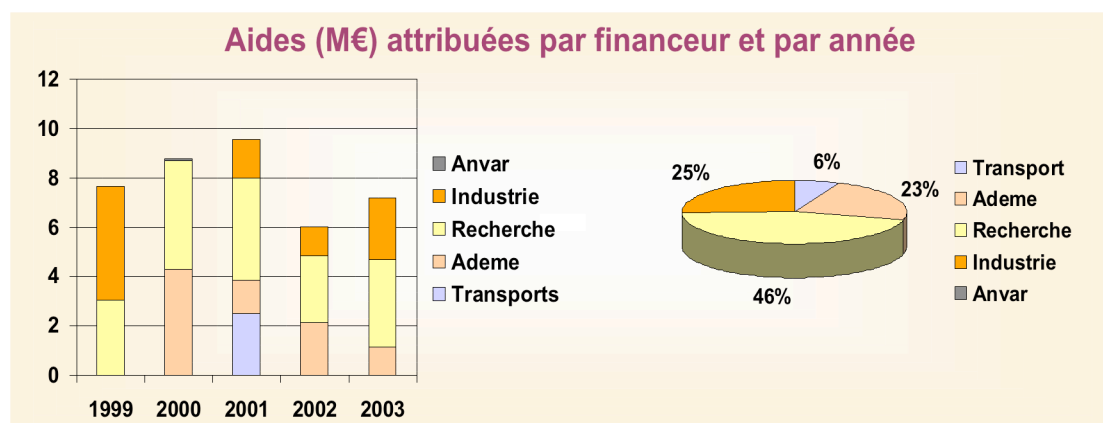
Tout d'abord, une évaluation de la qualité des projets par des pairs, menant à leur labellisation. Les actions de recherche et développement labellisées sont soutenues par des crédits incitatifs de l'Etat, des collectivités locales, etc. Les actions soutenues sont à finalités industrielles, les projets sont obligatoirement coopératifs. Ils mettent en jeu un ou plusieurs industriels et un ou plusieurs laboratoires de recherche publics. Le bilan du réseau PACo, datant de fin 2003, montre que 52 projets ont alors été labellisés.

Figure 6 : Nombre de projets labellisés et terminés par année au sein du réseau PACo



Les projets labellisés sont ensuite financés par les acteurs publics pertinents, principalement les ministères de la recherche ou de l'industrie, et l'ADEME. Les financements attribués aux projets labellisés représentent environ 10 M€ par an.

Figure 7 : Les aides attribuées par financeur et par année



Le bureau du réseau PACo qui s'est réuni le 23 septembre 2004 a décidé de suspendre, jusqu'à nouvel ordre, la recevabilité de nouvelles propositions de recherche et développement dans le domaine des piles à combustible, compte tenu des évolutions en matière de financement de la recherche en France. La structure PACo est cependant utilisée aujourd'hui pour soutenir le premier appel d'offre Pan-H lancé récemment par l'ANR.

4 Fonction de normalisation et modularisation des systèmes-piles

4.1 Les bases de la fonction

Afin de maximiser les synergies entre systèmes-piles pour plusieurs groupes d'applications, une option possible consiste à privilégier la modularisation des piles et de leurs composants principaux. La modularisation des AME permettrait de bénéficier d'économie d'échelle substantielles comme cela nous a été confirmé par l'équipe s'occupant du développement des piles à combustible à 3M France. En effet aucun des marchés des premières générations de piles ne sont suffisants pour permettre à ces grands acteurs de prendre la décision de se lancer dans la phase de production. Il en résulte un moindre investissement de ces acteurs en attente des premiers signes tangibles de décollage du marché des véhicules individuels ou des piles résidentielles.

La première possibilité pour normaliser les éléments de la pile transite par les instances internationales de normalisation, comme par exemple le Comité technique des techniques de l'hydrogène de l'Organisation internationale de normalisation (ISO) ou encore *Technical Committee* No. 105 de l'IEC (International Electrotechnical Commission).

Cependant ces organisations interviennent souvent lorsque le design du produit est relativement stabilisé, ce qui est évidemment loin d'être le cas des systèmes-piles. Elles confirment et instituent un design existant mais peuvent difficilement intervenir lorsque le produit est encore en phase préliminaire de développement.

Dans le cas de technologies « en devenir », les modules ou composants doivent être conçus dès le départ dans la perspective de plusieurs applications en trouvant l'arbitrage optimal entre les performances du dispositif permettant de satisfaire les différents cahiers des charges. C'est le cas de quelques projets comme le projet européen FEBUSS (module PEMFC pour applications stationnaires et transports) ou encore le programme américain SECA (module SOFC pour applications portables, stationnaires et transports).

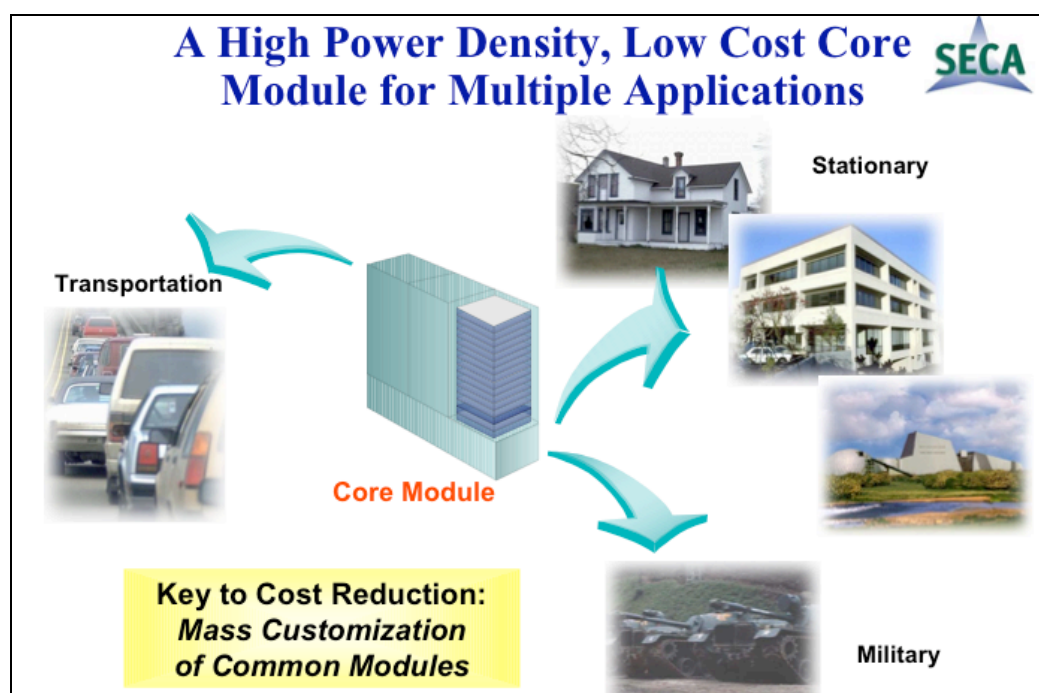
4.2 Un programme de développement de piles modulaires multi-applications : la SECA

Le programme SECA (Programme Solid State Energy Conversion Alliance) est un partenariat initié en 1999 entre les acteurs impliqués dans les recherches sur la pile SOFC (laboratoires scientifiques fédéraux et universitaires, industriels et pouvoirs publics). Ce programme est coordonné par le National Energy Technology Laboratory (NETL) et le Pacific Northwest National Laboratory.

Ce programme se donne comme principal objectif la standardisation d'un module multi-applications (mobiles, stationnaires et militaires) de 3 à 10 kW. Cette stratégie repose sur le concept de « *mass customization* » à savoir d'arbitrage optimal entre spécificité des piles pour différentes applications et standardisation pour profiter des économies d'échelle.

En plus des synergies « synchroniques » permises par le développement d'un module standardisé pour diverses applications au sein d'une même génération de systèmes-piles, des synergies « diachroniques » entre générations de systèmes-piles sont également prises en compte dans la stratégie du programme SECA. Pour les applications mobiles par exemples, la pile SOFC servira d'auxiliaire de puissance, tout d'abord pour des véhicules lourds (classe 8) et des véhicules récréatifs, puis pour des véhicules individuels. Il est précisé que si le gain environnemental d'un auxiliaire de puissance de 5kW est relativement faible, l'application de la pile sur ce marché de masse permettra de réduire significativement leur prix. Cette baisse des coûts, de 800\$/kW estimé en 2005 à 400\$/kW en 2010, leur permettra dans un second temps d'accéder à des applications plus exigeantes en termes de coûts mais représentant des gains environnementaux substantiels. A plus longue échéance, aux alentours de 2015, les développements des piles SOFC conduits au sein de ce programme doivent être également valorisés dans le cadre des usines de production décentralisées d'électricité à haut rendement et propre (>60%, émission quasi nulle) du programme du DOE Vision 21.

Figure 8: Schéma de présentation du concept de pile ciblée par le programme SECA



Source : Strakey, 2001

Conformément aux méthodes du DOE, éprouvées sur d'autres technologies, différentes équipes sont mises en concurrence dans un cadre commun de compétition, à savoir des performances cibles finales et intermédiaires précises ainsi que des procédures d'évaluation (normes de mesure des performances, le NETL comme évaluateur) partagées par les différentes équipes. Il ne s'agit donc pas de coopération – sauf à l'intérieur des équipes – mais de coordination des activités de R&D dans un domaine encore très peu institutionnalisé.

Les performances-cibles finales à atteindre par les équipes en compétition sur une période de 10 ans (donc d'ici la fin de la décennie) sont décomposées en 3 phases (cf. Tableau 15).

Tableau 15: Performances-cibles du module multi-applications du programme SECA (3-10kW)

	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Puissance	3-10kW	3-10kW	3-10kW
Coûts (intervalle de confiance 25% à volume de production donné)	800 \$/kW	600 \$/kW	400 \$/kW
Efficience	Mobile : 25%	Mobile : 30%	Mobile :30%
	Stationnaire : 35%	Stationnaire :40%	Stationnaire :40%
Durabilité condition normale d'utilisation	1500 heures	1500 heures	1500 heures
	Disponibilité 80%	Disponibilité 85%	Disponibilité 95%
	Puissance diminue de 2% pour 500h (avec voltage constant)	Puissance diminue de 1% pour 500h (avec voltage constant)	Puissance diminue de moins de 0,1% pour 500h (avec voltage constant)
Transient test	10 cycles	50 cycles	100 cycles
	Puissance diminue de 1% pour 10 cycles (avec voltage constant)	Puissance diminue de 0,5% pour 50 cycles (avec voltage constant)	Puissance diminue de 0,1% pour 100 cycles (avec voltage constant)
Type de test	(1) Test de durabilité 1000h (2) <i>Transient test</i> (3) Test de durabilité 500h		
Durée de vie	Mobile pour militaire:5 000		
	Stationnaire : 40 000		
Puissance	0,3W/cm ²	0,6 W/cm ²	> 0,6 W/cm ²
Température	800°	700°	700°
Type de fuel	Réformage externe ou interne Tout carburant accepté	Réformage externe ou interne Gaz naturel, essence ou diesel	Réformage externe ou interne Gaz naturel, essence ou diesel
Maintenance	Pas plus d'une opération de maintenance toutes les 1000h		

Source : <http://www.seca.doe.gov/>

Note : nous ne reproduisons ici que les principales spécifications requises. Des configurations relatives au type de tests, l'identité des testeurs indépendants, ou encore la pile en elle-même sont également spécifiés.

4.3 Un projet de développement de piles modulaire multi-application : FEBUSS

Le même objectif de modularisation peut être poursuivi non plus au sein d'un programme mais de projets. C'est notamment le cas du projet Européen FEBUSS, soutenu par la Commission Européenne à hauteur de 4 M€, et du projet labellisé par le réseau PACo SPACT dont les fournisseurs de systèmes-piles sont respectivement les deux entreprises françaises Axane et Héliion.

Le projet FEBUSS (programme de 5 ans lancé en 2002), qui réunit les utilisateurs finaux, les fournisseurs de composants pour piles à combustible et les spécialistes des questions de réglementation/sécurité, porte sur le développement d'un système pile à combustible, alimenté par hydrogène 100 kW, standardisé pour les transports urbains et les applications stationnaires.

Afin de faciliter l'exploitation de la technologie des piles à combustible PEM dans des applications diverses malgré des coûts initiaux élevés, le projet tente de définir une

plate-forme technique standard conforme aux applications transport et stationnaire. Cette plate-forme est en cours d'élaboration en fonction des compatibilités des besoins. Une première étape a ainsi consisté à l'identification précise des besoins dans les différentes applications visées.

Afin de garantir une concurrence égale sur les deux marchés, la conception du système intégrera un objectif de production en série d'un coût de 300 €/kW. Par ailleurs, afin d'améliorer la facilité de maintenance, la fiabilité et les performances, sont également incorporés à ce projet un stack (cœur de la pile) novateur, une conception de distribution des fluides ainsi que des auxiliaires de conception nouvelle.

La phase finale de ce projet prévoit une période d'expérimentation de prototypes sur 2 ans qui permettra de réunir de nombreuses informations sur la fiabilité du système et sur les frais de maintenance. Dans le même temps, une évaluation des coûts et un test des performances technologiques permanents permettront de garantir que la conception du système répond aux exigences des marchés en évolution constante²⁵.

5 Fonction de démonstration des nouvelles générations de systèmes-piles

5.1 Les bases de la fonction

Les expérimentations grandeurs réelles de systèmes-piles sont incontournables pour apprendre aussi bien sur la technologie que sur la demande auxquelles celles-ci doivent répondre. Ces expérimentations consistent à mettre à la disposition de la clientèle *a priori* visée une première génération de produit.

Outre leur coût élevé, un des problèmes que rencontrent les projets de démonstration dans les phases d'émergence concerne le manque de systèmes-piles à tester. Il est également nécessaire de déterminer quel type d'application et de technologie doit être démontré. Ce choix doit s'effectuer sur la base d'une stratégie claire, formalisé par un calendrier de succession des applications tel que celui proposé dans la première partie du rapport.

5.2 Le California Fuel Cell Partnership

Le California Fuel Cell Partnership (CFCP) vise à préparer la commercialisation de véhicule à PàC en démontrant leurs performances en condition d'usage réel. Ce programme a été créé conjointement, en janvier 1999, par deux agences gouvernementales et six entreprises. On compte ainsi dans le cadre de ce programme actuellement 65 véhicules à PàC utilisés en Californie. Ces véhicules sont alimentés en carburant par 15 stations et 9 sont encore en construction. Les stations de ravitaillement sont principalement situées autour des grandes villes, San Francisco, Sacramento, San Diego et Los Angeles. L'objectif à l'horizon 2007 est de mettre en circulation 300 véhicules à PàC.

²⁵ Cette présentation est basée sur les sites http://www-leg.ensieg.inpg.fr/eur_procour13.html et http://www.axane.fr/axane/fr/r_d/febuss.html

Le CFCP est dirigé par un comité de pilotage composé d'un représentant de chacun des membres permanents. Le comité de pilotage se réunit quatre fois par an et élabore la politique et les orientations de l'organisation. Un directeur exécutif mène à bien les objectifs du CFCP grâce à un groupe de travail composé de représentants des membres de l'organisation. Il existe également des sous-groupes de travail dédiés à des thématiques spécifiques. L'organisation est complétée par une équipe chargée de la communication sur les événements organisés autour des véhicules à piles à combustibles.

Le budget annuel du CFCP est actuellement de 2 millions de \$. Il inclut les coûts des locaux, de gestion du programme, des études communes, des manifestations publiques et d'éducation. Chaque membre verse une contribution annuelle d'environ 84 000\$. Les constructeurs automobiles fournissent des véhicules ainsi que le personnel et les installations pour leur entretien. Les compagnies pétrolières fournissent le carburant et les infrastructures pour les faire fonctionner. Les agences gouvernementales contribuent par des produits et des services en nature. Les locaux, situé à l'Ouest de Sacramento, sont en cours d'acquisition (leasing) et chaque membre paye une part du loyer.

Le CFCP est actuellement composé de 21 membres permanents²⁶ et de 11 membres associés. Pour devenir membre permanent, il est nécessaire de s'inscrire dans une des quatre catégories suivantes : énergie, automobile, technologie ou gouvernement et remplir des critères de sélection précis quant aux éléments que l'on peut fournir pour contribuer au budget de fonctionnement du programme. Les membres associés sont sélectionnés en fonction de l'expertise qu'ils peuvent fournir dans des parties spécifiques du programme.

5.3 Les autoroutes, villages et aéroports de l'hydrogène

Récemment plusieurs projets de démonstration de grande envergure ont été initiés afin de démontrer non pas des PàC prises isolément mais des systèmes interconnectés de PàC sur différentes applications (dites aussi communautés de l'hydrogène). Il s'agit par exemple au Canada de « *programmes de démonstration intégrés reposant sur des partenariats permettant de démontrer un modèle d'économie de l'H₂ opérant en condition réelle* »²⁷.

En Californie, le projet d'autoroute à hydrogène (The California Hydrogen Highway Networks) a pour objectif de mettre en service entre 50 et 100 stations à hydrogène dans une première phase 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. Ce projet devrait voir le jour autour des villes de Los Angeles, San Francisco, San Diego et Sacramento, mais la localisation exacte des stations n'est pas encore définie. Le

²⁶ Dont des constructeurs automobiles - par exemple DaimlerChrysler, Ford Motor Company ou Honda - des compagnies pétrolières - par exemple BP ou Chevron - des agences californiennes et gouvernementales comme the California Air Resources Board, the US Department of Energy, the US Department of Transportation ou encore the US Environmental Protection Agency.

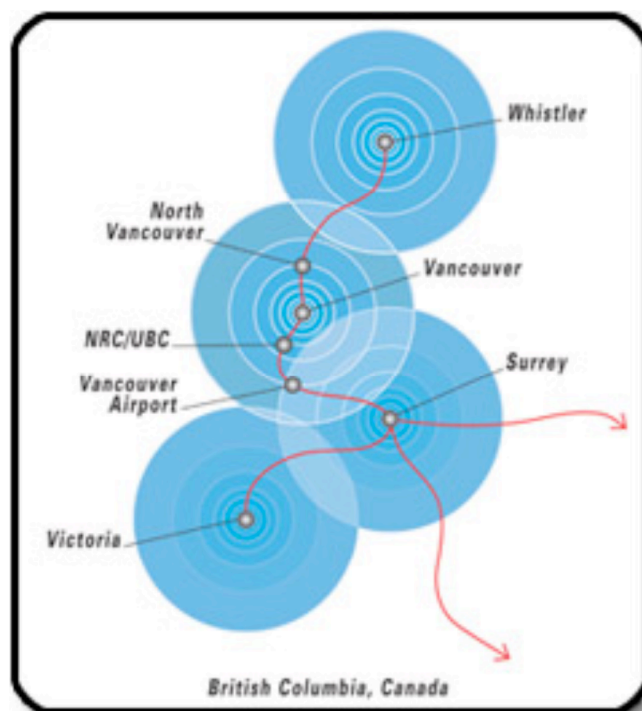
²⁷ AIE, 2004, *Comparative Review of National Programs on Hydrogen and Fuel Cells R&D (2nd Draft)*, Hydrogen Co-ordination Group, Juin.

budget prévu est de 54 millions de \$ pour les cinq prochaines années. Ces fonds proviendront de partenariat entre l'État et l'industrie.

En Norvège, une autoroute à hydrogène²⁸ de 580 km va être construite entre Oslo et Stavanger entre 2005 et 2008, sur une initiative de l'État et après un vote du Parlement. 4,6 M\$ de financement public seront dédiés au projet HyNor. Ce projet concerne plusieurs moyens de transport : bus, taxis et voitures privées, ainsi que plusieurs systèmes de transports : urbain, inter-villes, régionaux et nationaux.

Au Canada, la mise en place d'une autoroute à hydrogène est inscrite dans la perspective des Jeux Olympiques de Vancouver en 2010. Il s'agit d'un programme de démonstration et de déploiement à grande échelle visant à accélérer la commercialisation de l'hydrogène et des technologies de piles à combustible via le développement d'une masse critique d'expertise, et de connaissances. 1,1 millions de dollars canadiens de financement ont été annoncés en 2004.

Figure 9 : Le tracé de l'autoroute de l'hydrogène de Vancouver



L'autoroute s'articule autour de 7 nœuds, chacun avec des projets de microcosme durable autour d'une infrastructure de l'hydrogène comme carburant ainsi qu'avec un éventail d'applications dans les transports et le stationnaire. Le projet s'appuie notamment sur des industriels (Methanex Corporation, BC Hydro), l'Institut d'Innovation en Piles à Combustible (NRC-IFCI) et Fuel Cells Canada (une association industrielle nationale à but non lucratif).

Il existe également un projet de village à hydrogène de Toronto, au Canada, qui doit fournir l'occasion de montrer la viabilité des applications possibles des PàC dans un

²⁸ <http://www.hynor.no/eng/>