



Agence Nationale de la Recherche

Appel à Projets de Recherche et d'Innovation 2005

Plan d'Action National sur l'Hydrogène et les piles à combustible

PAN-H

**Date limite de dépôt des dossiers :
Vendredi 10 juin 2005**



Appel à Projets de Recherche et d'Innovation 2005

Sommaire

1. INTRODUCTION

2. CADRE ET TERMINOLOGIE DE L'APPEL A PROJETS

3. CONTENU SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

3.1 Programme "Systèmes piles"

A - Filière "Pile à Membrane Polymère" (PEMFC)

Lot 1 : Assemblage Membrane-Electrodes (AME)

Lot 2 : Plaques bipolaires, éléments de connexion et piles

Lot 3 : Composants et auxiliaires

Lot 4 : Electronique, capteurs, contrôle commande

Lot 5 : Intégration de prototype (pile et système)

Lot 6 : Evaluation et expérimentation (laboratoire / banc d'essais)

Lot 7 : Expérimentation de terrain

B - Filière "Pile à Oxyde Solide" (SOFC)

Lot 1 : Développement d'une cellule SOFC

Lot 2 : Développement de piles SOFC

Lot 3 : Développement et qualification des auxiliaires du système SOFC

Lot 4 : Intégration et validation expérimentale d'un système prototype

Lot 5 : Expérimentation de terrain

C - Filière "Pile à Membrane Céramique Protonique" (PCFC)

Lot 1 : Electrolyte et électrodes

Lot 2 : Elaboration

3.2 Programme "Stockage embarqué et sécurité de l'hydrogène"

A - Stockage sous forme de gaz comprimé à très haute pression

Lot 1 : Fabrication industrielle de réservoirs et de connecteurs à très haute pression

Lot 2 : Centre de tests pour systèmes à 700 bars

Lot 3 : Matériaux de haute performance pour liners et structures composites

B - Stockage par adsorption et sous forme d'hydrures

Lot 1 : Composés intermétalliques

Lot 2 : Borohydrures

Lot 3 : Alanates et nitrures métalliques

C - Sécurité des installations

Lot 1 : Fuites et risques de détonation en milieu confiné

Lot 2 : Capteurs et réseaux de détection de fuite

3.3 Programme "Transport et distribution"

A - Matériaux des réseaux de transport et de distribution

Lot 1 : Réseaux de transport - Caractérisation des aciers en présence d'hydrogène moléculaire

Lot 2 : Réseaux de transport - Pertes de charges et revêtements de tube en hydrogène pur

Lot 3 : Réseaux de transport - Compréhension des phénomènes de fragilisation des métaux par l'hydrogène

Lot 4 : Réseaux de transport - Préconisations, mise à jour des critères et méthodes d'inspection et de réparation

Lot 5 : Réseaux de distribution - Propositions de nouvelles solutions de réseaux de distribution adaptées et validation

Lot 6 : Réseaux de distribution - Critères d'inspection et de réparation

B - Equipements des réseaux hydrogène et utilisations

Lot 1 : Equipements de réseaux - Compresseurs

Lot 2 : Equipements de réseaux - Compteurs transport et distribution, détendeurs/régulateurs, vannes et raccords)

Lot 3 : Utilisations - Fours industriels

Lot 4 : Utilisations - Chaudières et gazinières

Lot 5 : Utilisations - Moteurs et turbines stationnaires (cogénération)

C - Modèle de déploiement et données technico-économiques

Lot 1 : Etat de l'art et modèle de déploiement

3.4 Programme "Production d'hydrogène"

Lot 1 : Electrolyse à haute température

Lot 2 : Electrolyse à haute pression

Lot 3 : Cycles thermochimiques

3.5 Programme "Projets et activités transverses"

A - Technico et socio-économie

Lot 1 : Représentation du "système hydrogène" et prospective technico-économique

Lot 2 : Représentation du progrès technique et de l'innovation

Lot 3 : Sécurité et acceptabilité sociale de l'hydrogène

B - Education et formation

Lot 1 : Kits technologiques pédagogiques

4. PROCEDURE MISE EN ŒUVRE

4.1 Critères de recevabilité

4.2 Critères d'évaluation et de sélection

4.3 Règles de financement public

4.4 Procédure de soumission

1. INTRODUCTION

Ce document résulte des travaux d'un groupe coordonné par le Ministère délégué à la Recherche (DT A4) qui réunit depuis avril 2004 les acteurs français de l'industrie et des organismes de recherche publique dans le domaine de l'hydrogène énergétique et des piles à combustible. Les travaux du groupe visent à définir une stratégie de recherche, de développement technologique et d'innovation et de déploiement commune s'appuyant sur des engagements industriels, tout en tirant profit du retour d'expérience du réseau PACo.

Le groupe a finalisé le 4 octobre 2004 un texte collectif synthétique de 4 pages contenant ses propositions pour élaborer un plan d'action national sur l'hydrogène et les piles à combustible (PAN-H). Ce texte a été inclus dans le document produit par le groupe interministériel chargé de donner une suite opérationnelle au rapport Chambolle sur les nouvelles technologies de l'énergie (NTE). Le groupe PAN-H s'est réuni de nouveau au 1^{er} trimestre 2005 pour faire le point sur les projets prioritaires à financer en 2005 et les années suivantes, en particulier ceux devant faire l'objet d'un 1^{er} appel à projets dès le 2^{ème} trimestre 2005, dans le cadre de l'ANR.

Le présent document décrit donc le cadre, la terminologie et le contenu scientifique et technique de ce 1^{er} appel à projets, de même que la procédure mise en œuvre pour l'éligibilité, l'évaluation, la sélection, le co-financement et la soumission des projets.

2. CADRE ET TERMINOLOGIE DE L'APPEL A PROJETS

Le plan d'action PAN-H vise à développer une filière industrielle de l'hydrogène et des piles à combustible compatible avec les contraintes de l'usage automobile sur le long terme. Il favorisera également le déploiement de ces technologies dans des marchés considérés comme moins exigeants à plus court terme (applications stationnaires de micro-cogénération, groupe de secours, production électrique décentralisée, transports collectifs, autres niches comme les applications portables ...) qui permettront, en créant des filières industrielles ayant leur propre dynamique, de préparer le marché automobile. Le livrable industriel, visible et fédérateur, sera l'installation de 55 MW d'ici 2010, pour arriver à un minimum de 20 MW/an installés à partir de 2010. A cette date, il s'agira essentiellement d'applications stationnaires et autres applications de niches.

Ce plan définit 5 programmes de recherche et d'innovation détaillés dans le chapitre 3 ci-après : "Systèmes piles", "Stockage embarqué et sécurité de l'hydrogène", "Transport et distribution d'hydrogène", "Production d'hydrogène", "Activités transverses du plan d'action".

Le plan d'action PAN-H caractérise les projets de recherche et d'innovation selon leur nature. Il peut s'agir de projets :

- de **recherche exploratoire** (RE), conduite sur la base d'un cahier des charges industriel ;
- de **recherche et développement technologique** (RDT) ;
- de **prototypage et expérimentation** (PEX), incluant les étapes de validation expérimentale et de retour d'expérience ;
- d'**industrialisation**, incluant la mise au point d'un procédé industriel pour fabriquer des produits ;
- de **démonstration industrielle**, pour l'utilisateur final, des produits fabriqués, ce qui constitue la phase pré-commerciale de développement du marché correspondant ;
- de **déploiement commercial** des produits industriels.

Il est essentiel de toujours conserver une cohérence d'ensemble du plan d'action, indépendamment de la (des) structure(s) de co-financement public retenue(s), qu'il s'agisse de l'ANR ou d'une autre structure (ADEME, A2I ...). Mais des modalités de mise en œuvre adaptées sont à définir pour les projets relevant de telle ou telle structure. A ce stade, dans la mesure où ce premier appel à projets correspond plus particulièrement au budget ouvert par l'ANR, seuls les projets de nature RE, RDT et PEX sont présentés ici. Ces derniers relèvent formellement de la recherche industrielle selon la terminologie du Journal officiel de l'Union européenne (JOCE 28/02/2004, L 63/23).

Le plan d'action PAN-H se déroule sur plusieurs années (2005-2010). Ce premier appel à projets devrait être suivi d'autres appels à projets, soutenus par l'ANR ou d'autres structures. Dans ce document, les projets peuvent donc être **pluriannuels** (durée maximale de 3 ans), soit de type **fédérateur** (FED, projet fédérant et mutualisant les compétences pertinentes sur le sujet, éventuellement organisé en sous-projets complémentaires), soit de type **spécifique** SPEC (l'appel à projets peut porter sur un ensemble de variantes du même projet). Ils visent les applications aux **transports** (TRA), aux systèmes **stationnaires** (STA) ou restent **génériques** (GEN).

En complément des 4 programmes technologiques explorant la filière énergétique de la production à l'utilisation de l'hydrogène, le plan d'action PAN-H comporte un 5^{ème} programme incluant les projets et activités transverses, liés à la normalisation et la réglementation des technologies, aux aspects technico et socio-économiques de la filière, à la veille scientifique et technique, et à la gestion et l'animation du plan d'action. L'appel à projets est donc ouvert aux équipes des sciences économiques et des sciences humaines et sociales.

3. CONTENU SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Chaque programme de PAN-H est décrit ci-dessous, en utilisant, pour chaque projet RE, RDT ou PEX, la nomenclature suivante :

Programme / Lot / Nature du projet (RE, RDT, PEX) / Type de projet (FED, SPEC) / Application (générique, transport, stationnaire).

Les projets sont identifiés à partir des verrous scientifiques et/ou techniques à lever, en bénéficiant notamment du retour d'expérience et des connaissances acquis par les acteurs français de l'industrie et de la recherche publique dans le cadre du réseau PACo.

Toutes les propositions de projets devront intégrer dans leurs descriptions des aspects liés à l'état de l'art et au benchmarking international, aux perspectives et retombées technico-économiques (par exemple : potentiel de réduction des coûts, filières d'industrialisation possibles) et aux impacts sur la santé, la sécurité et l'environnement (management du cycle de vie).

3.1 Programme "Systemes piles"

Ce programme est doté d'une enveloppe budgétaire indicative égale à **70% de l'enveloppe budgétaire globale de PAN-H** pour ce 1^{er} appel à projets.

Contexte général

Le **programme "Systemes piles"** traite de la maîtrise et du développement de l'ensemble des éléments du système pile, du traitement du combustible à la fourniture d'électricité : préparation et purification du combustible pour le cœur de pile, cœur de pile, composants, auxiliaires, sous-systèmes et intégration du système. La participation des industriels des composants des "systemes piles" sera recherchée, de même que celle des intégrateurs de systèmes à côté de celle des organismes nationaux de recherche. **Les projets de recherche (RE et RDT) sélectionnés seront obligatoirement pilotés sur la base de cahiers des charges industriels**

L'appel à projets est principalement consacré ici à la **filière des piles à membrane polymère échangeuse de protons, PEMFC**, à hauteur d'environ **80 % du budget** affecté à ce programme (soit 56% du budget global de PAN-H), deux autres filières technologiques étant également retenues :

- la filière des **piles à oxydes solides (SOFC)**, à hauteur d'environ **15%** du budget du programme (soit 10,5% du budget global de PAN-H) ;
- La filière des **piles à membrane céramique conducteur protonique (PCFC)**, à hauteur d'environ **5%** du budget du programme (soit 3,5% du budget global de PAN-H).

Les projets proposés devront contribuer clairement à lever les principaux verrous, techniques et économiques, identifiés sur les filières proposées, avec en particulier :

- pour les applications automobiles, le démarrage à froid (matériaux et stratégie système) afin d'assurer des conditions de fonctionnement satisfaisantes à partir de températures négatives (jusqu'à -20°C, voire en-deçà) ;
- la durée de vie en fonctionnement (> 4 000 h dans des conditions automobiles ; > 40 000h dans des conditions stabilisées avec des cycles d'arrêt/démarrage) ;
- la compacité (kW/L) et la masse (kW/kg) permettant une application aux transports ;
- la connaissance et l'amélioration de l'immunité aux contaminants (air, combustible, matériaux système) ;
- une température de fonctionnement compatible à terme avec une application automobile et pour l'utilisation optimale de la chaleur en co-génération (> 120°C pour une filière PEMFC ou < 700 °C pour une filière SOFC) ;

- et enfin la réduction du coût (cœur de pile, système) pour amener ces technologies à un niveau compétitif par rapport aux technologies en concurrence (applications stationnaires ou automobiles).

Il est reconnu que le marché automobile de masse ne pourra être atteint que si des applications stationnaires et/ou de niche dans les transports émergent à un horizon de 5 à 10 ans, créant les conditions de maturité technique et économique propices à un déploiement des technologies dans l'industrie automobile.

A - Filière "Pile à Membrane Polymère" (PEMFC)

Contexte

La technologie PEMFC est aujourd'hui la plus avancée. Néanmoins, il reste des freins majeurs qui limitent son développement, tant pour les applications aux transports que stationnaires.

Concernant les Assemblages Membrane-Electrodes (AME), les industriels spécialistes livrent aujourd'hui des assemblages jusqu'à 7 couches, principalement à base de Nafion, et fonctionnant jusqu'à une température maximale de 100°C. Il n'existe pas pour le moment d'acteur national majeur dans ce secteur industriel et les AME proviennent essentiellement du continent Nord-Américain, du Japon et d'Allemagne. Les membranes fonctionnant aux températures standard sont à un stade de fin de prototypage, voire de pré-industrialisation mais leur fiabilité et leur objectif de coût ne sont pas encore complètement démontrés.

Il n'existe pas ou peu de retour d'expérience sur les performances aux limites, en particulier la température (tenue à froid), et sur les aspects relatifs aux contaminants. Il faut alors établir avec les fabricants d'AME les conditions permettant de garantir leurs produits lorsqu'ils sont mis en situation dans un système, et pour ce faire des méthodes et protocoles d'évaluation standardisés sont nécessaires.

Pour aller vers les applications automobiles et stationnaires en cogénération, des AME fonctionnant à plus haute température sont requises. La montée en température est programmée en poussant les AME de type Nafion d'abord jusqu'aux températures limites (vers 100 °C) et il faudra, pour cela, s'appuyer avant tout sur les industriels spécialisés. Pour les températures supérieures, jusqu'à 150°C voire au-delà, des ruptures technologiques sont attendues, requérant une contribution forte de la recherche de base à côté des industriels spécialisés.

Des plaques bipolaires en graphite et en matériau composite sont obtenues par des procédés encore coûteux et il n'existe aucun fournisseur sur le territoire national actuellement. Des travaux de R&D prometteurs utilisant des procédés bas coûts sont néanmoins en cours en France et pourraient aboutir à des réductions notables dans le coût de fabrication des plaques composites. Des travaux existent sur les plaques métalliques et autres alliages obtenus par emboutissage, repoussage ou à partir de structures complexes (poreuses) mais le principal obstacle reste la tenue à la corrosion et ses conséquences sur les performances de l'AME qui peuvent être irréversibles. Des programmes de R&D sont nécessaires pour comprendre ces mécanismes de dégradation en environnement de pile, augmenter les performances en améliorant les transferts thermiques, fluidiques... et en développant de nouveaux matériaux et concepts.

La fourniture en hydrogène des piles PEMFC, aussi bien à partir de stockage que de reformage, doit être mutuellement intégrée avec la pile pour obtenir des systèmes performants, notamment en ce qui concerne la qualité de l'hydrogène produit et la tolérance de la PEMFC à la dilution et aux impuretés (CO, H₂S...).

Les auxiliaires actuels (compresseur, échangeur thermique, humidificateur, débitmètre...) ne sont pas adaptés en termes de compacité, masse et rendement énergétique. Il est nécessaire d'optimiser les caractéristiques de ces éléments pour permettre une intégration du système pile. L'étape de traitement du combustible doit également être simplifiée et moins coûteuse.

L'appel à projets vise à soutenir le développement de cette filière par les actions détaillées ci-après.

Lot 1 : Assemblage Membrane-Electrodes (AME)

Lot 1.1: Compréhension des mécanismes

Objectifs de l'appel à projets :

- Compréhension approfondie des différents mécanismes (fonctionnel, réactionnel) à l'origine des performances des AME et des phénomènes de dégradation et/ou de vieillissement ;
- Réduction de la polarisation cathodique ;
- Tenue au froid ;
- Développement d'instrumentation "fine" et d'outils de modélisation de la zone réactionnelle.

Nature du projet : RE (recherche exploratoire).

Application : GEN (générique).

Projet : FED (fédérateur) et/ou SPEC (spécifique).

Lot 1.2 : Matériaux innovants

Lot 1.2.1 : Membrane

Verrous à lever : température de fonctionnement limitée à 95°C, humidification nécessaire, faible durée de vie, coût élevé, inadéquation avec les cahiers des charges automobile et stationnaire.

Objectifs de l'appel à projets : développement de membrane Haute Température (120-200°C), à humidité réduite et à durée de vie compatible avec les cahiers des charges, incluant ultérieurement le développement d'électrodes adaptées.

Nature du projet : RE (recherche exploratoire).

Application : GEN (générique).

Projet : FED (fédérateur) et/ou SPEC (spécifique).

Lot 1.2.2 : Catalyseurs et électrodes

Verrous à lever : les teneurs en platine (électrocatalyseurs) sont trop élevées et la sensibilité aux contaminants doit être améliorée.

Objectif de l'appel à projets : développement de catalyseurs tolérants aux impuretés et réduction de la teneur en platine ($< 0.1 \text{ mg Pt/cm}^2$).

Nature du projet : RE (recherche exploratoire).

Application : GEN (générique).

Projet : FED (fédérateur).

Lot 1.3 : Conception innovante

Verrous à lever : performances limitées (température limitée à 95°C, humidification nécessaire, faible durée de vie, tenue au froid limitée), coût trop élevé.

Objectif de l'appel à projets : abaisser le coût et augmenter les performances par des conceptions d'architectures, matériaux et procédés de fabrication innovants d'AME (y compris la couche de diffusion), incluant la réduction de la teneur en platine.

Nature du projet : RDT (recherche et développement technologique).

Application : GEN (générique).

Projet : SPEC (spécifique).

Lot 2 : Plaques bipolaires, éléments de connexion et piles

Lot 2.1 : Matériaux et conception

Verrous à lever : coût élevé, densité massique à améliorer, corrosion, fiabilité limitée (nombreuses causes de défaillance possibles à l'échelle de la pile), résistance interne trop élevée, tenue au froid.

Objectif de l'appel à projets : matériaux innovants et procédés de fabrication reproductibles, architecture de pile limitant les facteurs de défaillance, optimisant le coût et les performances.

Nature du projet : RDT (recherche et développement technologique).

Application : GEN (générique).

Projet : SPEC (spécifique).

Lot 2.2 : Distribution des fluides, de la chaleur et des lignes de courant

Verrous à lever : forte sensibilité aux conditions opératoires : humidité, température, distribution des gaz et de charge (courant électrique).

Objectif de l'appel à projets : augmenter les performances en améliorant, par la modélisation, les transferts fluidiques et thermiques et les transferts électriques ; validation expérimentale des modèles développés (écoulement diphasiques...).

Nature du projet : RDT (recherche et développement technologique) et RE (recherche exploratoire).

Application : GEN (générique).

Projet : SPEC (spécifique) et/ou FED (fédérateur).

Lot 2.3 : Intégration de la pile

Verrous à lever : nombreuses causes de défaillance possibles à l'échelle de la pile (ex. stack), processus d'intégration non industriel, reproductibilité de la fabrication, résistance interne globale trop élevée, compacité et masse à réduire, étanchéité, tenue mécanique, serrage, facilité de montage/démontage.

Objectif de l'appel à projets : développer des architectures de pile innovantes, visant spécifiquement les applications suivantes (par ordre de priorité) : transports, stationnaire, autres niches.

Nature du projet : RDT (recherche et développement technologique).

Application : GEN (générique).

Projet : SPEC (spécifique).

Lot 3 : Composants et auxiliaires

Lot 3.1 Système pile : circuit des fluides, intégration thermique

Verrous à lever : faible performance du système (rendement global) due à des auxiliaires non optimisés, fiabilité globale, compacité et masse, étanchéité pendant la durée de vie système.

Objectif de l'appel à projets : développer et/ou qualifier des auxiliaires spécifiques "systèmes piles" afin de disposer d'une "banque d'auxiliaires" et améliorer l'intégration thermique.

Nature du projet : RDT (recherche et développement technologique) et PEX (prototypage et expérimentation).

Applications : TRA (transports) et STA (stationnaire).

Projet : SPEC (spécifique).

Lot 3.2 : Traitement du combustible

Verrous à lever : chaîne de traitement du combustible complexe (diminution du rendement, limitation du temps de réponse, augmentation des facteurs de défaillance).

Objectif de l'appel à projets : développer une chaîne de traitement du combustible simple, peu coûteuse, permettant d'obtenir de l'hydrogène à la qualité requise par la pile :

- Reformage : optimisation des catalyseurs et du procédé ; développement d'autres procédés innovants ;
- Système de purification : membrane de filtration d'hydrogène à faible coût et faible perte de charge ou catalyseurs plus performants et moins chers, membrane de purification intégrée.

Nature du projet : RE (recherche exploratoire), RDT (recherche et développement technologique) et PEX (prototypage et expérimentation).

Applications : TRA (transports) et STA (stationnaire).

Projet : SPEC (spécifique) et/ou FED (fédérateur).

Lot 4 : Electronique, capteurs, contrôle commande

Verrous à lever : durée de vie limitée du système pile (nombreuses causes de défaillance possibles à l'échelle de la pile).

Objectif de l'appel à projets : développer des méthodes de diagnostic fiables utilisant des capteurs adaptés, permettant de limiter l'instrumentation, en vue de la surveillance, la régulation et la maintenance préventive (par exemple : auto-diagnostic en utilisant la pile comme capteur).

Nature du projet : RE (recherche exploratoire), RDT (recherche et développement technologique) et PEX (prototypage et expérimentation).

Applications : GEN (générique).

Projet : SPEC (spécifique) et/ou FED (fédérateur).

Lot 5 : Intégration de prototype (pile et système)

Lot 5.1 : Architecture système

Verrous à lever: complexité du système, coût élevé, masse, compacité.

Objectif de l'appel à projets : développement d'architectures système intégrées et optimisées (fluidique, électrique, thermique) visant les applications suivantes (par ordre de priorité) : transports, stationnaires, autres niches.

Nature du projet : RDT (recherche et développement technologique).

Applications : GEN (générique).

Projet : SPEC (spécifique).

Lot 5.2 : Développement de piles de puissance

Objectif de l'appel à projets : accéder rapidement à des gammes de puissance importantes (> 5 kWe) afin d'acquérir le retour d'expérience et contribuer à la maturité du marché (synergies stationnaire-transport).

Nature du projet : PEX (prototypage et expérimentation).

Applications : GEN (générique).

Projet : SPEC (spécifique).

Lot 6 : Évaluation et expérimentation (laboratoire / banc d'essais)

Lot 6.1 : Contaminants et méthodes analytiques

Verrous à lever : sensibilité aux impuretés (de l'air, de l'eau, du circuit de refroidissement, des gaz) qui limite la durée de vie de la pile et/ou du système.

Objectif de l'appel à projets :

- étude de l'influence des contaminants sur les réponses du système pile ;
- développement de mesures préventives renforçant l'immunité aux contaminants ;
- développement de méthodes analytiques adaptées.

Nature du projet : RE (recherche exploratoire) ou PEX (prototypage et expérimentation).

Applications : GEN (générique).

Projet : SPEC (spécifique) et/ou FED (fédérateur).

Lot 6.2 : Tenue et démarrage à froid et tenue au cyclage

Verrous à lever : sensibilité aux cycles (thermiques, hydriques, mécaniques) qui limite la durée de vie de la pile, problématique spécifique du démarrage à froid.

Objectif de l'appel à projets : évaluer la durée de vie d'une pile en fonctionnement dynamique par des essais spécifiés (cas de suivi de charges, cycles arrêt/démarrage, démarrage à froid...) et développer des procédures de fonctionnement optimisées.

Nature du projet : PEX (prototypage et expérimentation).

Applications : GEN (générique).

Projet : SPEC (spécifique).

Lot 6.3 : Qualification des AME

Verrous à lever : manque de fiabilité, reproductibilité et garanties de fonctionnement des AME pour un cahier des charges donné.

Objectif de l'appel à projets : référentiel d'évaluation des AME en laboratoire et calage avec les données de terrain.

Nature du projet : PEX (prototypage et expérimentation).

Applications : GEN (générique).

Projet : FED (fédérateur).

Lot 7 Expérimentation de terrain

Lot 7.1 : Application aux transports

Verrous à lever : disposer d'objets en vraie grandeur permettant d'accéder au retour d'expérience technologique et fonctionnelle de solutions basées sur des systèmes de piles à combustible.

Objectif de l'appel à projets : développement de systèmes piles adaptés aux transports et expérimentation en vraie grandeur après intégration dans des véhicules.

Nature du projet : RDT (recherche et développement technologique) et/ou PEX (prototypage et expérimentation).

Applications : TRA (transports).

Projet : SPEC (spécifique).

Lot 7.2 : Applications stationnaires et autres niches

Verrous à lever : disposer d'objets en vraie grandeur permettant d'accéder au retour d'expérience technologique et fonctionnelle de solutions basées sur des systèmes de piles à combustible.

Objectif de l'appel à projets : développement, expérimentation et industrialisation en vraie grandeur de solutions de systèmes de piles à combustible répondant au cahier des charges des groupes de secours, de l'électrification de site isolé, de la production décentralisée, de la micro-cogénération ou autres applications de niches ; un couplage avec des énergies renouvelable pourra être recherché.

Nature du projet : RDT (recherche et développement technologique), PEX (prototypage et expérimentation).

Applications : STA (stationnaire), autres niches.

Projet : SPEC (spécifique).

B - Filière "Pile à Oxyde Solide" (SOFC)

Contexte

Pour les applications stationnaires (micro-cogénération, cogénération industrielle ou production électrique décentralisée), la technologie SOFC présente des avantages non négligeables qui pourraient la rendre compétitive par rapport à la technologie PEMFC :

- Rendement électrique élevé : 40- 60% ;
- Qualité de la chaleur disponible à un niveau de température élevé pour les applications en cogénération et trigénération ;
- Flexibilité du combustible : gaz naturel, gaz de synthèse ($H_2 + CO$) issu de la biomasse, biogaz ($CH_4 + CO_2$), huile végétale... ;
- Diminution de la complexité du système par reformage interne.

Dans le domaine du transport (aéronautique, maritime, transport terrestre lourd), la SOFC présente également un atout pour les auxiliaires de puissance, avec une capacité à s'adapter aux carburants actuels après reformage.

Il reste cependant des freins majeurs, liés au fonctionnement à haute température de cette technologie, qui limitent son développement : dégradation rapide des composants à haute température, cyclage thermique limité et temps de démarrage élevé, coût des matériaux, coût d'élaboration et de mise en forme.

L'appel à projets sur la filière SOFC a pour ambition de lever les verrous de cette technologie en abaissant la température de fonctionnement et en concevant une architecture de cœur de pile limitant les contraintes mécaniques.

Lot 1 : Développement d'une cellule SOFC

Lot 1.1 : Matériaux de cellules

Verrous à lever : température de fonctionnement trop élevée (1000°C), coûts de matériaux et de procédés élevés, cyclage thermique limité.

Objectifs de l'appel à projets :

- Développement de matériaux de cellules à température intermédiaire (< 750 °C), de matériaux de cellules à coefficient de dilatation thermique optimisé (électrodes, électrolyte) ;
- Développement de matériaux d'anode résistants au cycle redox, et aux autres carburants que l'hydrogène pur (gaz naturel, reformat d'hydrocarbures divers, gaz de biomasse...), ce qui inclut notamment la résistance aux impuretés (soufre) et au "cokage".

Nature du projet : RE (recherche exploratoire).

Applications : STA (stationnaire) et TRA (transports).

Projet : FED (fédérateur) et/ou SPEC (spécifique).

Lot 1.2 : Conception de cellules innovantes

Verrous à lever : réduire l'épaisseur des cellules pour conserver un bon rendement en fonctionnement à plus basse température, coût de procédé élevé, cyclage thermique limité.

Objectifs de l'appel à projets :

- Abaisser le coût et augmenter les performances par des conceptions d'architectures et des procédés de fabrication innovants ;

- Elaborer à l'échelle industrielle une cellule à partir de méthodes de fabrication performantes, reproductibles et à faible coût.

Nature du projet : RDT (recherche et développement technologique).

Applications : STA (stationnaire) et TRA (transports).

Projet : SPEC (spécifique).

Lot 2 : Développement de piles SOFC

Verrous à lever : problème d'étanchéité aux gaz, forte sensibilité aux variations de conditions opératoires (température, distribution de gaz et courant électrique), coût élevé, cyclage thermique limité.

Objectifs de l'appel à projets :

- Développement de plaques d'interconnexion métalliques moins coûteuses que les matériaux céramiques ;
- Développement de joints pour sceller les cellules SOFC (éventuellement joints permettant la démontabilité en vue d'un recyclage des cœurs de pile) ;
- Améliorer les transferts fluidiques et thermiques par la modélisation pour augmenter les performances ;
- Développer une architecture de pile limitant les contraintes mécaniques et intégrant les cellules développées dans le lot 1.2.

Nature du projet : RDT (recherche et développement technologique).

Applications : STA (stationnaire) et TRA (transports).

Projet : SPEC (spécifique).

Lot 3 : Développement et qualification des auxiliaires du système SOFC

Verrous à lever : coût élevé et faible durée de vie des auxiliaires SOFC.

Objectifs de l'appel à projets :

- Développer des auxiliaires spécifiques pour SOFC : échangeurs thermiques à haute température ;
- Développer un système de désulfuration ne nécessitant ni H₂ ni l'utilisation de charbon actif ;
- Qualifier les circulateurs /compresseurs d'air et combustible.

Nature du projet : RDT (recherche et développement technologique).

Applications : STA (stationnaire) et TRA (transports).

Projet : SPEC (spécifique).

Lot 4 : Intégration et validation expérimentale d'un système prototype

Lot 4.1 : Intégration d'un prototype

Verrous à lever : complexité du système, coût élevé.

Objectifs de l'appel à projets : développer une architecture système sur la base des cellules innovantes fonctionnant à température intermédiaire et à reformage interne.

Nature du projet : PEX (prototypage et expérimentation).

Applications : STA (stationnaire) et TRA (transports).

Projet : SPEC (spécifique).

Lot 4.2 : Evaluation et expérimentation

Verrous à lever : sensibilité aux cyclages thermiques qui limitent la durée de vie du système dans les conditions de fonctionnement.

Objectifs de l'appel à projets :

- Evaluer par des essais la durée de vie d'un stack en fonctionnement dynamique (cas de suivi de charges, cycles arrêt/démarrage...);
- Développer des procédures de fonctionnement optimisées (maintien en température, montée progressive en température...) en fonction de l'application.

Nature du projet : PEX (prototypage et expérimentation).

Applications : STA (stationnaire) et TRA (transports).

Projet : SPEC (spécifique).

Lot 5 : Expérimentation de terrain

Verrous à lever : manque de retour d'expérience (contraintes, spécifications...) sur l'adéquation technologique et fonctionnelle du système de pile à combustible SOFC pour diverses applications : auxiliaire de puissance dans le transport, micro-cogénération, cogénération couplée à une turbine à gaz ou à la gazéification de la biomasse.

Objectif de l'appel à projets : expérimentation d'un système SOFC de cogénération avec reformage interne de gaz naturel dans les conditions réelles de l'application.

Nature du projet : PEX (prototypage et expérimentation).

Applications : STA (stationnaire).

Projet : SPEC (spécifique).

C - Filière "Pile à Membrane Céramique Protonique" (PCFC)

Contexte

La limitation d'un fonctionnement durable des piles à combustible, tant dans les applications stationnaires que dans les applications automobiles, tournent autour d'un paramètre clé : la température de fonctionnement. Pour les SOFC, des performances raisonnables se situent au-dessus de 750°C avec le risque d'une durée de vie réduite du fait du cyclage thermique extrême. Dans ce cas, les recherches visent à abaisser la température de fonctionnement en dessous de 750°C. Pour les PEMFC, les dernières recherches ont montré l'intérêt d'opérer à des températures au-delà de 120°C pour un gain de performances (cinétique des réactions d'électrodes plus élevée, meilleure tolérance au CO) et une meilleure utilisation de la chaleur dégagée (meilleure intégration du procédé de reformage, meilleure évacuation de la chaleur en excès). Une élévation de la température est néanmoins critique lorsqu'on utilise des polymères électrolytes classiques (fluorés type Nafion ou

non fluorés type polymères organiques sulfonés) sensibles au taux d'humidité du milieu qui influe sur leurs propriétés conductrices protoniques et leur stabilité mécanique.

Le développement de matériaux céramiques susceptibles d'être conducteurs protoniques dans le domaine de température intermédiaire (400-600°C) semble être une voie prometteuse. En effet, à ces niveaux de température, de nombreux avantages sont constatés :

- des matériaux standard sont disponibles pour la fabrication des cellules (métal, joints), ayant pour conséquence une réduction importante du coût de fabrication ;
- l'efficacité de conversion d'énergie est plus élevée que celle d'une PEMFC ;
- l'empoisonnement des électrodes par le CO est fortement diminué, voire supprimé...

L'objectif de l'appel à projets "Cellule PCFC" est d'engager des travaux de recherche qui visent à développer de nouveaux matériaux, à les optimiser et à les intégrer dans un système de pile à combustible dans ce domaine de température.

Lot 1 : Electrolyte et électrodes

Verrous à lever : peu de matériaux d'électrolyte connus aujourd'hui répondant au cahier des charges d'une cellule (conductivité ionique, électronique, résistance aux cycles redox, stabilité à l'humidité...) dans le domaine de température 400-600°C, manque de retour d'expérience sur la compréhension des mécanismes de conduction protonique de matériaux céramiques dans ce domaine de température.

Objectif de l'appel à projets : études des mécanismes de conduction protonique et des interfaces électrode/électrolyte par modélisation moléculaire et sélection de matériaux d'électrodes et matériaux conducteurs protoniques prometteurs.

Nature du projet : RE (recherche exploratoire).

Application : GEN (générique) (synergie avec l'électrolyse).

Projet : FED (fédérateur) et/ou SPEC (spécifique).

Lot 2 : Elaboration

Verrous à lever : inconvénients des PEMFC à basse température et des SOFC à haute température.

Objectif de l'appel à projets : élaboration et mise en forme de matériaux céramiques conducteurs protoniques et d'électrodes opérant entre 400 et 600°C.

Nature du projet : RE (recherche exploratoire).

Application : GEN (générique) (synergie avec l'électrolyse).

Projet : FED (fédérateur) et/ou SPEC (spécifique).

3.2 Programme "Stockage embarqué et sécurité de l'hydrogène"

Ce programme est doté d'une enveloppe budgétaire indicative égale à **10% de l'enveloppe budgétaire globale de PAN-H** pour ce 1^{er} appel à projets.

Contexte général

Les recherches et les développements dans le domaine du stockage de l'hydrogène visent d'une part à en augmenter la densité énergétique par une meilleure compacité du réservoir, d'autre part à en augmenter l'énergie spécifique par une diminution du poids du réservoir par rapport à la masse d'hydrogène stockée. En outre, le réservoir doit garantir à la fois une durée de vie minimale du stockage, c'est-à-dire un niveau maximal de fuite d'hydrogène, et un certain niveau de sécurité pendant les opérations normales de remplissage et de soutirage de l'hydrogène, ainsi que dans les situations accidentelles, contre les risques d'inflammation et d'explosion.

On peut schématiquement distinguer plusieurs types de stockage à des degrés de maturité divers et satisfaisant plus ou moins bien les objectifs de performances en terme de densité volumique, d'énergie spécifique, et de sécurité :

- le stockage sous forme de gaz comprimé à très haute pression, en l'occurrence 700 bars ;
- le stockage cryogénique sous forme d'hydrogène liquide à 20 K ;
- le stockage à basse pression par adsorption réversible à température modérée (< 100°C), ou bien sous forme d'hydrures produisant de l'hydrogène par réaction chimique.

Le développement de chaque type de stockage fait intervenir des recherches de base sur des matériaux, la mise au point de composants, d'une connectique et de systèmes adaptés au procédé de remplissage et de soutirage de l'hydrogène et satisfaisant aux critères de sécurité. En outre il est nécessaire d'y associer la conception d'installations de remplissage comme les stations-service, de se doter des moyens adéquats de test et de ré-épreuve des réservoirs. Enfin il convient de mener un travail de fond sur la sécurité et la maîtrise des risques pour toutes les installations dans un environnement d'hydrogène.

Ce premier appel à projets porte sur deux des trois filières de stockage d'hydrogène, le stockage cryogénique n'étant pour le moment pas retenu. En effet, contrairement à ce qui se passe en Allemagne, le développement de réservoirs cryogéniques innovants pour des applications de stockage embarqué n'est pas envisagé par les constructeurs automobiles français. Néanmoins, cette situation pourrait changer si une nouvelle demande se fait jour pour d'autres applications de transport, à savoir le transport spatial en orbite ou pour des missions de longue durée, et le transport aérien ou maritime.

L'appel à projets propose aussi un travail spécifique sur les problèmes de sécurité pour toutes les installations de production, distribution, stockage et utilisation d'hydrogène, avec un volet concernant les risques d'explosion et un autre concernant la détection de fuite.

A - Stockage sous forme de gaz comprimé à très haute pression

Contexte

Deux technologies principales de stockage par voie gazeuse existent :

- les réservoirs composites de type III avec un liner métallique (en aluminium ou en acier) ;
- les réservoirs composites de type IV avec un liner en plastique.

Les réservoirs à 350 bars pour hydrogène sont déjà disponibles auprès de plusieurs sociétés étrangères (Europe, Canada, USA) et en fin de développement en France dans le cadre du projet POLYSTOCK (terminé en novembre 2005) pour des réservoirs de type IV.

L'évolution vers 700 bars est soutenue actuellement en Europe par le projet intégré européen STORHY (démarré en mars 2004 pour une durée de trois ans) qui porte en particulier sur le développement de réservoirs de type IV, et de type III à liner en acier. Le projet comporte aussi des actions sur l'instrumentation et le contrôle pour prévenir les ruptures de fatigue, sur les méthodes de remplissage rapide des réservoirs dans une station-service, sur le recyclage du réservoir en fin de vie et sur les tests de sécurité et la détection de fuites d'hydrogène. Quelques acteurs français participent à STORHY mais les fabricants français de réservoirs composites ou de composants de connectique à haute pression n'en bénéficient pas directement.

La fin du projet français POLYSTOCK en 2005 risque donc de porter un coup d'arrêt à ce développement d'intérêt stratégique en France. De plus, on peut constater que la France ne dispose pas pour le moment d'installation dédiée au test de cyclage et de rupture sous très haute pression (jusqu'à 2000-2500 bars) des réservoirs à 700 bars, alors que ces installations existent en Allemagne (au BAM à Berlin). L'appel à projets vise à soutenir le développement de cette filière par des actions à trois niveaux détaillées ci-après.

Lot 1 : Fabrication industrielle de réservoirs et de connecteurs à très haute pression

Verrous à lever : fabrication de réservoirs composites à haute pression non optimisée et coûteuse.

Objectif de l'appel à projets : développer une fabrication industrielle de réservoirs composites à haute pression (350 et 700 bars), ainsi que des composants associés (vannes, détendeurs, soupapes, connecteurs) compatibles avec l'hydrogène à très haute pression.

On peut donc suggérer des travaux de recherche sur les points suivants :

- conception, réalisation et validation par des tests sous hydrogène à haute pression de prototypes de pièces et de systèmes de connectique pour le remplissage ou le soutirage comportant une innovation significative pour augmenter leur performance et leur fiabilité tout en diminuant leurs encombrements, leurs poids et leur coûts de fabrication ;
- automatisation de postes de travail dans la perspective d'un gain de productivité et d'une baisse de coûts de fabrication des réservoirs : fabrication du liner (rotomoulage ou extrusion multicouche ou réactive pour les liners en plastique, forgeage ou hydroformage pour les liners métalliques, flexibilité dans le changement de dimension des réservoirs et en particulier dans le domaine du liner) ; intégration des embases et des capteurs permettant de prévenir les risques d'explosion du réservoir ; bobinage des fibres de la structure composite (enroulement annulaire avec une tête multiple, dispositifs d'imprégnation de la résine thermodurcissable ...).

Nature du projet : RDT (recherche et développement technologique).

Applications : GEN (générique).

Projet : SPEC (spécifique).

Lot 2 : Centre de tests pour systèmes à 700 bars

Verrous à lever : absence d'installations en France permettant de qualifier des réservoirs jusqu'à 700 bars.

Objectif de l'appel à projets : doter la France d'un centre de tests de réservoirs et de composants sous très haute pression pour la technologie à 700 bars et en présence d'hydrogène. L'installation devra d'abord permettre de procéder à des cyclages dynamiques en pression hydraulique des réservoirs jusqu'à 1,5 fois la pression de service, et aussi des tests de détermination de la pression d'éclatement de réservoirs. Suivant les normes et les réglementations, cette pression d'éclatement doit dépasser 2,35 fois la pression de service pour un stockage embarqué intégré dans le véhicule, et 3 fois la pression de service pour un réservoir transporté par camion. Ceci devra être pris en compte dans la définition du domaine d'excursion en pression du système, et dans la conception de l'installation qui devra offrir toutes les garanties de sécurité et pouvoir être certifiée. En outre, il faut pouvoir effectuer des tests de compatibilité de matériaux ou de perméation sous très haute pression

d'hydrogène. Enfin il s'agit de pouvoir mesurer dans une enceinte close le taux de fuites d'hydrogène et la tenue aux vibrations d'un système complet à la pression de service.

Nature du projet : RDT (recherche et développement technologique).

Applications : GEN (générique).

Projet : FED (fédérateur).

Lot 3 : Matériaux de haute performance pour liners et structures composites

Verrous à lever : Capacités de stockage massique et volumique trop faibles.

Objectif de l'appel à projets : développer et tester de nouveaux matériaux et procédés permettant d'envisager des innovations de rupture dans la fabrication des réservoirs à très haute pression, essentiellement en ce qui concerne l'allègement du réservoir, ceci afin de permettre une augmentation significative de l'énergie spécifique du réservoir et donc de la fraction massique d'hydrogène pour s'approcher du seuil des 10%, sans toutefois pénaliser la densité volumique. Cet allègement peut porter a priori sur trois postes : le liner ; la structure composite et les fibres ; les embases, les vannes et les détendeurs intégrés au col de la bouteille.

On peut donc suggérer des travaux de recherche sur les points suivants :

- Matériau, organique ou inorganique, offrant un taux de perméation d'hydrogène nettement inférieur aux plastiques actuellement utilisés pour les réservoirs de type IV (PE ou PA6) mais présentant des propriétés thermomécaniques, d'élasticité ou de plasticité adéquates pour un liner, une excellente compatibilité avec l'hydrogène, ainsi qu'une bonne résistance à la corrosion en présence d'oxygène et de vapeur d'eau ; on devra aussi prendre en compte la perspective de mise en forme et de coût matériau à long terme ;
- Fibres à très haute résistance dépassant les performances des meilleures fibres de carbone actuelles ; on pourra en particulier proposer de réaliser une démonstration de fabrication de fibres à base de nanotubes de carbone telles qu'on commence à le voir publier depuis quelques années ; une étude technico-économique devra être associée pour évaluer les perspectives de prix de fabrication en grande série.

Nature du projet : RE (recherche exploratoire).

Applications : GEN (générique).

Projet : FED (fédérateur).

B - Stockage par adsorption et sous forme d'hydrures

Contexte

Il existe une grande variété de matériaux permettant un stockage d'hydrogène à faible pression (typiquement inférieure à 10 bars). On peut les classer en plusieurs catégories :

- les matrices nanoporeuses (carbone nanostructuré, céramiques, zéolithes, ou composés organo-métalliques appelés encore MOF pour metal-organic frameworks) offrant une grande surface développée pour la physisorption d'hydrogène, d'autant plus efficace que la température de la matrice est basse, d'où la possibilité de cryo-adsorption à la température de l'azote liquide (77K) ;
- les clathrates d'hydrogène $H_2(H_2O)_2$ qui peuvent être synthétisés à très haute pression (~10 kbar) mais restent stables à la pression atmosphérique jusqu'à ~145 K,
- les composés intermétalliques du type AB₂ (ex. ZrV₂) ou AB₅ (ex. LaNi₅) ;
- les hydrures complexes réversibles tels que les alanates ou les nitrures métalliques ;

- les hydrures chimiques permettant de produire de l'hydrogène par une réaction d'hydrolyse, voire de pyrolyse, irréversible dans des conditions normales de remplissage d'un réservoir, mais dont les sous-produits sont potentiellement recyclables.

L'objet du présent appel à projets n'est pas de lancer un programme tout azimut sur ce thème, mais de susciter quelques actions coordonnées sur certaines pistes pour lesquelles une partie des compétences existent et sont déjà mobilisées dans les laboratoires et dans l'industrie.

Les réservoirs à base de composés intermétalliques sont les plus avancés actuellement et des fabricants sont déjà présents (Canadien-Hera, Américain-Exxon-Mobil, Asiatiques-JSW, Asian Pacific Fuel cells). L'inconvénient de ces composés intermétalliques est que la fraction massique d'hydrogène y reste faible (en général ~ 1% et < 3% dans le meilleur des cas). En revanche, la densité d'énergie volumique que l'on peut atteindre est nettement plus élevée que celle du stockage par gaz comprimé (équivalente à un stockage sous 1800 bars). De plus, ces composés assez stables offrent les conditions d'un stockage assez sûr.

Les autres voies nouvelles de stockage par adsorption réversible peuvent se classer en trois rubriques :

- les matrices de carbone, voire d'oxyde de bore, ou de réseaux organo-métalliques (metal organic frameworks ou MOF) nanoporeux, lesquels peuvent être utilisés pour faire de la cryoadsorption ;
- les hydrures complexes tels que les alanates de sodium ou magnésium ;
- les amides ou imides, de lithium en particulier.

D'autres solutions telles que le stockage sous forme d'hydrures chimiques, qui libèrent de l'hydrogène de manière irréversible par hydrolyse ou par thermolyse, sont étudiées par plusieurs laboratoires et sociétés et certains font déjà l'objet d'offres commerciales et de développement de générateurs d'hydrogène. L'avantage des hydrures chimiques (par exemple, le borohydrure de sodium NaBH_4 ou l'hydrure de magnésium MgH_2) réside dans leur relative innocuité (non-toxicité et absence de risque d'explosion) et la possibilité de fournir de l'hydrogène à la demande. En France, cette voie est examinée avec attention.

Les recherches sur le stockage de l'hydrogène en phase solide font aussi l'objet de plusieurs projets de recherche européens dont le projet STORHY, mais d'autres projets seront soutenus dans le cadre des 6^{ème} et 7^{ème} PCRDT dont le plus récent est le projet NESSHY en cours de négociation.

Compte tenu de cette analyse du contexte, la recherche dans le domaine du stockage par ad(b)sorption et sous forme chimique de l'hydrogène doit se situer à deux niveaux :

- l'élaboration et la caractérisation de nouveaux matériaux, comme les nitrures métalliques (et leurs composés dérivés que sont les imidures et amidures), qui semblent théoriquement capables de répondre aux deux objectifs énoncés plus haut, mais qui nécessitent encore beaucoup de développements,
- la compréhension des problèmes de surface et surtout d'interface entre le matériau utilisé comme catalyseur et le matériau support.

Dans ce cadre, l'appel à projets pour 2005 est constitué des trois lots décrits ci-après. Pour chacun d'eux, au-delà du développement et de la fabrication du matériau de stockage, l'approche système avec la conception du réservoir et son volet sécurité doit être considérée.

Lot 1 : Composés intermétalliques

Verrous à lever : capacité massique faible et conductivité thermique insuffisante.

Objectif de l'appel à projets : développer des composés intermétalliques de type AB₂ et AB₅ de nouvelle génération par des prétraitements physique et chimique pour améliorer la cinétique de désorption d'hydrogène et approcher des températures inférieures à 100°C.

Plus précisément, les projets traiteront des points suivants :

- augmentation de la capacité massique en introduisant des éléments légers dans les composés ou en s'intéressant à de nouveaux composés ternaires tout en conservant des conditions de réversibilité adaptées aux conditions d'utilisation ; le seuil de 2,5% atteint aujourd'hui pour la capacité massique devrait être augmenté ;
- amélioration des cinétiques de réaction par différentes techniques : traitements de surface (chimique, métallurgique...), obtention de nanoparticules (mécanosynthèse)...
- amélioration de la conductivité thermique (mise en forme de la poudre) ;
- compréhension des phénomènes de vieillissement : décrépitation liée à l'augmentation de volume du réseau métallique par l'absorption d'hydrogène, et corrélation avec les propriétés élastiques.

Nature du projet : RE (recherche exploratoire).

Applications : GEN (générique).

Projet : FED (fédérateur).

Lot 2 : Borohydrures

Verrous à lever : conditions de décomposition catalytique des solutions aqueuses de borohydrure mal maîtrisées, coût de production du produit élevé, problème de récupération du borate.

Objectif de l'appel à projets : étude de la filière de stockage chimique dans les borohydrures à partir de l'expérience de NaBH_4 et des possibilités offertes par KBH_4 , en matière de production, de conditionnement et de mise en œuvre, et de récupération, voire de recyclage, des borates.

Plus précisément, les projets traiteront des points suivants :

- potentialités d'une nouvelle filière avec le borohydrure KBH_4 : aspects physico-chimiques et technico-économiques ;
- conditions de décomposition catalytique des solutions aqueuses de borohydrures, choix des catalyseurs ;
- étude de la forme la plus appropriée de gestion et de contrôle de la réaction d'hydrolyse à partir d'une solution aqueuse stabilisée, d'une pâte colloïdale ou de cristaux d'hydrates ; modes de mise en contact avec l'eau et le catalyseur ;
- prototypes de générateurs d'hydrogène à la demande pour des systèmes de piles à combustible embarquées, stationnaires ou portables.

Nature du projet : RDT (recherche et développement technologique).

Applications : GEN (générique).

Projet : SPEC (spécifique).

Lot 3 : Alanates et nitrures métalliques

Verrous à lever : cinétique de désorption et rôle des catalyseurs mal maîtrisés, température de désorption élevée et cinétique lente, conditions de réversibilité mal connues, nature des produits de réactions intermédiaires à éclaircir.

Objectif de l'appel à projets : initier des travaux de recherche sur les alanates et les nitrures métalliques pour comprendre le rôle des catalyseurs sur l'amélioration des cinétiques et/ou des propriétés thermodynamiques des composés en mettant en œuvre des techniques de caractérisation appropriées (diffraction et absorption X, RMN, microscopie électronique à transmission...), étudier de

nouveaux composés présentant des capacités massiques théoriques supérieures à celles actuellement connues (5%).

Plus précisément, les projets traiteront des points suivants :

- origine de la température élevée de désorption (est-ce dû à la cinétique lente du système ou à la stabilité thermodynamique du composé ?) ;
- rôle des additifs sur les cinétiques et/ou les propriétés thermodynamiques des composés ;
- conditions pour qu'une réaction soit réversible (par exemple, formation et stabilisation de clusters d'un composé intermétallique de métal issu de la désorption) ;
- caractérisation d'une réaction de désorption et identification des produits des réactions intermédiaires (décomposition en plusieurs étapes) ;
- développement de nouveaux composés à capacités massiques élevées, selon différentes techniques et avec une caractérisation approfondie.

Nature du projet : RE (recherche exploratoire).

Applications : GEN (générique).

Projet : FED (fédérateur).

C - Sécurité des installations

Contexte

Actuellement la réglementation française sur les installations de production, de distribution et de stockage d'hydrogène ne permet pas de déployer un réseau de stations de remplissage de réservoirs, ni de laisser rouler dans le domaine public des véhicules fonctionnant avec de l'hydrogène comme carburant.

Afin que cette réglementation évolue sur des bases objectives permettant de fournir des réponses aux questions légitimes des opérateurs et du public, il est nécessaire de développer des actions dans deux directions :

- les risques d'explosion dans des situations représentatives, en particulier de milieu urbain et d'espace partiellement confiné. Cela passe par une compréhension de la problématique de fuites d'hydrogène (grands et faibles débits, y compris perméation) en milieu partiellement confiné ou confiné, et des moyens de mitigation (ventilation passive ou active) qu'il conviendrait de déployer afin de limiter le risque ;
- les moyens de détection et d'alarme appropriés, la métrologie des fuites et la sécurité active.

Il est à noter que le champ visé ici ne couvre pas la problématique des matériaux utilisés pour la fabrication des installations (compatibilité des matériaux vis-à-vis de l'hydrogène, taux de perméation) qui est prise en considération dans d'autres parties de l'appel à projets.

Dans ce cadre, l'appel à projets pour 2005 est constitué des deux lots décrits ci-après.

Lot 1 : Fuites et risques de détonation en milieu confiné

Lot 1.1 : Risques en environnement urbain

Verrous à lever : absence de données objectives sur les risques d'explosion en milieu ouvert partiellement confiné.

Objectif de l'appel à projets : offrir un outil de modélisation numérique et/ou phénoménologique avec des validations expérimentales pour décrire :

- les mécanismes de fuites et le comportement de l'hydrogène en milieu confiné ou partiellement confiné ;
- les risques d'explosion ou de transition entre déflagration et détonation, par l'élaboration de critères ou à l'aide de simulations et d'expérimentation.

Le réseau d'excellence européen HYSAFE auquel participe la France intègre déjà des travaux expérimentaux et de modélisation sur l'ignition de jets d'hydrogène sous haute pression, sur le risque d'explosion et sur la transition entre déflagration et détonation. Compte tenu de la spécificité française en matière réglementaire, il est nécessaire de donner à terme à la DPPR (Direction de la Prévention de la Pollution et des Risques) des données objectives sur les risques d'explosion en milieu ouvert partiellement confiné, en fonction d'un débit de fuite et d'une quantité d'hydrogène stockée, ceci afin de mieux définir les distances de sécurité en fonction des sites, des installations et des usages.

Le projet devra en particulier fournir une analyse comparative des divers outils de modélisation disponibles ou en cours de développement. En particulier :

- Pour la problématique d'explosion d'Hydrogène :
 - modèles phénoménologiques : SCOPE , CLICHE ...
 - modèles CFD : EXSIM, FLACS, AutoReaGas ...
 - modèles CFD avancés : CFX-A, COBRA, REACFLOW ...
- Pour la problématique de simulation de fuites et de dispersion H2 :
 - modèles phénoménologiques ;
 - modèles CFD : CFX, FLUENT, CAST3M, ADREA, GASFLOW...

Il est à noter que dans le projet HYSAFE, des benchmarks entre ces différents codes ont lieu avec comme objectif de valider ces outils en vue d'applications à des études de sûreté.

Les conditions aux limites des cas étudiés et simulés devront faire l'objet d'un consensus préalable avec la DPPR et les principaux organismes publics et les industriels ayant une compétence particulière en matière de sécurité de l'hydrogène.

Nature du projet : RE (recherche exploratoire), PEX (prototypage et expérimentation).

Applications : GEN (générique).

Projet : FED (fédérateur).

Lot 1.2 : Risques au niveau d'un véhicule

Verrous à lever : absence de données objectives sur les conséquences de formation d'atmosphère explosive (ATEX) à bord du véhicule.

Objectif de l'appel à projets : offrir un outil de modélisation numérique et/ou phénoménologique avec des validations expérimentales pour décrire les phénomènes de formation d'ATEX à bord d'un véhicule. En particulier :

- Probabilité de formation d'ATEX, suite à différents niveaux de fuites des systèmes à hydrogène embarqués, du niveau de fuite nominale à la grosse fuite suite à une rupture de canalisation ;
- Risque associé à ces ATEX de véhicule (énergie mise en jeu, durée de vie, probabilité d'ignition...);
- Formation d'ATEX dans une canalisation ; ignition, non pas d'un jet d'hydrogène, mais d'un flux d'hydrogène dans une canalisation remplie d'air, ou vice et versa.

Nature du projet : RE (recherche exploratoire).

Applications : GEN (générique).

Projet : FED (fédérateur).

Lot 2 : Capteurs et réseaux de détection de fuite

Verrous à lever : manque de moyens de détection d'hydrogène performants et facilement intégrables aux points d'utilisation et sur les équipements clés du réseau de transport et de distribution (mélange H₂/gaz naturel et H₂ pur).

Objectif de l'appel à projets : disposer d'un système de surveillance, d'alarme et de sécurité active très performant, en particulier en développant un réseau de capteurs d'hydrogène sans fil.

Dans la perspective d'un accès du grand public aux équipements et installations fonctionnant avec de l'hydrogène, il devient de plus en plus important de disposer d'un système de surveillance, d'alarme et de sécurité active très performant. Ceci concerne en particulier les détecteurs d'hydrogène qui doivent être miniaturisés pour pouvoir être implantés au plus près des points d'utilisation, et aussi être multipliés et susceptibles de communiquer à distance dans des réseaux sans fil. On constate actuellement au plan international une activité de développement de micro ou nanocapteurs d'hydrogène, et un début d'application dans des cas concrets. Il existe en France toutes les compétences et les ressources nécessaires pour étudier cette problématique.

Le projet doit permettre de mettre en relation des laboratoires ou des sociétés ayant des compétences particulières sur les micro ou nanocapteurs, la communication RFID, les réseaux. L'accent devra être mis sur :

- les performances du capteur (seuil de détection d'hydrogène dans l'air, temps de réponse) et sur sa robustesse (sensibilité à l'hygrométrie et aux impuretés dans l'air) ;
- l'intégration fonctionnelle et l'alimentation en énergie du capteur dans une plateforme MEMS ;
- la conception et la démonstration d'un réseau de capteurs sans fil sur un site de test ; l'utilisation de capteurs déjà disponibles sur le marché pourra constituer une première étape dans le travail de développement du réseau de capteurs sans fil.

Nature du projet : RDT (recherche et développement technologique).

Applications : GEN (générique).

Projet : FED (fédérateur).

3.3 Programme "Transport et distribution"

Ce programme est doté d'une enveloppe budgétaire indicative égale à **10% de l'enveloppe budgétaire globale de PAN-H** pour ce 1^{er} appel à projets.

Contexte général

L'objectif principal du programme est la détermination des meilleures solutions de déploiement des infrastructures pour la livraison d'hydrogène énergie par des canalisations et la mise en œuvre de ces solutions. Seul le cas du **transport d'hydrogène gazeux** sera considéré ici, et non le transport cryogénique par canalisation (application limitée à des cas très particuliers, tel que celui du secteur spatial).

Deux axes seront considérés :

- les gazoducs d'hydrogène pur (perspective à long terme en ce qui concerne l'hydrogène énergie) ;
- l'introduction progressive d'hydrogène dans les réseaux de gaz naturel existants (scénario de transition).

Le cas du réseau de transport (haute pression, canalisation en acier) sera également bien dissocié de celui du réseau de distribution (basse pression, canalisations en acier et polymères a priori de type polyéthylène).

Au delà des questions de compatibilité technique, le dimensionnement du réseau devra être reconsidéré en tenant compte de la demande en hydrogène énergie et en gaz naturel attendue aux différents horizons de temps. Une recherche d'optimisation des coûts de transport pourra conduire à envisager des pressions encore plus importantes (150 – 200 bars) nécessitant des nuances d'acier plus élevées (X100 – X120), actuellement étudiées dans la communauté gazière pour le transport sur longue distance de gaz naturel à des pressions plus élevées qu'aujourd'hui, ou d'autres matériaux (composites) et une modification des équipements de réseau (compresseurs, détendeurs...).

En ce qui concerne le réseau de distribution, les préoccupations majeures sont les problèmes de vieillissement et de perméabilité du réseau en polyéthylène (165 000 km en France) qui devrait être plus perméable à l'hydrogène qu'au gaz naturel.

Le programme s'appuiera donc sur :

- des études sur les matériaux et équipements visant à comprendre et optimiser leur comportement avec des mélanges d'hydrogène et gaz naturel et avec de l'hydrogène pur ;
- l'élaboration d'un modèle économique simplifié pour le transport et la distribution d'hydrogène par canalisation ;
- des tests de validation sur deux boucles locales de quelques dizaines à centaines de mètres, l'une d'hydrogène pur et l'autre de mélanges de gaz naturel et d'hydrogène, où seront recréées des situations représentatives (canalisation avec des défauts de corrosion et d'agression par des tiers, équipements de réseaux).

Il partira de solutions (matériaux, équipements) mises en œuvre dans les réseaux de gaz naturel et d'hydrogène industriel et cherchera à les optimiser pour la mise à disposition d'hydrogène énergie correspondant à différents scénarios de pénétration à horizon 2030 et 2050. Il s'appuiera sur les connaissances antérieures acquises dans les projets tels que le projet européen NaturalHy et l'on ne mènera des essais que sur des matériaux différents ou des conditions complémentaires. Les scénarios de pénétration du projet HyFrance pourront également être utilisés comme base pour la détermination des débits d'H₂ à véhiculer et des spécifications du produit à livrer. Des accords devront ainsi être conclus au préalable avec les consortiums des projets concernés.

Le programme comporte 3 phases :

- la phase 1 sur la période 2005-2007 est constituée des études sur les matériaux et les équipements ainsi que de l'élaboration du modèle ;
- la phase 2 à partir de 2008 est une validation des études et du modèle sur une expérimentation à l'échelle pilote ;
- la phase 3 vise au déploiement de la solution à grandeur réelle ; elle permettra de porter une attention particulière aux techniques et aux coûts d'exploitation, de maintenance, de surveillance et de réparation du réseau ; une démonstration sera réalisée dans le cadre d'un projet de plus grande ampleur (du type des "Projets Phares" en cours de préparation à la Commission Européenne), afin de connecter les solutions de transport et de distribution retenues à des moyens de production et de consommation d'hydrogène.

A - Matériaux des réseaux de transport et de distribution

Contexte

Les pressions de service des canalisations d'hydrogène (acier, souvent à base de nuance Cr-Mo pour les hautes pressions) varient selon les réseaux et sont comprises, classiquement, entre 3 et 80 bar, avec un diamètre pouvant atteindre 300 mm. D'éventuels problèmes liés à l'exploitation de ces canalisations, destinées à un usage industriel, n'ont pas été répertoriés à ce jour.

Pour les canalisations existantes acheminant le gaz naturel, on distingue :

- les canalisations pour le transport sur moyenne et longue distance, en acier bas carbone (nuance de type C-Mn, parfois micro-allié au Nb - V), pression jusqu'à 85 bar et diamètres jusqu'à 1100 mm ;
- les canalisations pour la distribution, en acier et en polyéthylène en majorité, pression < 4 bar et diamètres < 200 mm.

La définition des réseaux optimaux (diamètre, pression, vitesse de circulation) passe par des spécifications réalistes des réseaux de transport d'hydrogène du futur (débit et distance parcourue, hydrogène pur et mélanges hydrogène – gaz naturel). On rappelle que l'hydrogène, en conditions équivalentes, transporte 3,6 fois moins d'énergie que le gaz naturel, ce qui aurait tendance à augmenter les pressions de service et les vitesses de transmission.

Les travaux proposés dans les lots suivants sont destinés à fournir les connaissances techniques et scientifiques et justifier de nouvelles solutions qui permettront de construire et d'exploiter les futurs réseaux de transport et de distribution d'hydrogène, en ayant un effet d'entraînement sur le tissu industriel et universitaire français.

Lot 1 : Réseaux de transport - Caractérisation des aciers en présence d'hydrogène moléculaire

Verrous à lever : risque de modification des propriétés de l'acier par contact de l'hydrogène avec des défauts créés dans les canalisations (par exemple, endommagement au moment de la construction ou en service par corrosion, agressions mécaniques lors de travaux au cours de l'exploitation, soudures...).

Objectif de l'appel à projets : la présence d'hydrogène moléculaire, en l'absence d'eau libre, n'induit pas a priori de modification dans le comportement statique des aciers. Toutefois, l'hydrogène interagit avec l'acier lorsque celui-ci développe de la déformation plastique résultant de défauts sur les canalisations. Pour tous les cas spécifiques de défauts qui peuvent développer de la plasticité, il est donc nécessaire d'identifier les possibilités d'interaction avec l'hydrogène gazeux et de quantifier l'effet de l'hydrogène sur les propriétés de l'acier.

Le projet doit permettre une mise à jour des propriétés mécaniques des aciers, des ténacités, des seuils d'amorçage et des lois de propagation en fatigue en présence d'hydrogène, en fonction des conditions de service et des défauts rencontrés. Les critères d'acceptabilité des défauts seront ainsi

précisés. A noter que même une canalisation neuve et produite industriellement comporte un nombre de défauts importants à l'échelle du phénomène considéré.

Le projet vise donc à caractériser le comportement mécanique (propriétés de traction), à la rupture immédiate et à la fatigue des aciers de gazoducs et de leurs soudures en présence de mélanges de gaz naturel et d'hydrogène et en présence d'hydrogène pur. Afin d'éviter une duplication des travaux du projet européen Naturalhy, plutôt orienté vers les mélanges de gaz naturel et d'hydrogène et s'intéressant exclusivement aux aciers des réseaux existants, **l'étude devra laisser une part significative à l'hydrogène pur et être étendue aux nuances d'acier très récentes et émergentes** telles que l'X80, l'X100, voire l'X120. Cette gamme d'aciers est a priori plus sensible à l'hydrogène, en particulier au niveau des soudures, des solutions pourront donc être proposées pour résoudre cette éventuelle difficulté. Une réflexion préalable aura lieu sur les types de défauts susceptibles d'être endommageant, incluant les soudures, le traitement thermique appliqué et les impuretés contenues dans l'acier (soufre, phosphore ...).

Ceci nécessite la disponibilité d'équipements de mécanique de la rupture susceptibles de travailler en présence de pressions d'hydrogène sur éprouvettes normalisées et structures intermédiaires (viroles) ou la possibilité de réaliser des essais "de disques". La composition du gaz devra être contrôlée, en particulier il s'agit de ne pas négliger des impuretés à base de soufre par exemple (H₂S...). Les trois aspects - amorçage, propagation de fissure et rupture finale - devront être caractérisés. L'aspect soudure devra faire l'objet d'un effort particulier. Une réflexion aura lieu sur la gamme de températures et la forme des cycles de fatigue (cycles de chargement des réseaux). Ceci pourrait déboucher sur des essais de tronçons de tubes en pression de gaz présentant des défauts (ou des soudures) bien définis.

Nature du projet : RDT (recherche et développement technologique).

Applications : GEN (générique).

Projet : FED (fédérateur) et/ou SPEC (spécifique).

Lot 2 : Réseaux de transport - Pertes de charges et revêtements de tube en hydrogène pur

Verrous à lever : compenser le handicap de l'hydrogène (3,6 fois moins énergétique en volume que le gaz naturel) par une circulation beaucoup plus rapide dans les canalisations.

Objectif de l'appel à projets : proposer des revêtements de canalisations d'hydrogène pur efficaces et caractériser ces canalisations en terme de pertes de charge, dans des conditions énergétiques équivalentes à celles des canalisations de gaz naturel.

Nature du projet : RDT (recherche et développement technologique).

Applications : GEN (générique).

Projet : SPEC (spécifique).

Lot 3 : Réseaux de transport - Compréhension des phénomènes de fragilisation des métaux par l'hydrogène

Verrous à lever : description insuffisante du phénomène de fragilisation des métaux par l'hydrogène.

Objectif de l'appel à projets : promouvoir un effort de recherche pluridisciplinaire et multi échelle sur ce phénomène, si on veut être capable de le décrire et de le prévoir, voire d'y remédier dans le futur. On considèrera ici qu'il s'agit bien d'hydrogène moléculaire.

Les projets déboucheront sur une meilleure description des mécanismes et des liens entre paramètres macroscopiques et microstructure. Plus précisément, ils traiteront des points suivants :

- état de l'art sur la fragilisation par l'hydrogène des métaux et des "soudures" ;

- quantification de la perméation de l'hydrogène gazeux dans l'acier pour plusieurs états d'endommagement et/ou de déformation plastique ;
- meilleure identification des mécanismes des interactions entre hydrogène et microstructure pour la modélisation des phénomènes d'amorçage et de propagation de fissures en présence d'hydrogène (matériaux de modèles de métaux purs, monocristaux et microstructures particulières) ;
- meilleure identification des couplages hydrogène et déformation mécanique en pointe de fissure et autour des défauts, et répercussion sur ceux-ci ;
- meilleure connaissance de l'interaction de l'hydrogène avec les mécanismes de déformation mésoscopiques et d'endommagement (amorçage et propagation des fissures).

Nature de la recherche : RE (recherche exploratoire).

Type d'application : GEN (générique).

Type de projet : FED (fédérateur).

Lot 4 : Réseaux de transport - Préconisations, mise à jour des critères et méthodes d'inspection et de réparation

Objectif de l'appel à projets : à partir des résultats des lots précédents, préconiser les nuances d'acier à utiliser, actualiser les fréquences, la précision et la fiabilité des méthodes d'inspection des réseaux, les critères d'acceptabilité des défauts ainsi que les méthodes de réparation. Les risques nouveaux induits par l'hydrogène seront analysés et les méthodes de prévention préconisées. Un effort de normalisation pourra être entrepris. Un autre résultat attendu est la proposition de programmes d'inspection, de réparation à partir de la simulation de quelques cas d'étude (choix d'aciers, de défauts, de conditions de service).

Nature du projet : RDT (recherche et développement technologique).

Applications : GEN (générique).

Projet : FED (fédérateur).

Lot 5 : Réseaux de distribution - Propositions de nouvelles solutions de réseaux de distribution adaptées et validation

Les réseaux de distribution viennent après les réseaux de transport. Ils distribuent le gaz dans les zones de consommation sous faibles pressions. Antérieurement réalisés en acier ou en fonte, ils sont aujourd'hui constitués de matériaux polymères. Ces matériaux polymères, comme tous les matériaux organiques, sont perméables aux gaz. L'hydrogène étant un gaz particulièrement volatil, les pertes par diffusion seront plus importantes que pour le gaz naturel. Il est donc important de les caractériser et d'en déduire les implications : pertes économiques correspondantes, conséquences et risques associés. De même pour les conditions de vieillissement par compression et décompression. Ce travail est en cours de réalisation dans le cadre du projet Naturalhy et concerne des mélanges de gaz naturel et d'hydrogène renfermant au maximum 20% d'H₂. Il sera complété dans la mesure du nécessaire hors appel à projets.

Verrous à lever : perméabilité des matériaux à l'hydrogène.

Objectif de l'appel à projets : proposer de nouvelles solutions présentant de meilleures propriétés de barrière à l'hydrogène, soit à partir de nouveaux matériaux, soit à partir d'une combinaison de matériaux (multicouches par exemple). Ces solutions devront être compétitives, faciles à mettre en œuvre, ainsi que leurs accessoires (piquages...) et les moyens de raccordement (soudures, collages...).

Des propositions qualifiées de réseaux de distribution adaptés à l'hydrogène techniquement et économiquement viables sont attendues. Plus précisément :

- les nouvelles formulations devront être vérifiées sur le plan de leur vieillissement et de la propagation de fissures ; des essais à l'échelle 1 devront sanctionner la validité des solutions ;
- des caractérisations seront nécessaires en vieillissement et en décompression rapide par exemple, y compris sur les soudures et accessoires, en présence d'hydrogène pur ou de proportions élevées de celui-ci ; l'ensemble de la problématique de joint d'étanchéité devra aussi être évaluée (fuite et perméation de l'hydrogène, risques de gonflement, effets de température...).

Nature de la recherche : RDT (recherche et développement technologique).

Type d'application : GEN (générique).

Type de projet : FED (fédérateur).

Lot 6 : Réseaux de distribution - Critères d'inspection et de réparation

Objectif de l'appel à projets : accompagner la proposition de nouveaux systèmes de réseaux de distribution d'un effort de réflexion sur le suivi en service, les critères d'inspection et de surveillance, ainsi que les procédés de réparation.

Nature de la recherche : RDT (recherche et développement technologique).

Type d'application : GEN (générique).

Type de projet : SPEC (spécifique).

B - Equipements des réseaux d'hydrogène et utilisations

Contexte

Equipements des réseaux

Le déploiement d'une infrastructure de canalisations pour la mise à disposition de grandes quantités d'hydrogène – pur ou en mélange avec le gaz naturel - implique une réflexion sur la compatibilité des équipements tout au long de la chaîne de transport et de distribution et des utilisations en bout de chaîne. Les lots proposés sur les équipements des réseaux (lots 1 et 2) ont pour objectifs de sélectionner les solutions techniques les plus adaptées aux conditions de fonctionnement envisagées (pression, débit, H_2 pur ou gaz naturel avec différents % H_2) et de proposer le cas échéant de nouvelles solutions ou des adaptations pertinentes en partant des solutions existantes sur les réseaux actuels de gaz naturel et d'hydrogène industriel. Les travaux réalisés permettront de caractériser complètement les équipements et de mettre à jour les spécifications, les procédures de maintenance et les études de sécurité.

Utilisations des mélanges de gaz naturel et d'hydrogène

Le scénario d'introduction d'hydrogène dans le réseau de gaz naturel impose de maîtriser la combustion d'un mélange de gaz naturel et d'hydrogène dans les applications traditionnelles du gaz. En effet, même dans le cas de la séparation finale entre hydrogène et gaz naturel, une fraction résiduelle d'hydrogène sera toujours acheminée jusqu'aux utilisations en bout de chaîne.

Les mélanges à forte teneur en hydrogène ne sont pas interchangeables avec le gaz naturel dans la plupart des applications. Pour rendre les applications compatibles, il faudra procéder à des adaptations, pouvant aller d'un simple re-réglage à des modifications de composants (par ex. injecteurs) ou même recourir à un changement de technologie.

La problématique commune des lots décrits ci-après (lots 3, 4 et 5) est la compatibilité des applications aux mélanges à forte teneur en hydrogène et l'effet de l'hydrogène sur le fonctionnement des applications. Les objectifs des lots sont la recherche des limites de fonctionnement des

applications avec différents teneurs en hydrogène, le changement éventuel de composants, l'optimisation des réglages et la mise à jour des spécifications, conditions d'exploitation et de maintenance des installations et des études et procédures de sécurité. Dans certains cas, des innovations technologiques pourront être proposées pour optimiser le fonctionnement d'une application avec le nouveau gaz.

Les critères majeurs à observer, qui se déclinent sur toutes les applications, sont :

- la sécurité ;
- le bon fonctionnement (puissance, qualité de la combustion, absence de retour de flamme...) ;
- le rendement ;
- les performances environnementales ;
- le vieillissement.

Pour l'ensemble des travaux menés dans ce domaine, un couplage à des études de modélisation - en combustion atmosphérique ou sous-pression - pourra être mis en œuvre pour limiter le nombre de points expérimentaux.

Noter que l'utilisation d'hydrogène pur dans les piles à combustible ou les moteurs à combustion interne n'est pas abordée ici.

Lot 1 : Equipements de réseaux - Compresseurs

Objectif de l'appel à projets : proposer les solutions de compression les mieux adaptées aux conditions de fonctionnement envisagées et les caractériser complètement, en terme de performances, coûts, conditions d'exploitation et de maintenance, spécifications et sécurité.

Les facteurs suivants sont en particulier regardés :

- la sécurité des installations ;
- le rendement de compression ;
- la fiabilité du matériel (notamment la question de l'étanchéité) ;
- les coûts d'investissement et de maintenance ;
- la durée de vie.

On envisagera a priori différents types de technologies, incluant les électro, turbo et moto-compresseurs. Les limites de compatibilité des matériels utilisés actuellement pour le gaz naturel avec les mélanges de gaz naturel et d'hydrogène seront explorées et des solutions d'adaptation pourront être proposées. En fonction des conditions d'exploitation fixées, on pourra effectuer :

- un état de l'art des matériels disponibles ;
- des tests de matériels pouvant être couplés à de la modélisation et des propositions d'adaptation et/ou de modification ou de nouvelles solutions ;
- des études de sécurité et de mise aux normes des appareils.

Nature de la recherche : RDT (recherche et développement technologique).

Type d'application : GEN (générique).

Type de projet : SPEC (spécifique).

Lot 2 : Equipements de réseaux - Compteurs transport et distribution, détendeurs/régulateurs, vannes et raccords

Objectif de l'appel à projets : proposer les compteurs, détendeurs/régulateurs, vannes et raccords, les mieux adaptés aux conditions de fonctionnement envisagées et les caractériser complètement, en terme de spécifications, conditions d'exploitation et de maintenance et de sécurité.

En particulier :

- un recensement des matériels existants pour l'hydrogène et le gaz naturel sera effectué ;
- en ce qui concerne les compteurs, on s'intéressera à tous les types existants des réseaux de transport et de distribution de gaz naturel et des applications hydrogène existantes, en excluant les compteurs de distribution à membrane (qui sont déjà étudiés dans le projet NaturalHy) ; on s'intéressera en particulier aux problématiques de la précision de la mesure, des fuites et du vieillissement en présence d'hydrogène ;
- les technologies de détendeurs/régulateurs ainsi que les vannes et raccords spéciaux seront caractérisés sur les critères de coûts, étanchéité, fiabilité, vieillissement.

Nature de la recherche : RDT (recherche et développement technologique).

Type d'application : GEN (générique).

Type de projet : FED (fédérateur).

Lot 3 : Utilisations - Fours industriels

Objectif de l'appel à projets : étudier la compatibilité des fours industriels aux mélanges de gaz naturel et d'hydrogène.

En particulier :

- les matériels étudiés seront ceux qui sont les plus représentatifs des principaux secteurs industriels (verriers, métallurgistes, etc..) ;
- étant donné la taille des applications ciblées, une démarche mixte expérimentale/simulation est visée ; un (des) modèle(s) de combustion existant(s) sera(ont) adapté(s) afin de prendre en compte l'adjonction d'hydrogène dans le gaz naturel ; il sera(ont) validé(s) sur des mesures détaillées effectuées dans une cellule d'essai semi-industrielle ;
- des simulations pourront également être menées pour déterminer, sur un cas concret, la meilleure manière d'introduire l'hydrogène dans un foyer industriel (pré-mélanges GN+H2 ou brûleurs séparés H2 et GN) ;
- l'ensemble de ces résultats sera, si possible, confirmé lors d'essais dans un foyer industriel réel.

Nature de la recherche : RDT (recherche et développement technologique).

Type d'application : STA (stationnaire).

Type de projet : FED (fédérateur).

Lot 4 : Utilisations - Chaudières et gazinières

Objectif de l'appel à projets : étudier la compatibilité des chaudières/gazinières aux mélanges de gaz naturel et d'hydrogène. On exclura les essais sur les chaudières domestiques, déjà étudiées dans le projet NaturalHy et on pourra proposer des systèmes innovants, comme la combustion catalytique.

Nature de la recherche : RDT (recherche et développement technologique).

Type d'application : STA (stationnaire).

Type de projet : SPEC (spécifique).

Lot 5 : Utilisations - Moteurs et turbines stationnaires (cogénération)

Objectif de l'appel à projets : étudier la compatibilité des moteurs/turbines aux mélanges de gaz Naturel et d'hydrogène. Les matériels sélectionnés seront ceux représentatifs du parc de cogénération en France.

Les points suivants seront considérés :

- pour l'application aux moteurs, un dysfonctionnement particulier à considérer est le cliquetis, qui sera favorisé par la présence d'une forte teneur en hydrogène ; il faudra alors avoir recours à des stratégies subtiles de dilution (air, recirculation des gaz d'échappement) ;
- l'usure prématurée de certaines pièces, comme les sièges de soupapes ou les injecteurs sera également à observer ;
- des solutions utilisant des procédés de combustion innovants, pour les moteurs comme pour les turbines pourront être proposées.

Nature de la recherche : RDT (recherche et développement technologique).

Type d'application : STA (stationnaire).

Type de projet : SPEC (spécifique).

C - Modèle de déploiement et données technico-économiques

Lot 1 : Etat de l'art et modèle de déploiement

Objectif de l'appel à projets : évaluer les coûts des réseaux de transport de gaz en fonction de différents paramètres techniques (caractéristiques globales, conditions d'opérations...).

En particulier :

- réalisation d'une synthèse bibliographique des modèles socio-économiques existants ;
- élaboration d'un modèle économique simplifié permettant de calculer, à partir des caractéristiques des réseaux (diamètre, longueur, matériaux ...) :
 - les coûts d'investissements requis par la réalisation des réseaux et infrastructures projetés (y compris les boucles expérimentales) ;
 - les coûts opératoires d'exploitation de ces réseaux ;
 - les coûts de maintenance correspondants ;
- détermination de l'impact des coûts "réseaux" sur le coût final de l'hydrogène distribué à partir des résultats de simulations obtenus avec ce modèle.

Nature de la recherche : RDT (recherche et développement technologique).

Type d'application : GEN (générique).

Type de projet : SPEC (spécifique).

3.4 Programme "Production d'hydrogène"

Ce programme est doté d'une enveloppe budgétaire indicative égale à **8% de l'enveloppe budgétaire globale de PAN-H** pour ce 1^{er} appel à projets.

Contexte général

La France s'est engagée, avec des acteurs industriels et des organismes de recherche publique, dans des projets européens et internationaux visant à développer des technologies innovantes de production d'hydrogène. Ces projets englobent notamment le procédé d'électrolyse de l'eau à haute température (EHT) à finalité industrielle de court/moyen terme et, plus généralement, des procédés à haute température (HT) innovants et durables (non fossiles) de production d'hydrogène (EHT, cycles thermochimiques...) qui pourront utiliser, à long terme, l'énergie fournie par un réacteur nucléaire de génération IV ou l'énergie renouvelable fournie par une centrale solaire à concentration ou une source géothermique.

Les premiers travaux réalisés dans le cadre de ces collaborations internationales ont révélé que les difficultés technologiques s'annonçaient nombreuses et que de nombreux verrous technologiques pouvaient remettre en cause la validité de tel ou tel procédé. Cette thématique a donc été analysée par le groupe PAN-H comme un point fort de la France à préserver et à développer, susceptible de lui donner une avance technologique importante dans le domaine de la production d'hydrogène.

Le programme "Production d'hydrogène" a donc ici pour ambition, pour ce 1^{er} appel à projets, de développer à court terme une technologie EHT décentralisée de quelques kilowatts, tout en engageant une recherche exploratoire sur des procédés de production centralisée d'hydrogène qui utilisent des puissances de plusieurs dizaines de mégawatts et nécessitent probablement des innovations technologiques majeures.

En particulier, les cycles thermochimiques constituent une famille de procédés très étudiée dans de nombreux Pays et la France est aujourd'hui un des acteurs privilégiés dans ce domaine. Le projet de plateforme européenne SUSHYPRO vise à mettre en place d'ici 2010 une plateforme européenne de développement et d'essais pour tester les procédés HT de production d'hydrogène et accélérer le développement des technologies, sans attendre le développement industriel des réacteurs nucléaires du futur. Une synergie intéressante est d'ailleurs en cours d'établissement entre les équipes intéressées par les cycles thermochimiques couplés à un four solaire à concentration de quelques dizaines de mégawatts et celles couplant les cycles thermochimiques à un réacteur nucléaire de génération future.

En complément des technologies HT, l'électrolyse de type PEM fonctionnant à basse température présente l'intérêt de la qualité des gaz produits et d'éviter les risques de pollution du fait de l'absence de circuit KOH (procédé non alcalin). Des électrolyseurs de cette technologie sont aujourd'hui à l'état de prototype, voire de pré-série, et ils s'avèrent impératifs pour les applications décentralisées de couplage avec les énergies renouvelables éolien et photovoltaïque. Hormis le manque de maîtrise et de retour d'expérience de ces technologies en France, l'objectif technologique est de fonctionner en haute pression (>50 bars) afin de simplifier le système en facilitant le stockage des gaz.

Le programme est composé de 3 lots : électrolyse à haute température (lot 1) ; électrolyse à haute pression (lot 2) ; cycles thermochimiques (lot 3).

Lot 1 : Electrolyse à haute température (EHT)

Lot 1.1 : Projet "EHT pour application décentralisée"

Ce projet vise à développer en 3 ans (2005-2008) un électrolyseur EHT de 1 à 5 kW, à haut rendement mais à faible coût (400 €/kWe), en bénéficiant des progrès de la R&DT sur la pile à combustible SOFC. En particulier, le passage de la technologie tubulaire à la technologie plane de la pile SOFC permet de réduire sensiblement les coûts de la pile tout en augmentant ses performances.

Les contraintes technologiques sur les matériaux d'électrodes céramiques et les interconnecteurs métalliques incitent à envisager une gamme de température de 700°C à 800°C afin d'aboutir rapidement à un objet technologique viable démontrant la faisabilité du procédé. Cet objet technologique aura le potentiel d'être couplé directement au réseau électrique ou à une source de chaleur à moyenne ou haute température (géothermique par exemple).

Il comporte 4 parties complémentaires correspondant à des compétences spécifiques :

- conception et élaboration de modules EHT (cellule + interconnecteurs) ;
- étude et réalisation de stacks expérimentaux ;
- études de systèmes (couplage à la source primaire et gestion des produits) ;
- réalisation d'une unité de production d'hydrogène décentralisée (puissance 1 à 5 kW).

Modules EHT

Comme dans le domaine des piles SOFC, la maîtrise de conception et la réalisation d'un module élémentaire constitue un enjeu majeur. C'est principalement au niveau des matériaux et de leur mise en œuvre que les verrous doivent être levés. On profite des avancées technologiques obtenues sur les piles, mais les spécificités de l'EHT nécessitent la mise en œuvre d'un programme sur les matériaux. Les conditions de l'EHT sont sur certains aspects plus sévères que dans le cas des piles :

- les pressions partielles d'oxygène et de vapeur d'eau sont plus élevées ;
- le potentiel de la cathode est plus élevé ;
- l'activité en oxygène est également plus élevée, ce qui entraîne un impact sur la chimie des matériaux, la possibilité de formation de phases secondaires, un risque d'électrolyse secondaire, une corrosion accrue du métal d'interconnexion en présence d'oxygène pur à haute température, un dégagement de gaz plus important.

Les deux sous thèmes suivants ont été identifiés.

Les céramiques conductrices pour électrolyte et électrodes : il est primordial de mobiliser sur cette thématique les laboratoires et industriels susceptibles d'élaborer, mettre en œuvre par différents procédés (plasma, pistoletage, couches minces...), caractériser des céramiques conductrices pour les électrodes et l'électrolyte de la cellule ; les conductivités visées pour atteindre les performances de rendement sont de l'ordre de 10^{-2} S/cm ; la priorité sera donnée dans un premier temps aux applications dans la gamme 700°C-800°C qui est celle où il y a aujourd'hui le plus de données à partir du programme SOFC.

Les matériaux pour plaques d'interconnecteurs : les conditions de fonctionnement en mode EHT donnent des environnements spécifiques sur les interconnecteurs (O_2 coté anode et mélange H_2/H_2O coté cathode) ; ces atmosphères peuvent induire des modifications réactionnelles aux interfaces interconnecteur/électrode affectant les résistances de contact ; un travail sur la corrosion du matériau de plaque et sur les réactions aux interfaces est donc nécessaire ; on essaiera également de substituer au matériau de plaque préconisé pour les SOFC (Haynes 230, etc..) un matériau moins cher et plus aisé à mettre en forme.

Stacks expérimentaux

Il s'agit de concevoir et réaliser des empilements et des stacks de puissances variables (de la centaine de watts au kilowatt). Pour rappel, les fonctions du stack sont :

- la distribution des gaz dans chaque module ;
- les échanges thermiques locaux ;
- la tenue mécanique de l'ensemble et la mise en pression (étanchéité et contacts électriques) ;
- la gestion des interfaces entrées/sorties hydrauliques et électriques avec le reste du système ;
- la gestion des contraintes de sécurité (séparation H_2 , O_2).

Ce cahier des charges fait appel à des laboratoires ou des industriels rompus aux problèmes de montage et d'assemblage (bureau d'études, outillage et réalisation), d'étanchéité et de distribution électrique et hydraulique. Compte tenu des cyclages thermiques, des matériaux employés et des étanchéités à assurer, cette tâche requiert une créativité importante s'appuyant sur une approche thermomécanique locale et globale.

Les solutions préconisées doivent prendre en compte, dès la conception, les contraintes d'une industrialisation (faisabilité, coûts). Il est donc important d'associer des acteurs industriels (des échangeurs thermiques par exemple) à cette partie du projet.

Etudes de systèmes

Le stack constitue le cœur de l'unité de production d'hydrogène et assure la transformation par voie électrochimique de l'eau en hydrogène et oxygène.

Concernant la gestion des gaz et de la chaleur, il nécessite en amont de vaporiser et réchauffer de l'eau, puis en aval de séparer l'hydrogène et l'oxygène de la vapeur d'eau, et de conditionner l'hydrogène (pureté, pression) pour l'utilisation ultérieure. Les solutions thermohydrauliques retenues dépendront naturellement des sources thermiques (électrique, géothermique, etc...) et hydriques (qualité de l'eau). Les compétences requises pour la réalisation de ces études relèvent de la thermohydraulique, du génie énergétique, et du génie des procédés.

La gestion électrique de l'électrolyse requiert également un conditionnement de la source utilisée. On doit pouvoir disposer d'un courant continu régulé en intensité et en tension (basse tension). Cette remarque est particulièrement importante dans le cas d'un couplage à une énergie renouvelable (éolien, géothermie, photovoltaïque, etc..).

Un dernier point concerne le contrôle-commande de l'ensemble qui requiert une étude de modélisation du fonctionnement du système dans l'ensemble de ses phases de fonctionnement (nominal, arrêt/démarrage, transitoire, accidentel). Les possibilités de régulation électrique (courant, tension) et thermique seront explorées et mise en œuvre par des industriels de ce domaine de compétences.

Réalisation d'une unité de production décentralisée

La démonstration technologique d'une production d'hydrogène décentralisée par électrolyse à haute température nécessite d'intégrer l'ensemble des travaux précédents au travers d'une unité de production couplée à une source thermique. Outre la quantification des performances globales, cette démonstration validera la faisabilité industrielle des solutions retenues et alimentera une analyse technico-économique de la filière.

A ce stade, il sera important de s'assurer des compétences d'industriels capables d'assurer l'intégration des composants.

Nature du projet : RDT (recherche et développement technologique).

Applications : GEN (générique).

Projet : FED (fédérateur).

Lot 1.2 : Projet "EHT à conduction protonique"

Ce projet vise à explorer des voies plus innovantes susceptibles de contribuer à améliorer les performances de l'électrolyseur développé dans le projet ci-dessus (lot 1.1), voire de mieux répondre à la problématique de la production massive d'hydrogène.

Des calculs préalables réalisés par divers acteurs montrent que la gamme de température idéale pour coupler une technologie EHT avec un réacteur nucléaire de type HTR pourrait se situer entre 500°C et 600°C. Les électrolyseurs dérivés des SOFC ne répondent pas à cette contrainte car les céramiques

électrolytes utilisées ne conduisent plus suffisamment au-dessous de 700°C. L'utilisation de céramiques conductrices protoniques permettrait de travailler dans cette gamme de température et aurait de plus l'avantage de séparer directement l'hydrogène des autres gaz.

Le projet consiste donc ici à valider des composants conducteurs protoniques (matériaux, catalyseurs, monocellules), dans la perspective du développement d'un électrolyseur fonctionnant à une température intermédiaire (500-600°C). L'effort de recherche portera essentiellement sur l'électrolyte dense et sur la réalisation d'électrodes à gradient de porosité. Cette recherche pourra avoir des applications pour les piles à combustible à membrane céramique protonique (filrière PCFC du programme "Systèmes piles").

Nature du projet : RE (recherche exploratoire).

Applications : GEN (générique).

Projet : FED (fédérateur) et/ou SPEC (spécifique).

Lot 2 : Electrolyse à haute pression (EHP)

Ce projet vise à développer et qualifier en 3 ans (2005-2008) un électrolyseur EHP fonctionnant à haute pression (supérieure ou égale à 50 bars). Ce type d'équipement cible le marché de la production locale d'hydrogène pour des groupes de secours et le couplage aux énergies renouvelables. L'examen des applications duales militaires liées à l'utilisation de l'oxygène produit sera apprécié.

Partant d'une technologie partiellement acquise à l'étranger, mais onéreuse et manquant de retour d'expérience en France (électrolyseur PEM), les enjeux technologiques sont liés la création d'une filière française, à l'augmentation du niveau de pression requis pour que l'hydrogène produit soit directement stockable (bouteilles sous pression), ainsi qu'aux coûts et à la compacité du système. Les travaux concernent la tenue en pression des composants de l'électrolyseur PEM (AME, stack) ainsi que les problèmes d'étanchéité. Un effort significatif devra également être fourni pour diminuer les coûts (matériaux des plaques et d'AME). Une démonstration de l'intérêt de cette filière par rapport à la technologie alcaline devra être faite, principalement en terme de respect de l'environnement, de qualité des gaz, de coût et de rendement énergétique.

Nature du projet : RDT (recherche et développement technologique) et PEX (prototypage et expérimentation).

Applications : STA (stationnaire).

Projet : SPEC (spécifique).

Lot 3 : Cycles thermochimiques

Lot 3.1 : Projet "Cycles alternatifs"

Ce projet permet d'étudier des cycles thermochimiques alternatifs, c'est-à-dire autres que le cycle IS (Iode/Soufre), le cycle Westinghouse et le cycle UT3, fonctionnant à des températures intermédiaires (500°C-800°C).

Dans le domaine des cycles thermochimiques, il existe plus de 1300 cycles susceptibles de produire de l'hydrogène en deux, trois ou quatre étapes. Une difficulté majeure de cette famille de procédés est qu'il est difficile d'en évaluer la pertinence car il n'y a pas de possibilité de les tester à différentes échelles (contrairement à l'EHT par exemple). On passe généralement de la recherche de laboratoire où on démontre la faisabilité thermodynamique du procédé à une extrapolation industrielle qui requiert plusieurs années d'efforts avant de pouvoir disposer d'un premier schéma d'usine.

L'expérience engrangée sur le cycle Iode/Soufre montre que les principaux verrous technologiques liés à un procédé apparaissent seulement après 2 à 3 ans de travaux, et il apparaît utile

d'entreprendre dès aujourd'hui l'exploration de quelques cycles alternatifs à ceux étudiés dans le cadre des programmes Génération IV.

Cette nécessité repose sur deux constats :

- les cycles étudiés à ce jour présentent tous un certain nombre de verrous technologiques dont certains seront difficiles à lever ; sans préjuger des résultats des travaux entrepris pour répondre à cet objectif, il faut préparer d'autres voies de décomposition de l'eau ;
- les procédés en cours d'étude correspondent tous à des températures de sources chaudes avoisinant les 1000°C (VHTR) ; certaines hypothèses sur les réacteurs du futur visent un niveau de fonctionnement à plus basse température et il serait donc judicieux d'entreprendre les pré-études de faisabilité sur des cycles à des températures situées entre 550°C et 800°C.

Les laboratoires de thermodynamique et de génie chimique sont donc appelés à proposer des études prospectives sur des cycles de décomposition de l'eau assistée par la chimie. Ces travaux intégreront une étude de faisabilité thermodynamique et une première approche énergétique du procédé.

Nature du projet : RE (recherche exploratoire).

Applications : GEN (générique).

Projet : FED (fédérateur) et/ou SPEC (spécifique).

Lot 3.2 : Projet "Echangeurs et membranes des cycles HT"

Ce projet permet d'étudier les verrous technologiques liés aux échangeurs HT et aux membranes dans les procédés HT de production d'hydrogène. Les enjeux sont importants car il n'y aura pas de viabilité technologique des procédés dits "à haute température" sans le développement de ces composants qui constituent aujourd'hui de véritables verrous.

Dans le principe, les procédés, que ce soit les cycles thermochimiques ou l'électrolyse haute température, utilisent presque tous une source thermique avec des niveaux de température dépassant dans la plupart des cas 800°C. En évoquant la production massive, on imagine des installations de plusieurs dizaines de mégawatts nécessitant des transferts de chaleur à des échelles industrielles qui vont nécessiter l'utilisation d'échangeurs massifs compacts fonctionnant au-delà de 800°C. A ce jour, de tels composants n'existent pas et les problèmes de matériaux à utiliser sont encore difficiles à identifier. Les solutions généralement avancées dans le cas des hautes températures relèvent des barrières thermiques, mais celles-ci ne sont pas envisageables dans le cas des échangeurs. Il va donc falloir mettre en œuvre des technologies céramiques ou hybrides céramique/métal.

Les compétences élémentaires sur la tenue des matériaux sous chargement, les problèmes de corrosion en milieu chimique agressif, les problèmes de mise en œuvre et d'assemblage de ces matériaux devront rapidement être abordés afin de disposer des connaissances nécessaires pour aborder la phase plus technologique de conception, de dimensionnement et de réalisation à l'échelle industrielle de tels échangeurs.

Pour les membranes, on rencontre les mêmes difficultés. Au-delà des capacités de perméation ou de filtration qui sont déjà difficiles à identifier ou à mesurer dans les cas de mélanges complexes (I₂, HI, H₂O, H₂ par exemple pour le cycle Iode/Soufre), on doit être en mesure de filtrer ou séparer des constituants avec des débits significativement importants (plusieurs dizaines de litres/seconde), ce qui nécessite aujourd'hui des surfaces de membranes développées gigantesques. L'utilisation des nanomatériaux doit pouvoir apporter des solutions, tant au niveau des performances de filtration que de la taille des surfaces effectives de membranes. Un effort important doit être engagé dès à présent sur cette thématique.

Nature du projet : RE (recherche exploratoire).

Applications : GEN (générique).

Projet : FED (fédérateur) et/ou SPEC (spécifique).

3.5 Programme "Projets et activités transverses"

Ce programme est doté d'une enveloppe budgétaire indicative égale à **2% de l'enveloppe budgétaire globale de PAN-H** pour ce 1^{er} appel à projets.

Il comporte toutes les activités transverses liées notamment à la normalisation et la réglementation des technologies, aux aspects technico et socio-économiques de la filière, à la veille scientifique et technique, à l'éducation et la formation et à la gestion et l'animation du plan d'action.

Seuls les aspects technico et socio-économiques de la filière "hydrogène et piles à combustible", de même que certains aspects liés à l'éducation et la formation, feront ici l'objet d'appels à projets, les autres activités étant plutôt du ressort de la cellule d'animation de PAN-H.

Contexte général

Technico et socio-économie

Le projet européen HyWays en cours vise à développer une "roadmap" européenne de l'hydrogène énergie, c'est-à-dire un ensemble de recommandations visant à favoriser l'introduction des technologies et des infrastructures de l'hydrogène en Europe d'ici à 2020-2050, sur la base de critères techniques, économiques, environnementaux et sociaux pertinents. Il est porté par un consortium de 33 partenaires de l'industrie, d'instituts de recherche et d'organismes publics.

Le projet HyFrance en cours est la déclinaison française de ce projet européen. Il est motivé par l'opportunité d'établir un premier état des lieux de l'hydrogène énergie en France, dans le cadre européen harmonisé du projet HyWays qui favorise les comparaisons et les échanges nationaux et régionaux. Il s'agit d'exploiter, à partir des données françaises, les résultats obtenus dans HyWays à l'aide de la chaîne générique cohérente de méthodes et d'outils développée, d'en faire une expertise nationale et de les exploiter, afin d'aboutir à une première "roadmap" française autonome.

Ces deux projets, et leurs prolongations éventuelles, constituent donc ici un cadre économique de référence pour la filière "hydrogène et piles à combustible", même si les aspects liés à la sociologie de l'innovation technologique n'y sont pas véritablement abordés.

Education et formation

Le développement de la filière "hydrogène et piles à combustible" nécessite, pour les industriels et les organismes de recherche publique de la filière, la mise au point de programmes de formation spécialisés adaptés à ces nouvelles technologies, qu'il s'agisse de formation initiale d'élèves techniciens et ingénieurs ou de formation continue de techniciens et ingénieurs en activité.

Toutefois, les programmes de formation de ce type qui existent en France, notamment à l'initiative des établissements d'enseignement supérieur, restent encore dispersés et manquent de moyens pédagogiques nationaux lourds adaptés aux besoins potentiels de l'industrie française.

A - Technico et socio-économie

Ce 1^{er} appel à projets sera ouvert aux équipes des sciences économiques et sociales. Il s'agira principalement de projets liés à l'économie de la filière "hydrogène et piles à combustible", aux politiques de recherche et d'innovation et à la sociologie de l'innovation dans les usages et dans la conception des technologies.

Ces projets pourront s'appuyer sur des problématiques définies par les industriels de PAN-H et s'intégrer dans des projets des quatre programmes technologiques définis dans les chapitres précédents.

Les différents lots faisant l'objet de l'appel à projets sont décrits ci-dessous. Dans la suite, le "système hydrogène" désigne l'ensemble des procédés, installations, infrastructures et matériels composant une chaîne énergétique de l'hydrogène énergie, en incluant la production, le transport, la distribution, le stockage et l'utilisation (dans une pile à combustible) de l'hydrogène.

Lot 1 : Représentation du "système hydrogène" et prospective technico-économique

Il s'agit ici d'assurer les bases d'une intercompréhension voire d'une interopérabilité des évaluations quantitatives utilisées pour la description technique du "système hydrogène", entre, d'une part les ingénieurs de l'industrie et des organismes de recherche publique, d'autre part les chercheurs des sciences économiques et sociales. Les relations entre ces deux groupes seront développées pour **partager les données technico-économiques les plus pertinentes** utilisées dans les différents outils et méthodes d'évaluation des chaînes énergétiques et de prospective technologique.

Il s'agit également de réaliser des analyses de cycles de vie (ACV) et des analyses de coûts économiques pour différentes catégories de services énergétiques finaux (carburants automobiles, énergies fournies par les applications stationnaires...), en fonction des énergies primaires utilisées, de leurs rendements de conversion, des infrastructures de transport et de distribution, des stockages embarqués ou locaux, des performances technico-économiques des piles à combustible. A ce niveau, ce sont bien des chaînes énergétiques (ex. hydrogène à partir de biomasse avec pile à combustible dans un véhicule) qui sont l'objet des ACV.

Il faudra étudier, selon les mêmes démarches, les filières concurrentes de l'hydrogène (électricité, biocarburants...), cette analyse devant bien sûr faire intervenir notamment les questions d'acceptabilité de l'énergie nucléaire et du stockage du CO₂, les contraintes économiques et spatiales liées aux énergies renouvelables (ex. centrales solaires) et les contraintes de ressources liées à une industrie mondiale de biocarburants.

Ces analyses doivent être inscrites dans des études de prospective permettant de tester la viabilité des filières, tant du point de vue de leur financement, de la volatilité du contexte économique (prix de l'énergie), que des contraintes spatiales et des conséquences macro-économiques.

On déclinera ces analyses dans des contextes socio-économiques très diversifiés, par exemple ceux de l'Europe, des Etats-Unis, de la Chine et de l'Inde. Les modèles nationaux technico-économiques permettront des études comparatives sur le déploiement du "système hydrogène" dans ces contextes nationaux.

Nature du projet : RE (recherche exploratoire).

Applications : GEN (générique).

Projet : FED (fédérateur).

Lot 2 : Représentation du progrès technique et de l'innovation

La dynamique technologique est souvent associée, dans les études, à des dates d'apparition des innovations qui permettent d'étudier un déploiement logistique du "système hydrogène" dans le temps conformément à certaines hypothèses économiques. Selon ces études, dès qu'une technologie est disponible, elle est immédiatement adoptée à la vitesse permise par de purs déterminants logistiques, ce qui n'est évidemment pas réaliste.

Cette étape est bien entendu nécessaire, mais ne rend pas compte **des véritables temporalités de l'innovation** qui dépendent notamment de l'accumulation de savoir-faire, de l'analyse des pratiques de R&D, de l'inertie due aux processus réglementaires et aux investissements antérieurs. De plus, aucune problématique d'institutions adaptées ni d'acteurs relais n'est présente dans ces études. Or c'est un versant où l'intervention des sciences humaines et sociales est indispensable.

Il importe donc ici d'analyser plus en détail les processus d'innovation industrielle, pour chacun des maillons du "système hydrogène". Il faudra tenir compte des nouveaux contextes d'usages et de leurs implications notamment dans la conception des technologies d'utilisation de l'hydrogène (concept de "cybercar" ou voiture publique automatisée, synergies entre usages stationnaires et dans les transports...).

Nature du projet : RE (recherche exploratoire).

Applications : GEN (générique).

Projet : FED (fédérateur).

Lot 3 : Sécurité et acceptabilité sociale de l'hydrogène

Le thème de la sécurité et de l'acceptabilité sociale du "système hydrogène" est naturellement un thème central. Il est étroitement lié à la conception des technologies et, corrélativement, à l'assurance des risques associés. On pourra chercher à extrapoler les pratiques et contraintes réglementaires en vigueur pour les gaz industriels et les carburants des véhicules à une généralisation des usages de l'hydrogène énergie. On pourra également s'interroger, à titre de comparaison, sur les problèmes de sécurité posés par les batteries de nouvelles générations.

Plus précisément, dans la mesure où l'hydrogène est déjà largement utilisé dans l'industrie chimique, une première étude socio-économique pourrait être réalisée sur les technologies, procédures de sécurité et pratiques commerciales concernant l'hydrogène chimique, dans la période actuelle et dans le futur immédiat. Une première approche des contraintes de sécurité, de stockage et d'acceptabilité sociale pourrait être entreprise à ce niveau.

Nature du projet : RE (recherche exploratoire).

Applications : GEN (générique).

Projet : FED (fédérateur).

B - Education et formation

Lot 1 : Kits technologiques pédagogiques

Il s'agit ici de développer des kits pédagogiques en support des travaux dirigés et travaux pratiques des programmes de formation (initiale ou continue) aux nouvelles technologies de l'hydrogène énergie (piles à combustible, stockage d'hydrogène...).

Les kits pédagogiques, ouverts à un public de techniciens et d'ingénieurs, auront pour vocation de faciliter la compréhension en vraie grandeur des mécanismes fondamentaux de ces technologies (fluidique, thermique, électrochimie ...). Il pourra s'agir de bancs d'essais incluant par exemple des systèmes de piles à combustible de puissance jusqu'à 1 kWe.

Nature du projet : RDT (recherche et développement technologique) et PEX (prototypage et expérimentation).

Applications : GEN (générique).

Projet : SPEC (spécifique).

4. PROCEDURE MISE EN ŒUVRE

4.1 Critères de recevabilité

Une proposition est recevable si elle s'inscrit dans le cadre de cet appel à projets. Elle peut concerner un lot ou un ou plusieurs sous-lot(s) du plan d'action PAN-H.

Les projets sont normalement coopératifs public-privé. Ils mettent en jeu plusieurs partenaires, industriels et laboratoires de recherche publique. Cependant, pour les projets relevant de la recherche exploratoire, cette condition de partenariat public-privé n'est pas exigée dès lors que le projet est présenté conjointement par plusieurs laboratoires sur la base d'un cahier des charges industriel.

Les partenariats avec des industriels ou des centres de recherche européens sont acceptés et favorisés dans la mesure où chaque partenaire étranger assure son propre financement dans le projet. Les projets devront être cohérents avec les évolutions et recommandations de la plateforme européenne sur l'hydrogène et les piles à combustible (HFP) et sa mise en œuvre dans le 7^{me} programme cadre. Ils mettront en œuvre les procédures de coopération bilatérales ou européennes qui seront disponibles.

Les coopérations internationales, dans la mesure où les partenaires étrangers assureront leur propre financement, seront en priorité conduites au travers des cadres de l'IPHE et de l'IEA.

Une attention particulière sera portée sur les conditions de propriété intellectuelle et industrielle.

Pour chaque projet, un coordinateur unique est désigné par les partenaires. En plus de son rôle de coordinateur scientifique et technique, il est responsable de la mise en place et de la formalisation de la collaboration entre les partenaires, de la production des livrables, de la tenue des réunions d'avancement et de la communication des résultats.

4.2 Critères d'évaluation et de sélection

Les projets sont évalués selon plusieurs aspects :

- pertinence de la proposition au regard de l'appel à projets et son intégration dans la structure projets ;
- qualité, complémentarité et ouverture du partenariat ;
- intégration européenne et cohérence avec la plate forme européenne sur l'hydrogène et les piles à combustible ;
- excellence de chaque partenaire dans le domaine proposé (compétences, publications, brevets, collaborations, valorisation de projets antérieurs) ;
- caractère novateur du projet au regard de l'état de l'art, du benchmarking international et de la propriété intellectuelle ;
- perspectives de retombées scientifiques, industrielles et économiques (brevets, innovations, potentiel de réduction des coûts, normalisations, publications, perspectives d'industrialisation et de marchés, impact sur l'emploi, création d'entreprises...) ;
- intégration des aspects liés à l'impact sur la santé, la sécurité et l'environnement (management de cycle de vie) ;
- adéquation du plan de travail et du budget avec les objectifs du projet ;
- rigueur de la définition des résultats intermédiaires et finaux (clarté et pertinence de l'analyse des risques, notion d'obligation de résultats) ;
- clarté de rédaction du dossier (clarté des réponses apportées à chacune des rubriques indiquées dans le formulaire annexé au document).

Le processus de sélection des projets comprend les étapes successives listées ci-dessous :

- examen et classement des projets par un Comité d'évaluation sur le seul critère de la qualité scientifique et technique, en s'appuyant sur deux experts extérieurs appartenant si possible à la sphère publique et à la sphère privée ;
- examen et sélection des projets par un Comité stratégique qui établit un classement des projets éligibles à un financement ;
- décision de financement par le GIP ANR ;
- finalisation du dossier administratif et financier pour les projets retenus par le GIP ANR.

Le Comité d'évaluation est constitué uniquement de scientifiques. Le Comité stratégique est composé de représentants des acteurs de la recherche publique (CEA, CNRS, IFP, INRETS, ADEME...), du monde socio-économique (industriels, société civile...) et des ministères concernés. Chacun des membres de ces comités est astreint à la confidentialité. La composition des deux comités sera affichée sur le site internet du GIP ANR (www.gip-anr.fr) dans le courant du mois de mai 2005.

4.3 Règles de financement public

Pour les entreprises et les associations, le taux maximum d'aide reçue pour les projets (appliqué aux dépenses éligibles) sera inférieur ou égal à 50 %. Le taux est décroissant dès lors que le projet se rapproche de l'application industrielle.

Pour les organismes publics de recherche, la subvention accordée sera au maximum de 100 % du coût marginal induit par le projet (donc hors salaire du personnel statutaire). Sont en particulier éligibles les dépenses concernant les rémunérations versées à des personnes recrutées sur contrat temporaire.

Les bénéficiaires pourront commander des travaux à des tiers. Le coût de ces prestations devra rester inférieur ou égal à 50 % du coût total de fonctionnement, sauf dérogation accordée sur demande motivée du bénéficiaire.

4.4 Procédure de soumission

Cas général (formulaire de soumission n°1)

A l'exception du cas particulier des expressions d'intérêt décrit en dernière partie, les projets sont soumis à partir du formulaire n°1 joint. Le dossier de soumission à l'appel à projets comporte :

- **une fiche d'identité du projet** regroupant les informations générales relatives au projet : nom du projet, titre, coordinateur et autres partenaires du projet, durée, coût global, aide demandée, motivations, intérêts scientifiques et techniques du projet, objectifs et finalités du projet, résumé technique et économique, résultats attendus, confidentialité ;
- **une présentation détaillée du projet :**
 - contexte technique et économique : objectif, état de l'art, verrous technologiques à lever, situation du marché, analyse de la concurrence, brevets à mettre en œuvre pour atteindre l'objectif, projets concurrents ;
 - organisation du projet : qualification des acteurs, valeur ajoutée à la coopération, organisation du partenariat et pilotage du projet ;
 - programme des travaux (description scientifique détaillée, répartition des tâches entre les partenaires, échéancier des réalisations intermédiaires et finales) ;
 - exploitation des résultats : critères de réussite, propriété intellectuelle, retombées industrielles et économiques, retombées scientifiques ;

- renseignements financiers : montant de l'aide demandée, tableau de financement, nature des dépenses ;
- personnes chargées du suivi administratif ou financier, personnes à contacter pour les questions scientifiques et techniques.

Les dossiers incomplets ne seront pas pris en considération.

Clôture de l'appel à projets : 10 juin 2005 (date limite de dépôt des dossiers).

Cas particulier des expressions d'intérêt (formulaire de soumission n°2)

Les projets fédérateurs (FED) pourront également faire l'objet de simples expressions d'intérêt qui seront évaluées en fonction de leur capacité ou non à s'intégrer dans les projets retenus dans ce 1^{er} appel à projets, voire dans ceux potentiellement à retenir dans l'appel à projets suivant.

Les expressions d'intérêt sont soumises à partir du formulaire n°2 joint.

Clôture de l'appel à expressions d'intérêt : 16 septembre 2005 (date de limite de dépôt des dossiers).

Adresse de réception des projets et des expressions d'intérêt

La mise en œuvre de l'appel à projets PAN-H sera réalisée par le CEA à qui le GIP ANR a confié la conduite opérationnelle de l'évaluation et de l'administration des dossiers de subvention. La délégation de ce programme du GIP ANR au CEA est mise en place dans le cadre des principes adoptés par le conseil d'administration de l'agence et explicitée sur le site internet du GIP ANR.

Dans tous les cas, les dossiers sont à adresser de préférence par courrier électronique (fichier .doc ou .rtf) en **1 seul fichier** aux adresses suivantes :

Contacts		
ADEME 27, rue Louis Vicat 75737 PARIS Cedex 15	CEA Fontenay-aux-Roses DRT, route du Panorama, BP 6 92265 Fontenay-aux-Roses Cedex	CEA Fontenay-aux-Roses DRT, route du Panorama, BP 6 92265 Fontenay-aux-Roses Cedex
Tel. 01.47.65.21.74	Tel. 01 46 54 93 90	Tel. 01 46 54 88 23
Fax. 01.40.95.74.53	Fax. 01 46 54 82 32	Fax. 01 46 54 82 32
Mail : daniel.clement@ademe.fr	Mail : francoise.barbier@cea.fr	Mail : jean-marc.agator@cea.fr
A l'attention de Daniel CLEMENT	A l'attention de Françoise BARBIER	A l'attention de Jean-Marc AGATOR

Un accusé de réception du projet ou de l'expression d'intérêt sera envoyé au coordinateur.