



L'Hydrogène et la Pile à Combustible

Afin d'alimenter la réflexion sur les perspectives et sur la nécessaire structuration de la recherche et d'optimiser la synergie entre les acteurs de la recherche et ceux du monde industriel dans le domaine de « l'énergie bas carbone », la direction du Programme Interdisciplinaire Energie du CNRS (PIE) a sélectionné 4 thèmes (i) : Hydrogène et piles à combustible ; (ii) : Solaire photovoltaïque et concentré ; (iii) : Combustion, capture / séquestration de CO₂ ; (iv) : Socio-économie de l'énergie.

Chacun de ces thèmes a été abordé par un groupe de travail animé par une personnalité extérieure au CNRS (1). Il s'agissait de répondre aux cinq objectifs suivants :

- ▶ Etablir une analyse de l'état de l'art à l'échelle internationale (scientifique et technologique) ;
- ▶ Identifier les principaux acteurs académiques et industriels ainsi que les atouts structurels dont ils bénéficient ;
- ▶ Analyser la structure de recherche en France dans le domaine concerné et identifier ses forces et ses faiblesses ;
- ▶ Mettre en évidence les défis les plus critiques à relever en les hiérarchisant de manière argumentée ;
- ▶ Déboucher sur des pistes de partenariat à privilégier, incluant en particulier la culture de la confiance et des complémentarités, le principe d'une consultation pérenne etc...

Ce qui suit est à prendre comme un document de travail destiné à alimenter la réflexion des participants au colloque Energie de Nantes.

1. Introduction

Aujourd'hui, nos besoins énergétiques sont largement couverts par les énergies fossiles. La prise de conscience par nos sociétés modernes de l'impact des émissions de CO₂ sur le réchauffement de la planète et la pénurie annoncée en énergie fossile nous a conduit à rechercher des énergies alternatives et moins polluantes. L'hydrogène est considéré aujourd'hui comme un vecteur énergétique potentiellement attractif pour l'application transport et comme une option technologique offrant de nouvelles perspectives de valorisation des énergies intermittentes (solaire, éolien, etc.). Couplé à une pile à combustible, sa combustion électrochimique est réalisée avec un excellent rendement tout en ne produisant que de la vapeur d'eau. Cependant, de nombreux verrous technologiques restent à lever. Quel que soit le mode de production de l'hydrogène (par thermolyse, par électrolyse,...), quelle que soit l'utilisation du gaz (pile à combustible, moteur thermique,...), quelle que soit l'ampleur du développement économique (de la simple utilisation ponctuelle au développement d'une hypothétique civilisation de l'hydrogène), il faudra résoudre les problèmes posés par la production, la purification, le stockage et le transport de ce gaz, et bien évidemment relever des défis technologiques sur la pile à combustible (PAC).

Les PAC sont considérées comme un moyen de production décentralisée prometteur à plusieurs titres : (i) : flexibilité du combustible qui peut être utilisé (en dehors du gaz naturel et hydrogène, possibilité d'envisager des combustibles d'origine renouvelable, tels que le biogaz ou les biocombustibles liquides), (ii) : flexibilité de la technologie (basse et haute températures) avec des avantages et des inconvénients distincts, (iii) : modularité en puissance ouvrant de nombreuses perspectives d'applications (mobile, transport, stationnaire résidentiel, tertiaire et industriel), (iv) : avec un rendement électrique élevé (> 50 %) sur une large plage de modulation de puissance.

En ce qui concerne les piles à combustible à basse température, si le seul combustible acceptable est H₂ pur (contenant au maximum quelques dizaines de ppm de CO pour éviter l'empoisonnement des catalyseurs à base de platine des piles PEMFC), l'utilisation du carburant méthanol (DMFC) conduit à des performances plus faibles. Les piles à conduction hydroxyle (SAMFC) à 200°C acceptent des teneurs de 1% en CO, alors

que les piles à carbonates fondus (MCFC) peuvent utiliser des mélanges CO/H₂ issus du vapo-reformage d'un hydrocarbure ou de la gazéification de charbons et de la biomasse. Dans les piles SOFC, l'alimentation directe en hydrocarbure (e.g. gaz naturel, biogaz) est possible, la conversion en hydrogène s'effectuant au contact des électrodes (reformage interne). A ce jour, la tendance est d'augmenter la température de fonctionnement des PEMFC et de diminuer celle des SOFC. Ainsi des électrolytes polymères mixtes organiques-inorganiques sont étudiés dans la gamme 150-200°C alors que des céramiques à conduction protonique (PCFC) permettent d'envisager un fonctionnement vers 400-500°C. Ce qui suit a pour objectif de replacer ces recherches dans le contexte national et international, d'une part en identifiant des verrous technologiques et d'autre part en envisageant une structuration de la recherche non pas au niveau *intra* organismes institutionnels mais plutôt de façon à les mettre en synergie.

2. Le contexte international de la recherche PAC et Hydrogène

En Europe, la mise en place de différents programmes cadres a vu une augmentation croissante des ressources allouées aux programmes "Hydrogène et Piles à Combustible" : 8 M€ pour le 2ème PCRD (1986-1990), 145 M€ pour PCRD5 (1999-2002) et pour PCRD6 environ 320 M€, financement ne prenant pas en compte la contribution industrielle. Actuellement, pour le PCRD7, l'essentiel des financements des projets est réalisé dans le cadre d'une Joint Technology Initiative (JTI) au travers de la plate-forme "Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking" (FCH-JU). Dans ce nouveau contexte, la Commission Européenne contribuera au programme à hauteur de 470 M€ tandis que 470 M€ proviendront du secteur privé. La plateforme est structurée en quatre domaines d'application :

- ▶ Transport et Infrastructure
- ▶ Production d'hydrogène et Distribution
- ▶ Stationnaire et Co-génération
- ▶ Marchés précoces.

La répartition sera environ respectivement 144-162 M€, 45-54 M€, 154-167 M€ et 54-63 M€ sur l'ensemble de la période 2008-2013. Les applications sont ouvertes aux technologies PEMFC, MCFC et SOFC qui se distribuent sur les domaines 1, 3 et 4.

La feuille de route de la plateforme FCH-JU est contenue dans le "Multi-Annual Implementation Plan" (MAIP, version finale mai 2009), basé sur les documents "Hydrogen and Fuel Cells – A Vision for our Future" (2003), "Strategic Research Agenda" (2005), la Stratégie de Déploiement (2005) et l'Implémentation Plan (2006) de la "Hydrogen and Fuel Cells Technology Platform" du 6ème PCRD. Les domaines prioritaires ont été identifiés par des groupes de travail sous les auspices de la Commission Européenne comportant des représentants de l'industrie et des organismes de recherche. La mise en place du FCH-JU contribue à une focalisation et une coordination qui avaient manquées lors des Programmes Cadres précédents. Cette difficulté de mettre en place des programmes focalisés est due à la dispersion des efforts de recherches au sein des partenaires de l'Union Européenne. Le FCH-JU doit permettre de surmonter cette faiblesse.

Au niveau des états membres, l'**Allemagne**, le **Royaume Uni** et le **Danemark** ont mis en place des programmes nationaux de recherche sur les piles à combustible. Le plus important d'entre eux étant incontestablement le programme allemand "Fuel Cell Technology Innovation" (NIP), avec un financement de 500 M€ jusqu'en 2015 pour la recherche, le développement et les démonstrations, niveau équivalent à la participation de l'Europe dans la FCH-JU. Par ailleurs, le programme allemand consacre 1/3 des financements au développement des SOFC pour les applications stationnaires en co-génération.

Le NIP est organisé d'une manière similaire à celle de la FCH-JU, avec quatre domaines: transport et infrastructure hydrogène (54% du budget total), applications domestiques, applications industrielles, et marchés de niche. L'industrie et la recherche en Allemagne occupent une position de pointe en Europe dans la technologie Hydrogène et Piles à Combustible, ceci grâce aux financements au cours de décennies antérieures en particulier dans le domaine des composants et des systèmes. Le programme actuel vise à consolider cette avance et à favoriser le transfert technologique. La forte présence de l'industrie chimique en Allemagne a permis de développer un savoir-faire au niveau des matériaux et s'appuie sur un socle de propriété industrielle qui la place en position très favorable pour les années à venir.

Dans ce contexte de forte implication industrielle, Daimler, EnBW, Linde, OMV, Shell, Total, Vattenfall and the NOW GmbH National Organisation Hydrogen and Fuel Cell Technology ont signé en septembre 2009 un Memorandum of Understanding "H₂ Mobility" pour évaluer les différentes options conduisant à un accroissement substantiel des stations de distribution d'hydrogène pour la fin de 2011. A l'heure actuelle, la

distribution se fait au travers de 30 stations, dont sept sont intégrées dans des stations services conventionnelles.

Au **Royaume Uni**, le gouvernement a publié un Programme Cadre Stratégique pour les activités liées à l'hydrogène, qui comprend un volet financement de 15 M£ sur quatre ans sur une large programme de démonstration. Les projets peuvent aussi être financés par le Department of Trade and Industry: 2-3 M£ par an pour les applications stationnaires et transport, et par l'Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC) qui soutient la recherche universitaire en particulier à travers l'initiative "SUPERGEN" (Sustainable Power Generation and Supply). Le consortium SUPERGEN Fuel Cells comprend l'Imperial College (Université de Londres), les Universités de Newcastle, Nottingham, St Andrews, Ceres Power Ltd, Defence Science and Technology Laboratory, Johnson Matthey plc et Rolls-Royce Fuel Cell Systems Ltd., et bénéficie d'un financement de 2,5 M£ sur quatre ans.

Le gouvernement **danois** considère les énergies renouvelables comme l'un des domaines clefs pour la croissance économique. Le Danish Partnership for Hydrogen and Fuel Cells coordonné par la Confédération des Industries Danoises, rassemble les acteurs industriels et académiques sur des projets financés par le gouvernement à la hauteur de 3 M€/an.

En 2003 aux **Etats-Unis**, l'Hydrogen Fuel Initiative lancée sous la présidence de G.W.Bush a mobilisé \$1,2 milliards sur la technologie pile à combustible et l'hydrogène. Avec une forte coordination, une stricte procédure de revue annuelle et l'obligation de rendre public les résultats de la recherche financée sur les fonds publics, le programme US est très focalisé et jouit d'une forte visibilité. En 2010, la proposition du Secrétaire à l'Energie de réduire substantiellement le budget à 64 M\$ (en raison du retard pris dans le développement de l'infrastructure) n'a pas été suivie par le Congrès, qui a rétabli le financement à 174 M\$, et maintient l'effort de l'administration B.Obama au même niveau que celle de Bush. Le programme du Department of Energy implique des partenariats industriels tels que FreedomCAR et Fuel Partnership regroupant le U.S. Council for Automotive Research (Ford Motor Company, General Motors Corporation, Chrysler LLC), les compagnies pétrolières (BP America, Chevron, ConocoPhillips, ExxonMobil et Shell) et les énergéticiens (Southern California Edison et DTE Energy). Côté production d'hydrogène par électrolyse à haute température, ce programme est lié au programme nucléaire avec l'INL (Idaho National Laboratory et le MIT comme acteurs principaux.

Le **Japon** a été un des premiers pays à mettre en place une coordination des efforts de recherche au niveau académique et industriel dans le domaine de l'hydrogène et des piles à combustible et une feuille de route pour les applications stationnaire et transport. Ces deux domaines impliquent les PEMFC avec une forte recherche en interne chez les constructeurs automobiles Toyota, Nissan et Honda, ainsi que dans les centres tels que le The Polymer Electrolyte Fuel Cell Cutting-Edge Research Center (FC-Cubic), centre de recherche né à l'initiative du Ministère de l'Economie, du Commerce et de l'Industrie et NEDO (Industrial Technology Development Organisation). NEDO développe un programme sur le développement de la technologie PEMFC et finance divers projets tel que le projet Nanomaterials for High Performance Fuel Cells for Transport Applications (Université de Yamanashi).

3. Le Contexte National

Depuis 2009, l'**Agence Nationale de la Recherche** a mis en place le programme H-PAC (2009-2011), ce programme fait suite au programme PAN-H (2005-2008) et couvre les mêmes domaines. Ces programmes comme tous les programmes de l'ANR fonctionnent sur le principe de réponses à des appels d'offre. De 2005 à 2008, le montant global du financement a été de l'ordre de 84 M€ sur l'ensemble des technologies hydrogène, PEMFC et SOFC. La part dédiée aux recherches sur les PEMFC représentent environ 9,3 M€ en 2005, 6,8 M€ en 2006, 1,2 M€ en 2007 et 3,7 M€ en 2008. Les projets associent généralement les acteurs industriels de la filière tels que Axane, Air Liquide, PCA, Helion et des PME Paxitech, N-GHY, CETH, Auer etc..., des instituts de recherche, les laboratoires du CEA et du CNRS. Dans ce cadre :

- En 2005, les PEMFC ont représenté 55 % des financements ANR PAN-H, les SOFC et PCFC 12 %, la production d'hydrogène par électrolyse 11 % ;
- En 2006, la production d'hydrogène est montée à 26 % alors que les SOFC ne figuraient plus dans l'AAP ;
- En 2007 et 2008, le programme PAN-H a vu son montant divisé par 3, les SOFC et PCFC ne figuraient toujours pas tandis que la production d'hydrogène par électrolyse continuait de progresser ;
- En 2009, malgré un niveau de financement très bas, les SOFC et PCFC réapparaissent pour la co-génération stationnaire.

L'ADEME soutient depuis 1999 des projets sur le thème général des piles à combustible et a participé en janvier 2009 avec l'Association Française de l'Hydrogène à la création de la Plateforme Française HyPac destinée à promouvoir les actions sur l'hydrogène et les piles à combustible. L'ADEME a récemment financé une étude dénommée FILOSOFIE sur « L'évaluation de la filière SOFC en France » en liaison avec Alpeha Hydrogène. Les conclusions de FILOSOFIE sont en partie reprises en § 4.b.3.

OSEO doit financer à hauteur de 67 M€ le programme H2E coordonné par Air Liquide. L'investissement global est de 200 M€. Le programme regroupe autour d'Air Liquide des industriels tels qu'Axane, Helion, Alfa Laval Vicarb, Imphy Alloys, Raigi, Alphaplast, ainsi que des organismes ou instituts : CEA, INERIS, IPREM, et des laboratoires du CNRS.

Les laboratoires du CNRS ayant une forte activité dans le domaine des piles à combustible sont structurés au sein du GdR PACTE depuis 2006, qui regroupe les activités SOFC et PEMFC autour de la thématique "cœur de pile". Le GDR associe les groupes CNRS à ceux des autres communautés de chercheurs (CEA) et industriels (EDF, GDF-SUEZ, Saint GOBAIN, HELION). Le CNRS a par ailleurs mis en place au sein du Programme Interdisciplinaire Energie 2 un groupe d'analyse thématique sur les système PAC impliquant chercheurs des différents organismes (CEA) des agences (ADEME, AFH2), des instituts ou centres de recherche (EIFER, INRETS), industriels (PCA, Renault, HELION, VALEO). Un certain nombre de projets exploratoires et de projets de recherche contractualisés sont soutenus à la suite de réponses à des appels d'offre. La communauté « Systèmes Piles » s'est associée au GdR PACTE dans la demande de labellisation du nouveau GdR PACS : « Piles A Combustible, Systèmes ».

Récemment, sous l'impulsion du PIE-2, la communauté CNRS concernée par une production économe en CO₂, le stockage et la purification d'hydrogène s'est également structurée dans un GdR dénommé ACTHYF (cf § 4.C.2).

4. Etat de l'art, défis, forces et faiblesses, partenariats

Piles à Combustible basse température. (PEMFC)

1. Etat de l'art

La plupart des efforts de recherche actuels sur les nouveaux matériaux pour pile à combustible basse température (PEMFC) visent à l'augmentation des performances (augmentation des rendements, augmentation des puissances spécifiques, diminution des quantités de platine, diminution de l'encombrement et de la masse), l'augmentation des stabilités mécanique, thermique et électrochimique, la diminution des coûts, l'élargissement du domaine de température au-delà de la plage de température 20-90°C, aussi bien pour les applications dans la gamme de puissance moyennes 50 W – 10 kW destinés à la production d'énergie délocalisée stationnaire ou mobile, que les puissances plus élevées 20 – 80 kW pour les applications automobile, ou >200 kW pour le résidentiel collectif ou les applications industrielles.

Un fonctionnement à température plus élevée permettrait de répondre à un certain nombre de problèmes technologiques propres non seulement au cœur de piles mais aussi relatifs au système :

- ▀ la sensibilité au CO à basse température, il est nécessaire de mettre en œuvre des étapes de purification complexes et coûteuses. La tolérance au CO atteint 1% pour des températures > 160°C, ce qui permettrait d'utiliser l'hydrogène obtenu à partir du reformage du gaz naturel ou d'un biofuel.
- ▀ Une température plus élevée augmente les vitesses des réactions aux électrodes, optimise les performances et le rendement de la pile, permet une meilleure récupération de la chaleur, et produit une chaleur de meilleure qualité dans le cas de la co-génération pour les applications résidentielles.
- ▀ Pour l'application véhicule, l'augmentation de la température permet de s'affranchir d'un système de refroidissement et d'évacuation de la chaleur complexe à mettre en œuvre et encombrant.

Les membranes ionomères perfluorosulfonées constituent à l'heure actuelle le matériau de choix dans la technologie standard des PAC à membranes. Elles présentent de très bonnes propriétés de conduction protonique et des progrès récents dans le développement de polymères perfluorosulfonés dits à "chaîne courte" a permis une augmentation de la capacité d'échange ionique et d'améliorer les propriétés de conduction sur toute la gamme de température. Cependant, ce type de membrane souffre de limitations : sa stabilité chimique dans certaines conditions de fonctionnement d'une pile à combustible est limitée et la conductivité diminue d'un ordre de grandeur lorsque le taux d'humidité relative passe de 80 à 30 %, ce qui signifie que le maintien des performances de la pile à combustible nécessite la mise en place d'un dispositif complexe d'hydratation et de gestion de l'eau dans le système. Si des travaux récents permettent de

modérer la dégradation chimique des membranes perfluorosulfonées (stabilisation des groupes réactifs de bout des chaînes polymère, incorporation de "pièges à radicaux" dans la membrane ou des électrodes), le problème de sa stabilité mécanique reste à résoudre. En effet, la nécessité de maintenir un niveau élevé d'humidification des réactifs est une source d'instabilité. Les variations de volume considérables entre l'état hydraté et l'état sec lors du dessèchement des membranes peuvent être à l'origine de fatigues mécaniques locales occasionnant la rupture de la membrane et la défaillance de l'ensemble du système.

Du côté des catalyseurs pour activer les réactions aux électrodes le platine est incontournable, notamment à la cathode où la réaction de réduction de l'oxygène (de l'air) est difficile à basse température. L'ajout d'un second, voire d'un troisième métal, est une voie de recherche prometteuse permettant d'augmenter l'activité catalytique et de diminuer la quantité de platine utilisée. Les problèmes liés à l'instabilité des électrocatalyseurs de type Pt supporté sur carbone lors d'un fonctionnement à tension de cellule élevée ont conduit à des travaux récents sur la stabilisation à la fois du catalyseur (alliages, structure cœur-coquille etc...) et de son support (graphitisation du carbone, carbone dopé par des hétéro-atomes, supports alternatifs au carbone etc...). A l'heure actuelle, des avancées considérables ont été réalisées pour augmenter la durabilité des assemblages membrane – électrodes (AME), pour diminuer leur coût, pour améliorer la performance des membranes dans les conditions de température élevée et d'humidité relative faible, et dans la caractérisation des matériaux et des composants. Parmi des exemples de progrès récents :

- ▀ Diminution de la masse équivalente (augmentation de la capacité d'échange ionique) des membranes perfluorosulfonées [membranes 3M (programme DoE) et Aquivion (programme européen Autobrane)], augmentation des masses moléculaires pour une meilleure stabilité mécanique, travaux sur la réticulation de ces polymères pour améliorer la stabilité mécanique;
- ▀ Développement de polymères et de membranes à fonctions protogènes autres que le groupe sulfonique, moins hydrophiles et conduisant dans un environnement moins hydraté. Il s'agit essentiellement des polymères à groupements de type acide phosphonique (Celtec-V de BASF, et travaux récents en Europe, y compris en France). La conductivité de ces membranes est moins fortement fonction de l'humidité relative, y compris à des températures > 100°C;
- ▀ Catalyseurs en alliage platine-M, notamment platine-cobalt (Johnson-Matthey), permettant d'augmenter les performances de l'électrode à air et de diminuer le chargement en platine afin de diminuer les coûts; dans le programme du DoE, le taux de platine actuel des assemblages membrane – électrodes permet d'estimer (projection 500,000 systèmes/an) le coût du stack à \$63/kW en 2009;
- ▀ Des avancées dans le développement des électrodes et des assemblages membrane – électrodes ont permis d'augmenter la stabilité des assemblages lors du fonctionnement, notamment en cyclage ;
- ▀ Développement de stacks incorporant les différents matériaux et procédés issus des ces avancées qui fonctionnent à 110°C, avec une humidification aux électrodes à des températures bien inférieures à celle des cellules (humidité relative à l'anode de 24% et à la cathode de 16%, travaux réalisés dans le programme européen *Autobrane*).

Du point de vue de l'application automobile, les besoins continuent à se situer dans le développement d'AMEs permettant un fonctionnement des PEMFC à la fois en dessous de 0°C et jusqu'à des températures voisines de 130°C, tout en maintenant une conductivité très élevée de manière à ce que la densité de puissance des cellules individuelles du stack ne diminue pas lors de l'augmentation de la température de fonctionnement (accélération, montée de pente, etc.). De plus, les AME dans les conditions dynamiques d'utilisation d'un véhicule ou dans des applications stationnaires de type co-génération domestique (cyclages en température, en humidité relative, en puissance) sont sujets à une détérioration rapide due à la dissolution/migration du catalyseur et à sa re-précipitation avec formation d'amas ou d'agrégats, l'empoisonnement de la membrane, la détérioration des couches de diffusion et des joints, etc.

Pour les prochaines années, les différents objectifs à poursuivre dans le développement des membranes, catalyseurs et des assemblages membrane électrodes sont les suivants :

- ▀ Membranes et ionomères présentant une conductivité protonique élevée sur une large gamme de température de fonctionnement ($-30 < T < 130^{\circ}\text{C}$, à faible humidité relative (25 %) et si possible dans les conditions anhydres ou quasi-anhydres;
- ▀ Membranes à faible gonflement, faibles variations dimensionnelles, forte stabilité mécanique, faible prix de revient;
- ▀ Contrôle des processus d'agrégation, et de dissolution des particules du catalyseur à haute température et au cours de temps, supports de catalyseurs stables vis-à-vis de l'oxydation;
- ▀ Nouveaux catalyseurs nanostructurés de surface spécifique élevée, conduisant à une meilleure accessibilité des réactifs à la surface électroactive, et à une diminution de la charge en platine;

- ▶ Parmi les technologies émergentes, les SAMFC (Solid Alkaline Membrane Fuel Cells) présentent l'avantage de pouvoir utiliser les électrocatalyseurs non nobles de plus faible coût. Jusqu'à présent, cette technologie n'a pu être validée qu'à basse température (< 90°C) et la mise au point de nouvelles membranes anioniques est nécessaire pour aller au-delà de cette température. Le développement des SAMFC doit aussi amener des progrès substantiels dans la conversion directe des alcools au sein des DAFC (direct alcohol fuel cells) puisqu'il est généralement accepté que l'oxydation des alcools tels que le méthanol, l'éthanol etc... est plus rapide dans les conditions alcalines.

2. Objectifs, points durs et domaines prioritaires

Il est utile d'analyser les objectifs techniques, les feuilles de route et les domaines prioritaires de recherches identifiés dans différents programmes au niveau international. En se basant sur les trois plus importants d'entre eux – les programmes américain, allemand et européen (FCH-JU) - il apparaît une concordance à la fois sur les objectifs techniques et sur les points durs qu'il convient de surmonter :

Transport

Objectifs techniques : Traction véhicule

- Coût système : 100 €/kW (à 100,000 unités/an) [DoE \$30/kW à 500,000 unités/an]
- Densité de puissance : > 1 W/cm²
- Durée de vie (voiture) : > 5000 h
- Durée de vie (bus): 10,000 h
- Température extérieure : -25 à +45 °C
- Température de fonctionnement : >100 °C

Objectifs techniques : Unités auxiliaires de puissance

- Coût : 40 €/kW
- Densité de puissance : > 1.6 W/cm²
- Durée de vie : 10,000 – 40,000 h
- Efficacité : > 50%
- Démarrage à froid en : < 35 s

Domaines prioritaires de recherche

- Membranes électrolytes mécaniquement stables et durables, nécessitant peu ou pas d'humidification et présentant des conductivités protoniques à des températures élevées (> 100 °C) pour permettre une simplification des architectures système. Amélioration des procédés de fabrication.
- Catalyseurs à bonne stabilité électrochimique et activité élevée; diminution de la charge en platine, catalyseurs alternatifs à base de métaux non nobles pour réduire les coûts.
- Nouvelles structures d'électrodes, optimisation des couches de diffusion des gaz
- Plaques bipolaires résistantes à la corrosion, et à faible masse, volume et coût.
- Réduction des coûts des matériaux.
- Développement de procédés de production adaptés
- Optimisation de la conception des joints
- Méthodologies et outils pour la prédiction de la durée de vie
- Amélioration de la compréhension des processus fondamentaux dans la pile à combustible par des approches de modélisation, simulation et expérimentation; comportant la caractérisation du transport ionique dans les matériaux de pile à combustible, la relation entre composition, structure, morphologie et propriétés des catalyseurs, amélioration de la compréhension et du contrôle des processus aux électrodes et aux interfaces membrane – électrodes.
- L'impact de la qualité de l'hydrogène (tolérance aux impuretés) sur la performance et la durabilité d'une pile à combustible
- Recherche visant à répondre aux insuffisances technologiques associées au démarrage à des températures négatives
- Nouveaux concepts pour l'alimentation en air
- Optimisation de la re-circulation de l'hydrogène à l'anode
- Optimisation des humidificateurs
- Recherches sur les APU dans le secteur du transport alimentées en combustibles hydrocarbonés : en particulier sur les matériaux, le développement et la mise à l'épreuve de composants et de systèmes (en

particulier la technologie du reformage), démonstrateurs de puissance 10 kW (camions) à 100 kW (aéronautique, maritime).

Application stationnaire et micro-CHP

Objectifs techniques

- Coût système : 400 -1500 €/kW en fonction de l'application, pour le programme allemand NIP
- 4000 – 5000 €/kW pour micro-CHP (incluant le coût du brûleur auxiliaire), et 1500 – 2500 € /kW pour les unités industrielles/commerciales pour le programme européen de la FCH-JU
- Durée de vie : > 40,000 h

Domaines prioritaires de recherche

- Développement de matériaux permettant d'augmenter la température de fonctionnement à > 100 °C (NIP) et > 120 °C (DoE) : assemblages, plaques bipolaires, joints
- Développement de matériaux pour permettre une amélioration de la performance en terme de durée de vie plus élevée et de dégradation plus faible et permettant d'augmenter la stabilité mécanique, électrochimique et thermique de monocellules et de stacks.
- Diminution de la charge en catalyseur (développement de nanostructures etc)
- Augmentation de la densité de puissance et de l'efficacité
- Nouvelles architectures de monocellule et de stack pour améliorer la performance, la durabilité, la robustesse, et pour diminuer les coûts
- Identification des paramètres critiques et de conditions opératoires pour toutes les gammes de puissance ayant un impact sur la dégradation et la durée de vie de monocellules et de stacks, y compris par des épreuves accélérées. Développement de contre-mesures aux effets de dégradation. Compréhension de mécanismes de dégradation des matériaux et aux interfaces dans les conditions de fonctionnement de l'application stationnaire.
- Nouveaux outils de diagnostic (pour la gestion de l'eau, un contrôle simplifié de la tension de cellule...)
- Recherche et développement pour améliorer la performance de tous les composants individuels du système : pile, reformeur, échangeurs de chaleur, gestion du combustible Diminution du coût du système complet (verrou identifié comme prioritaire au Japon).

Marchés précoces – applications portables

- Durabilité de micro piles à combustible dans des conditions typiques de fonctionnement compatible avec une utilisation prolongée et à des densités de puissance requises
- Procédés de production reproductibles et de qualité

Les thèmes précédents plus orientés dans la recherche dite « amont », se retrouvent en grande partie dans les objectifs du GdR « Piles A Combustible, Systèmes » soumis à la labellisation par le CNRS.

3. Forces et faiblesses

Forces :

- Structuration de la communauté "Piles à Membranes" (PACEM) par les GDR depuis 8 ans
- Très nombreuses labellisations de programmes ANR PAN-H et H-PAC impliquant des consortia d'unités associées au CNRS faisant partie du GdR (cet item s'applique aussi au GdR ITSOFC)
- Pluridisciplinarité amont / aval : recherches dans les laboratoires CNRS à la fois sur les matériaux, sur les systèmes et l'intégration : Il est important de maintenir ces deux aspects
- Masse critique de chercheurs : Mais peu de "vrais centres" visibles à l'international
- Programme national ANR PAN'H et H-PAC : Permet le financement des recherches finalisées, mais aussi des sujets importants sont abordés comme la dégradation, la durée de vie, des assemblages, nouveaux matériaux...
- Complémentarité avec les laboratoires CEA : Mais ne pas limiter le CNRS au secteur amont

Faiblesses :

- Absence d'une feuille de route nationale
- Plusieurs programmes et plateformes sans véritable coordination de l'ensemble (ANR – H-PAC, ADEME - HyPac, OSEO - H2E)
- Mise en concurrence (au niveau du financement) entre technologies par les agences de moyens
- Faible financement des recherches à long terme : Manque un programme sur le long terme, budget PIE H₂-PAC trop faible, Recherches dans le cadre de l'ANR pilotées par l'aval
- Faible implication dans les programmes européens, Projets PAN'H, H-PAC plus accessibles qu'un projet PCRD mais taux de réussite comparables, Vision tournée vers le national – affaiblissant la culture et l'information au niveau européen et international
- Absence de continuité dans le tissu industriel en France pour développer une filière complète (faiblesse de l'industrie chimique, en particulier pour les matériaux)
- Peu de concrétisations : les PEMFC apparaissent en France toujours comme une technologie en devenir
- Certaines collaborations difficiles à établir avec le secteur aval
- Recherche de la "rupture technologique" aux dépens de la recherche incrémentale et de la recherche à long terme
- La France ne semble pas en mesure de développer des applications industrielles compétitives.

Piles à combustible (SOFC, PCFC) et électrolyseurs haute température

1. Etat de l'art

L'appellation "Solid Oxide Cell" (SOC) rassemble tous les dispositifs électrochimiques basés sur un électrolyte céramique oxyde fonctionnant à moyenne ou haute température pour produire de l'énergie ou la stocker (Fig. 1); ceci concerne à la fois la pile à oxyde solide SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) et l'électrolyseur de la vapeur d'eau à oxyde solide SOEC (Solid Oxide Electrolyser Cell). Le fonctionnement à température élevée permet à ces dispositifs de s'affranchir de catalyseurs coûteux, d'avoir un rendement élevé, de pouvoir utiliser du gaz naturel (pour les piles à combustible).

Pour l'application de production d'hydrogène, le développement du procédé d'électrolyse haute température de la vapeur d'eau qui permet d'atteindre un rendement énergétique de 90 %, laisse envisager la substitution possible aux procédés conventionnels basés sur les énergies fossiles avec l'avantage supplémentaire d'émettre peu ou pas de CO₂, si l'électricité est d'origine nucléaire ou renouvelable. *(Au niveau mondial, l'hydrogène est produit à 48 % par vapo-reformage du gaz naturel, à 30 % par vapo-reformage ou oxydation partielle de produits pétroliers, à 18 % par gazéification de charbon et seulement à 4 % par électrolyse de l'eau à basse et moyenne températures).*

Quel que soit le dispositif, les éléments constitutifs d'une cellule, cathode, électrolyte et anode sont des céramiques oxydes. A cela s'ajoute, les matériaux d'interconnexion et de scellement qui permettent respectivement d'assembler les cellules et de réaliser l'étanchéité. Ces dispositifs fonctionnent à moyenne (400-600°C) ou haute température (600-800°C) en raison de la conductivité ionique limitée des électrolytes céramiques à plus basse température. En dessous de 400°C, la membrane électrolyte céramique n'est plus compétitive par rapport à la membrane polymère. Parmi les électrolytes céramiques oxydes, se distinguent les conducteurs par ions O²⁻ (l'exemple le plus connu est la zircone stabilisée YSZ) et les conducteurs par ions H⁺ (par exemple le cérate de baryum substitué par de l'yttrium, nommé BCY10). L'intérêt de ces derniers est d'obtenir une conduction ionique significative à plus basse température.

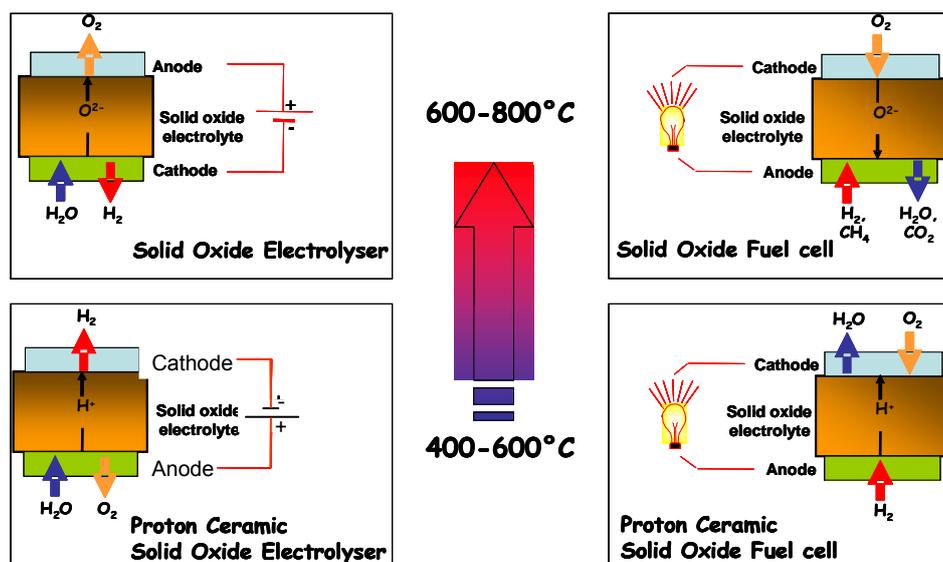


Figure 1. Schémas de principe des différents dispositifs étudiés dans la thématique SOC (selon la température de fonctionnement)

Les systèmes basés sur un électrolyte de type zircone stabilisée fonctionnent actuellement autour de 800°C (SOFC haute température) causant certains problèmes, comme un vieillissement trop rapide des matériaux, un cyclage en température difficile (mauvaise tenue mécanique des matériaux), nécessité d'utiliser des matériaux d'interconnexion onéreux.

La diminution de la température de fonctionnement jusqu'à 500 – 700 °C est un objectif majeur.

La mise au point d'une technologie de deuxième génération à "température intermédiaire" est devenue un consensus général dans notre communauté des piles à combustible car elle permettrait d'atteindre les objectifs technico-économiques requis pour une pénétration du marché de la production décentralisée d'électricité (stationnaire et mobile). Ces dispositifs sont basés sur un électrolyte conducteur anionique soit de type zircone stabilisée déposé en couche mince ou sur des nouveaux matériaux de type céline, apatite, pérovskite, etc...Ceci permettra d'une part d'utiliser des aciers plus classiques pour les plaques d'interconnexion et pour le système en général, et d'autre part de limiter les phénomènes d'inter-diffusion et de réactivité des solides qui se produisent à température élevée (recherche de fiabilité à long terme).

En parallèle à ces travaux, des recherches sur des électrolytes céramiques conducteurs protoniques doivent être encouragés. Ils constitueraient une véritable rupture technologique, avec une diminution de la température de fonctionnement entre 400 et 600°C. Dans ces dispositifs de troisième génération, l'électrolyte est encore un oxyde conducteur par ions O^{2-} à haute température, mais à plus basse température ($T < 600^{\circ}C$) et sous atmosphère humidifiée (typiquement $p_{H_2O} = 0.025 \text{ atm}$), il devient conducteur protonique. La pile à combustible, basée sur ce conducteur par ions H^+ est appelée PCFC (Proton Ceramic Fuel Cell) voire actuellement PC-SOFC (Proton Ceramic SOFC) car elle repose aussi sur un électrolyte oxyde solide (Fig. 1).

Atteindre l'objectif de diminuer la température de fonctionnement implique non seulement la recherche de nouveaux matériaux d'électrolyte conducteurs anioniques et/ou protoniques mais aussi une recherche de nouvelles électrodes. En effet, la diminution de température entraîne une augmentation des chutes ohmiques (Fig. 2) et des surtensions liées à la diminution de la conductivité de l'électrolyte et à la cinétique ralentie des réactions électrochimiques. Ceci nécessite d'améliorer les performances de quasiment tous les éléments constitutifs du cœur de pile (valable aussi pour l'électrolyse), notamment de l'anode et de la cathode où se produisent les réactions d'oxydoréduction.

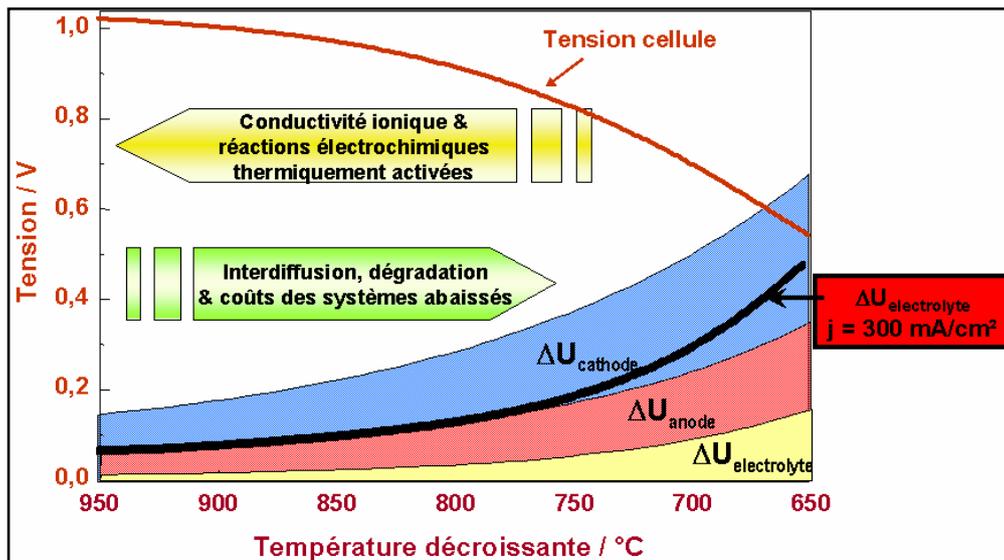


Figure 2 : Tension de cellule d'une pile SOFC selon sa température de fonctionnement

D'un point de vue général, le développement des dispositifs SOCs passe par la résolution de divers points durs : choix de politiques énergétiques, choix économiques d'industriels, résolution de verrous techniques. Le CNRS doit avoir une contribution notamment sur ce dernier point et plus spécialement dans les recherches concernant les cœurs de pile, voir le développement de stack.

Les équipes de recherche du CNRS ont privilégié deux axes étroitement liés à leurs compétences de base dans les domaines de la chimie du solide, du génie des matériaux, de l'électrochimie et de la modélisation.

- ▀ la conception de nouveaux matériaux performants pour l'électrolyte et les électrodes mais aussi pour interconnecteurs et joints de scellement.
- ▀ la maîtrise de la mise en forme des cellules élémentaires, leurs tests (performances et durabilité).

Ces recherches sont originales en Europe, certaines très spécifiques à la France, et ont un niveau mondial reconnu.

2. Quelles thématiques doit-on alors soutenir ?

Elles sont déclinées dans la demande de GdR « Piles A Combustible, Systèmes » :

Nouveaux matériaux pour Solid Oxide Cells

✔ *Electrolytes céramiques*

La réflexion doit concerner des matériaux nouveaux en termes de structure cristalline, de composition et de mécanismes de diffusion ou de propriétés de transport au sens large. La communauté des chimistes du solide doit se montrer active dans ce domaine et elle représente à ce jour un atout important et quasiment une exception en Europe.

L'un des points clés concerne la recherche d'un nouvel électrolyte solide pour SOFC (IT-SOFC et PC-SOFC) répondant à un cahier des charges de fonctionnement à une température inférieure à 700 °C : une conductivité ionique de $10^{-1} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ à cette température constituerait une avancée majeure. Ces recherches devront s'appuyer sur une modélisation des mécanismes de transport prospective.

✔ *Nouveaux matériaux d'électrodes*

L'abaissement de la température de fonctionnement nécessite d'améliorer aussi et de manière significative les performances électrocatalytiques des électrodes, sièges de fortes surtensions.

Coté cathode, une voie innovante consiste à rechercher de nouvelles familles de matériaux **conducteurs mixtes** (à la fois conducteurs électroniques et ioniques de l'oxygène, MEIC). Ces matériaux devront, de plus, être résistants à l'empoisonnement au chrome issu des interconnecteurs. Des progrès significatifs ont

été réalisés par le CNRS au cours de ces dernières années (brevets). Ils doivent être concrétisés par un développement industriel de ces matériaux.

Côté anode (combustible), l'utilisation d'autres combustibles autres que l'hydrogène (méthane, biogaz, gaz de synthèse) qui constitue un atout majeur des SOFCs, la mise au point de nouveaux catalyseurs insensibles notamment à la présence de soufre est indispensable. L'anode de la pile doit, ainsi, posséder à la fois de bonnes propriétés catalytiques pour le reformage ou l'oxydation directe du combustible et des performances électrochimiques significatives pour la réaction d'oxydation elle-même. Un effort important pour la recherche de nouveaux catalyseurs pour l'utilisation de bio-combustibles, bio-gaz doit être fait.

✔ **Interconnecteurs et verres de scellement**

Cette thématique connaît un développement important lié à la réalisation d'assemblages de cellules élémentaires pour les tester en empilements (stacks). Le verre de scellement permet de réaliser l'étanchéité entre une cellule et son support. Les interconnecteurs doivent à la fois permettre de collecter le courant et de séparer comburant et combustible. Les matériaux doivent donc être de bons conducteurs électroniques, étanches et en raison du niveau de température élevé, et avoir une bonne résistance en milieu oxydant et réducteur.

Une voie innovante est la réalisation par dépôt successifs des matériaux de cœur de pile sur un interconnecteur métallique support poreux. Cette dernière technologie, appelée cellule à métal support, permettrait notamment une réduction de l'épaisseur de l'anode, améliorerait les cinétiques d'échange et diminuerait le coût de la cellule. En outre, le meilleur contact entre l'interconnecteur et l'anode devrait augmenter la durée de vie des cellules.

Au sein du CNRS, une communauté nouvelle associant des métallurgistes pour les plaques bipolaires et des chimistes des verres de scellement devrait être encouragée à participer. Cette communauté, déjà proche de celle des chimistes du solide au CNRS et au CNU, serait à même de pouvoir répondre aux questions des industriels tels que EDF, GDF, St Gobain ou le CEA, pour la réalisation de dispositifs à petite ou moyenne échelle.

Mise en forme des matériaux de cœur de piles

Une des étapes fondamentales dans l'élaboration d'éléments de piles à combustible ou d'électrolyseurs est la synthèse des composés d'électrodes ou d'électrolyte sous forme de poudres fines à morphologie contrôlée ou de gels à viscosité donnée.

Des recherches actives dans ce domaine sont menées par plusieurs équipes du CNRS et doivent être poursuivies.

La réalisation d'une cellule SOFC ou SOEC nécessite ensuite une mise en forme spécifique des électrodes et/ou de l'électrolyte: l'électrolyte doit être sous forme d'une membrane dense, étanche, d'épaisseur variant de 15 μm à 150 μm et sépare les électrodes déposées sous forme de couches minces ou épaisses à porosité variable et contrôlée.

L'évolution récente des techniques permet d'aborder aujourd'hui la réalisation d'une grande variété de matériaux sous forme de couches minces, notamment d'oxydes. Plusieurs groupes du CNRS possèdent un savoir-faire indéniable et reconnu pour la confection de couches minces ou épaisses de matériaux pour SOC (techniques sol-gel, coulage en bandes, sérigraphie, projection plasma, PVD magnétron,...).

Le défi majeur est la réalisation de cœurs de pile SOFC en utilisant des technologies « bas coût » qui permettraient d'obtenir la cellule complète en un minimum d'étapes lors du process de fabrication.

Electrochimie des cœurs de cellules

Plusieurs équipes du CNRS sont à ce jour à la fois sur le plan technique mais aussi sur le plan des connaissances de base à un niveau international en ce qui concerne l'étude des propriétés électriques et électrochimiques des cellules. Citons à titre d'exemples la réalisation d'études *in situ* des matériaux sous polarisation, de mesures originales de conductivité par relaxation, des propriétés de transport ionique par échange isotopique, ...

Par ailleurs, le volet modélisation prend une importance croissante pour la compréhension des mécanismes de transport électronique et/ou ionique qui gouvernent les matériaux d'électrolyte et d'électrodes et la réalisation d'électrodes. Plusieurs équipes se consacrent à la modélisation des processus électrochimiques

avec l'établissement des propriétés locales des électrodes. Cette démarche permet de comprendre et de hiérarchiser l'importance des phénomènes physiques mis en jeu. Elle fournit les éléments fondamentaux indispensables à l'analyse du fonctionnement des cellules électrochimique, à l'optimisation et à l'établissement de recommandations.

Performances des cellules, durabilité et robustesse

Cette thématique, assez proche de l'application, concerne la caractérisation de cellules et de stacks en mode pile SOFC ou électrolyseur EHT et l'étude de la réactivité et de la durabilité de cœurs de pile en conditions de fonctionnement. Des tests de longue durée et des analyses *post mortem* permettent de mieux comprendre les mécanismes de dégradation. Des bancs de tests de cellules de petites et moyennes dimensions (1 - 25 cm²) sous différentes conditions de gaz sont disponibles dans quelques équipes.

Le vieillissement des cellules est l'un des problèmes les plus importants. Il requiert d'étudier la réactivité solide – solide et le vieillissement aux interfaces (précipitation de phases nouvelles, diffusions inhibitrices...) des cellules mais aussi l'empoisonnement par le chrome issu des interconnecteurs.

L'amélioration de la tolérance des matériaux anodiques au sulfure d'hydrogène est aussi un problème important à considérer dans la mesure où il est envisagé d'utiliser des gaz de synthèse, des biogaz ou encore du gaz naturel contenant des molécules soufrées.

3. Conclusions

Le CNRS se situe à très bon niveau dans le contexte international en ce qui concerne la recherche de base sur les composants de cœur de pile. Elle est notamment depuis quelques années excellentement positionnée dans le domaine de l'électrolyse de la vapeur d'eau (activité redémarrée en Europe en 2004) en relation avec les objectifs de la politique énergétique française.

Grâce au GDR, la communauté est bien identifiée et la collaboration avec quelques industriels (EDF, St Gobain, GDF) et notamment le CEA bien établie. Cette dernière s'est renforcée au cours des dernières années par la participation à de nombreux contrats, le soutien du CEA dans le financement de thèses, des réunions du GDR.

Les supports financiers de l'ANR et de l'ADEME ont permis à certaines équipes d'atteindre la dimension internationale et de participer dans des programmes européens. Le CNRS y contribue par ses chercheurs et le GDR, de manière beaucoup plus modeste dans ses appels à projets.

La faiblesse est la dissémination des groupes dans de nombreux centres (une vingtaine), même si certains émergent. Ceci se traduit par une faiblesse dans l'organisation générale : le CNRS gagnerait à avoir un représentant "officiel" ayant la tâche dévolue de le représenter dans diverses instances et ayant mandat pour le faire.

Une autre faiblesse de l'organisation générale est l'absence d'un centre de valorisation des recherches menées au CNRS. Une réflexion devrait être menée avec le CEA pour que les deux organismes arrivent à créer à terme un centre de développement, par exemple équivalent au [Forschungszentrum Jülich](#) en Allemagne ou Risoe-Topsoe (partenariat public-privé) au Danemark.

Hydrogène : production (hors électrolyse), stockage ; transport

Le Programme Interdisciplinaire Energie du CNRS, par l'intermédiaire de son Groupe d'Action Thématique « Piles A Combustible, Hydrogène » a contribué à structurer la communauté Hydrogène, ce qui a conduit à la labellisation en 2008 du GdR ACTHYF « Acteurs de la communauté Hydrogène en France ». Ce qui suit est en grande partie le fruit de la réflexion des membres de ce GdR.

1. Etat de l'art

Productions d'hydrogène économes en CO₂ (hors électrolyse)

La production d'hydrogène économe en CO₂ implique le choix de sources d'hydrogène exemptes de carbone (sources naturelles, décomposition de l'eau, etc.) ou contenant un carbone renouvelable (biomasse).

Hydrogène géologique

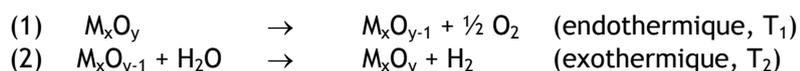
Cette thématique est dédiée à l'étude de la production naturelle abiotique de l'hydrogène. Il s'agit de mener des expérimentations en laboratoire pour reproduire les réactions intervenant au niveau de sites où l'hydrogène naturel est produit (dorsales océaniques, zones de faille). Ces expériences auront pour but de contraindre les relations composition-température-pétrophysique des roches-cinétique de production-flux d'hydrogène. En présence de CO₂, on peut également jouer sur la production d'H₂ et le stockage de CO₂. Un deuxième volet concerne l'utilisation de membranes à hydrogène développées par le monde industriel ou académique et testées dans des conditions pression-température-chimie proches du système naturel. Ces expériences auront pour but de vérifier la bonne tenue des membranes dans les conditions agressives rencontrées dans le milieu naturel, et finalement la possibilité d'extraction d'H₂ "in-situ". Enfin, il s'agira de caractériser des sites de production naturelle d'H₂. A l'heure actuelle, les travaux sont focalisés sur les dorsales océaniques mais il existe d'autres sources possibles. Ces travaux seront menés avec d'autres acteurs en sciences de la terre, spécialistes de la géologie et des mesures de terrain.

Hélio-hydrogène

Cet axe concerne la décomposition de l'eau par cycles thermochimiques de production d'hydrogène basés sur la mise en œuvre de réactions chimiques successives dont le bilan global est :



Après le développement d'une base de données d'environ 300 cycles (CNRS), des analyses thermodynamiques et expérimentales ont permis de sélectionner des cycles courts (2 à 3 étapes) basés sur les réactions d'oxydoréduction suivantes :



Ces réactions ne sont pas réalisables avec une source d'énergie nucléaire car l'étape endothermique nécessite des températures de 1200°C à 1800°C. Par contre, elles sont tout à fait envisageables avec l'énergie solaire concentrée.

Trois familles de cycles oxydes sont envisageables :

- Les cycles à oxydes non volatils (exemple, Fe₂O₃)
- Les cycles à oxydes volatils (exemple, ZnO)
- Les oxydes mixtes ou ferrites (exemple, NiMnFe₄O₈)

Pour chaque famille, il s'agit d'identifier les schémas réactionnels, de déterminer les cinétiques de réactions, de comparer les rendements (chimiques et énergétiques) attendus, de mettre en évidence les étapes limitantes des procédés associés et, enfin, de prévoir les rendements globaux de conversion : source d'énergie primaire → hydrogène, en fonction des bilans matière et énergie associés à chaque famille.

Les études actuelles visent à définir les cinétiques des réactions de décomposition et d'hydrolyse des cycles thermochimiques les plus prometteurs basés sur des réactions rédox de couples oxyde/métal et oxydes/sous-oxydes et à réaliser des synthèses d'oxydes mixtes réactifs avec la vapeur d'eau. Les compétences en chimie du solide de certains acteurs du GDR seront ici un atout très intéressant.

Bio-hydrogène

L'activité dans ce domaine vise à développer de nouveaux outils, issus ou inspirés du monde vivant, afin de valoriser l'hydrogène dans les secteurs suivants : photo-production, fermentation, valorisation de biomasse, bio-piles et chimie bio-inspirée. Plusieurs pistes sont envisagées pour permettre de mettre graduellement en place des applications liées à l'exploitation de l'hydrogène. Il s'agit de i) de la comparaison et du choix des souches bactériennes produisant l'hydrogène, ii) de la compréhension du rôle des enzymes hydrogénases dans le métabolisme énergétique, iii) des études et des optimisations moléculaires des potentialités enzymatiques, iv) de la conception de nouveaux catalyseurs, v) de l'étude de biosenseurs et de bio-piles et vi) de la production biologique d'hydrogène.

Hydrogène photo-électrolytique

Une approche prometteuse concerne l'électrolyse de l'eau photo-assistée, voire la photo-décomposition électrochimique directe de l'eau, à l'aide de photo-électrodes à base de semi-conducteurs de type n (n-SC) ou p (p-SC). D'après la littérature (Fujishima et Graätzel), les nombreuses tentatives destinées à déplacer la fenêtre d'absorption de TiO₂ dans le domaine visible ou à élaborer des oxydes n-SC à énergie de bande interdite adaptée ont échoué ou ont conduit à des matériaux sensibles à la photo-corrosion. Des progrès

significatifs ont été obtenus en séparant les fonctions d'absorption de la lumière (par des colorants), de séparation de charge (une interface entre un n-SC à large énergie de bande interdite tel TiO_2 ou la pérovskite SrTiO_3 et un électrolyte) et d'électrocatalyse. La mise au point de tels catalyseurs reste un défi qui nécessite le développement de collaborations transversales entre chimistes, électrochimistes et photo-physiciens.

Stockage solide de l'hydrogène

Parallèlement aux difficultés liées à une production propre de grandes quantités d'hydrogène, se pose également le problème de son stockage en particulier pour les applications embarquées. Différents moyens de stockage ont été envisagés pour l'hydrogène et sont actuellement en concurrence : le stockage gazeux sous pression, le stockage cryogénique sous forme liquide et enfin le stockage solide dans des hydrures et des matériaux adsorbants. Ce dernier mode de stockage bénéficie d'une communauté nationale très active et qui couvre assez largement les différents systèmes envisagés.

Hydrures métalliques

De nombreux métaux et alliages ont la propriété d'absorber réversiblement l'hydrogène. Cette solution présente beaucoup d'intérêt en termes de sécurité, de rendement global et de fiabilité. Toutefois, pour être rentables, ces composés doivent présenter des capacités spécifiques élevées, une bonne réversibilité, une cinétique rapide et un respect de l'environnement. Les nombreuses recherches menées ces dernières années sur les composés intermétalliques ont pu mettre en évidence leur bonne capacité volumique (de l'ordre de 100 g.dm^{-3}) ce qui en fait un moyen de stockage très compact. Cependant, leur capacité massique (1 à 3 %) reste faible pour les applications embarquées. Il existe toutefois des pistes pour améliorer ce paramètre. Les recherches actuelles pointent vers une déstabilisation des hydrures trop stables (application d'une pression physique ou chimique) ou une amélioration des cinétiques d'absorption/désorption par l'ajout d'éléments "activants". Trois familles de matériaux sont particulièrement étudiées : les composés à base de magnésium, les dérivés des phases de Laves de structure cubique centrée (bcc) ainsi que des polytypes originaux dans des systèmes à base d'alcalino-terreux et de métaux de transition. Les recherches couvrent l'élaboration, l'optimisation de la mise en forme ainsi que les caractérisations structurale, physicochimique et thermodynamique des alliages et hydrures correspondants. Un autre volet concerne la synthèse sous très hautes pressions d'hydrogène qui permet la démixtion contrôlée de nano-précipités catalytiques ou encore la synthèse de composés métalliques hyperlacunaires aux propriétés originales.

Hydrures complexes réversibles

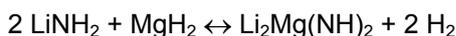
Les hydrures métalliques complexes sont des composés pour lesquels les atomes d'hydrogène établissent des liaisons covalentes ou ioniques avec les atomes métalliques voisins. Ce type de liaison contraste avec celui mis en jeu dans les hydrures métalliques interstitiels décrits précédemment où l'interaction hydrogène-métal est de type métallique. Les hydrures métalliques complexes peuvent être classés dans deux familles : les hydrures complexes de métaux de transition, comme BaReH_9 et Mg_2FeH_6 , et les hydrures complexes de métaux autres que ceux de transition, comme NaAlH_4 , NaBH_4 et LiBH_4 . En ce qui concerne les propriétés de stockage, la première famille possède des rapports hydrogène/métal très élevés ($\text{H/M} = 4,5$ pour le BaReH_9) ainsi qu'une forte capacité volumique (150 g.dm^{-3} dans Mg_2FeH_6). En revanche, ces hydrures sont thermodynamiquement assez stables. Pour atteindre une pression de désorption d'hydrogène de 1 bar, des températures supérieures à 300°C sont habituellement nécessaires. Pour les hydrures complexes de métaux autres que ceux de transition, des températures de désorption plus modérées sont suffisantes. Ainsi, des conditions plus proches des conditions normales de pression et de température sont obtenues pour l'alanate de sodium NaAlH_4 , l'hydrure complexe le plus intéressant aujourd'hui pour le stockage réversible de l'hydrogène ($C_{\text{rev}} = 5.6\% \text{ mass.}; 75 \text{ g.dm}^{-3}$).

Les amidures et imidures métalliques forment une autre famille d'hydrures complexes possédant respectivement des groupements covalents NH_2^- et NH^{2-} . Des propriétés très intéressantes pour le stockage de l'hydrogène ont été obtenues avec le système Li-N-H. Le nitrure de lithium Li_3N absorbe 11.4 % massique d'hydrogène à 255°C sous 3 bars de pression. La réaction a lieu en deux étapes :



La seconde étape (6,5 % massique) est réversible. Elle est caractérisée par un plateau de pression situé à environ 1 bar à 280°C . La désorption d'hydrogène à partir de l'amidure de lithium LiNH_2 passe par la formation intermédiaire d'ammoniac NH_3 . Celui-ci réagit rapidement avec LiH en formant l'imidure de lithium Li_2NH et l'hydrogène. La réaction entre NH_3 et LiH est si rapide qu'aucune vapeur d'ammoniac n'est libérée pendant la désorption. En raison de la toxicité de l'ammoniac et du possible empoisonnement de la pile à combustible, le rôle de piège à NH_3 joué par LiH doit être garanti en vue de l'utilisation de ces composés pour le stockage réversible de l'hydrogène.

Par ailleurs, la substitution de LiH dans le mélange LiH /LiNH₂ par un hydrure moins stable, comme MgH₂, permet d'abaisser la température de désorption d'hydrogène. Le chemin réactionnel est le suivant :



Cette réaction permet de stocker réversiblement 5,6 % d'hydrogène en masse à 180°C. Ce système est caractérisé par ses bonnes propriétés thermodynamiques, puisqu'une pression d'équilibre de 1 bar d'hydrogène à près de 100°C est possible. Toutefois, les cinétiques d'absorption/désorption d'hydrogène doivent encore être améliorées pour les températures inférieures à 180°C.

Pour cette raison, les amidures et imidures métalliques font actuellement l'objet de nombreuses études.

D'autres nitrures métalliques, comme Ca₃N₂, ont également été signalés comme des matériaux absorbants réversiblement de l'hydrogène.

Hydrures complexes irréversibles

Ces matériaux sont adaptés au stockage d'hydrogène pour des applications fixes ou portables d'hydrogène à la demande. L'objectif est de développer un générateur passif d'hydrogène permettant d'alimenter une pile à combustible pour des applications de faible puissance (téléphonie mobile et outils nomades). Le principe du générateur repose sur la réaction d'hydrolyse des borohydrures, qui disposent d'une capacité de stockage élevée en hydrogène (de l'ordre de 10 %), et le but principal de la recherche est l'optimisation des conditions d'hydrolyse par la catalyse. La réaction standard correspond à une hydrolyse :



Dans ce système de type « start and stop », la recherche d'un catalyseur induisant une production rapide et totale d'hydrogène est primordiale. Il s'agit de maîtriser la cinétique de libération d'hydrogène et d'approcher les rendements théoriques. Les rendements d'hydrolyse et la capacité de maîtrise de la réaction peuvent être évalués par calorimétrie et mesures volumétriques du dégagement d'hydrogène associé.

Lors de la réaction d'hydrolyse du borohydrure de sodium NaBH₄, l'eau devient un réactif et le rendement de stockage de l'hydrogène est fonction de la stoechiométrie borate-eau après la réaction. Ainsi il chute de 10,8% (réaction à 2 moles d'eau) à 7,3% (réaction à 4 moles d'eau) selon l'hydrate du métaborate formé.

- Matériaux poreux

Le stockage de l'hydrogène peut s'effectuer par physisorption à basse température sur des matériaux présentant de très grandes surfaces spécifiques. A la différence des hydrures, le phénomène d'adsorption met en jeu de l'hydrogène moléculaire sans dissociation de la molécule. Les interactions sont de type Van der Waals et les énergies de liaison mises en jeu sont faibles ce qui ne peut conduire à des capacités significatives qu'à basse température (typiquement à la température de l'azote liquide) et sous des pressions parfois élevées. De plus, la capacité est très fortement dépendante de la surface spécifique développée dans le matériau. On observe en général une isotherme d'adsorption dite de type I ou de Langmuir qui correspond à la formation d'une monocouche simple et complète à la surface du matériau.

Différentes familles de matériaux peuvent être envisagées pour le stockage de l'hydrogène par adsorption à basse température. Dans tous les cas, ces matériaux présentent des surfaces spécifiques élevées liées à la présence de volumes micro- ou nanométriques ou à un caractère fortement divisé. On peut citer :

- les carbones activés. Ils sont obtenus par gazéification du charbon ou de l'antracite en phase vapeur à 1000°C, par activation chimique à l'acide phosphorique ou KOH et carbonisation à 500°C, par pyrolyse de polymères synthétiques (polyacrylonitrile) ou par préparation de réplique de silicates. Ils sont constitués de plans de graphène très désorganisés développant ainsi de larges surfaces spécifiques. Des capacités de stockage d'hydrogène de 5.1% à la température ambiante et à 20 MPa ont été déjà obtenues. La microporosité des meilleurs matériaux pourrait être encore modifiée soit par compression à haute température, le nombre et la largeur des pores dépendront des paramètres temps, pression, température ; soit par craquage de méthane à une température comprise entre 750 et 850°C.
- les organométalliques de type métal-dicarboxylate de benzène tel que M(OH)(O₂C-C₆H₄-CO₂) (M = Al³⁺, Cr³⁺). Leur structure forme des tunnels carrés infinis de l'ordre de 0,85 nm de côté et les réseaux organométalliques (Metal Organic Framework ou MOF) comme le MOF-5 de formule chimique Zn₄O(BDC)₃(DMF)₈(C₆H₅Cl) avec (BCD = 1,4 -dicarboxylate de benzène; DMF = diméthyl-formamide) adopte une structure bâtie sur des clusters de tétraèdres ZnO₄ reliés ensemble par des groupements organiques conduisant à la formation de tunnels unidimensionnels en forme de losange de section 7,8 x 11,2 Å². Les charpentes poreuses résultant de ces assemblages peuvent se décrire dans deux sous-groupes. Le premier comprend des architectures poreuses rigides à base de tunnels unidimensionnels

ou de larges cavités caractérisés par des surfaces spécifiques de Langmuir variant de 1000 jusqu'à 5500 m².g⁻¹. Le second groupe de composés est défini par l'existence de réseaux flexibles avec des tunnels ou des cages dont la taille évolue en fonction des espèces insérées (gaz –CO₂, CH₄– ou liquide –éthanol, DMF,...). Différentes phases de type MIL, développées à l'Institut Lavoisier de Versailles, ont fait l'objet de mesures pour leurs capacités d'adsorption d'hydrogène. Ainsi, il a été observé que la phase MIL-53 est capable d'adsorber l'hydrogène jusqu'à 3,8 % (massique) pour le composé à l'aluminium et 3,1 % pour l'isotype au chrome à 77K sous 16 bars. D'autres tests d'adsorption d'hydrogène ont également été réalisés sur les carboxylates à base de trimères de chrome : MIL-100(Cr), MIL-101 (Cr) et MIL-102 (Cr). Le solide MIL-102 est un tétracarboxylate de chrome présentant des tunnels de petite taille (< 5 Å) et n'absorbant pas d'azote à 77 K. Les performances, à 77 K, sont fonction de la taille des pores : de 1 % pour le MIL-102 à 35 bar jusqu'à 6,1 % pour le MIL-101 à 80 bar. A température ambiante, les résultats sont inversés avec 0,43 % pour le MIL-101 mais 0,05 % pour le MIL-102.

Enfin, l'hydrogène peut également être stocké par voie électrochimique dans les carbones nanoporeux par électro-réduction de l'eau. L'hydrogène piégé est faiblement chimisorbé, ce qui rend cette propriété très attractive pour des applications au stockage électrochimique de l'énergie. On peut ainsi envisager d'utiliser les carbones poreux comme électrode négative dans des batteries ou supercondensateurs. D'après les travaux accomplis, il semble que les paramètres principaux qui contrôlent les performances électrochimiques sont le volume d'ultra-micropores (<0.7-0.8 nm) et la fonctionnalité de surface des carbones. Cependant, il a été pour l'instant impossible d'établir des corrélations qui permettent de décrire les performances observées et de définir des stratégies d'optimisation et il convient donc de continuer les études en cours afin de mieux définir les sites actifs ainsi que la forme des pores optimaux pour un stockage efficace.

Modélisation des matériaux

Parallèlement à l'étude des matériaux, une étape de modélisation s'avère indispensable pour une meilleure compréhension des phénomènes mis en jeu et pour guider les expérimentateurs dans leurs recherches de matériaux toujours plus performants.

Au plan théorique, il s'agit d'apporter un éclairage au niveau fondamental sur les matériaux en relation avec leurs propriétés d'absorption d'hydrogène au moyen d'études *ab initio* dans le cadre de la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT). Pour les applications, et en particulier le stockage, les propriétés thermodynamiques (stabilité, capacités maximum d'absorption d'hydrogène...) jouent un rôle crucial. Elles peuvent être modulées par des substitutions grâce à des éléments de taille et de nature chimique différentes qui modifient les propriétés élastiques et électroniques de l'intermétallique et par voie de conséquence, les propriétés d'absorption d'hydrogène. L'objectif est d'établir des lois de comportement et d'en comprendre l'origine microscopique, grâce aux calculs *ab initio*, afin de guider plus efficacement le choix des matériaux pour l'application souhaitée.

Les matériaux à l'étude sont des composés intermétalliques à base de métaux de transition et terres rares, substitués ou non, des hydrures complexes à base de métaux de transition et d'alcalins ou alcalino-terreux, ainsi que des hydrures complexes constitués d'éléments légers.

Sur le plan de la physisorption, plusieurs pistes sont envisagées. Il s'agit en particulier de renforcer la physisorption par du dopage d'éléments donneurs d'électrons vis à vis des espèces de la matrice poreuse afin de créer des champs électriques suffisant dans les cavités pour stocker par effet de polarisation (aussi appelé induction) de l'hydrogène. En ce qui concerne les matériaux hybrides, associant des poreux à des particules métalliques dispersées dans la matrice, il s'agit d'identifier les meilleurs métaux à disperser, de déterminer la taille optimale des agrégats pour un stockage réversible et la stabilité thermodynamique des agrégats dispersés. Un effort doit être porté également sur le choix des matrices d'accueil (mésopores versus micropores, carbones MOF, répliques de zéolithes, etc.).

Développement des réservoirs : contraintes mécaniques, échanges thermiques et cinétiques

Quelle que soit la méthode de stockage utilisée (gaz sous pression ou sorption dans un matériau solide), il est nécessaire de développer des enveloppes efficaces pour contenir la matière active des réservoirs et permettre les échanges de flux (fluide, chaleur, etc...).

En ce qui concerne la haute pression, la solution innovante pour ce type de stockage vient aujourd'hui des structures en fibres bobinées et en résine qui permettent d'atteindre des pressions de stockage élevées tout en réduisant la masse de l'enveloppe. Actuellement, des pressions de service de 350 bars sont couramment proposées et les recherches s'orientent vers des pressions encore plus importantes de l'ordre de 700 à

800 bars. Dans ces conditions, des capacités volumiques de l'ordre de 40 g.dm^{-3} sont obtenues et des capacités massiques de près de 5-6 % pour le système complet sont envisageables. La structure d'un réservoir composite en fibre et résine est toutefois plus complexe que celle d'un réservoir en acier. De par la forte anisotropie du matériau composite, il est nécessaire de concevoir, développer et réaliser des prototypes d'enveloppes en jouant sur les paramètres de l'enroulement filamentaire (procédé utilisé pour fabriquer le renfort en fibres bobinées) et de simuler leur comportement à l'aide d'outils numériques. Ces étapes doivent permettre d'optimiser en terme de tenue mécanique les structures ainsi réalisées.

Dans le domaine des réservoirs à hydrures ou plus généralement réservoirs pour stockage solide, de nombreuses avancées sont également attendues en ce qui concerne l'enveloppe. En particulier, le développement de ces enveloppes nécessite de maîtriser et d'améliorer les échanges thermiques. Les réactions induites par les phénomènes d'absorption ou d'adsorption sont tantôt exothermiques, tantôt endothermiques, et il convient en conséquence soit de gérer le dégagement de chaleur, soit d'en fournir afin d'entretenir le procédé. On notera que différentes techniques telles que l'ajout de Graphite Naturel Expandé (GNE) sont à l'étude. Par ailleurs, des interrogations subsistent sur les contraintes mécaniques engendrées par la dilatation de la poudre dans les réservoirs lors de l'hydruration. Pour ces deux premiers points, on s'attache à comprendre et modéliser le comportement tant du contenant (matériaux composites) que du contenu (matériaux carbonés, intermétalliques). Il est important de poursuivre dans cette voie et de développer une expertise des matériaux et une connaissance de leur comportement thermomécanique.

Enfin, et comme suite aux remarques précédentes, afin d'améliorer le rendement du procédé (forte exothermicité/endothermicité de l'absorption/désorption), il sera pertinent de concevoir des systèmes complexes, intégrant, par exemple, la récupération de la chaleur générée lors de la phase d'absorption, en la stockant dans un matériau à changement de phase (sels). Le stockage temporaire de la chaleur produite lors du chargement pourra ainsi être utilisé lors de la demande d'hydrogène (désorption). Il serait donc nécessaire de mener des études dans les domaines suivants :

- choix de matériaux à changement de phase ayant une température de fusion adaptée aux besoins de l'application,
- conception et optimisation de réservoirs intégrant des promoteurs de transferts thermiques et des matériaux à changement de phase,
- mesure des contraintes mécaniques subies par l'enveloppe du réservoir et dimensionnement de cette enveloppe.

Purification, membranes et catalyse

Membranes et procédés membranaires

Dans la plupart des méthodes de production de H_2 , une étape de séparation/purification est nécessaire. Pour cette étape, l'utilisation de membranes est une approche élégante, qui permet de pouvoir travailler en continu et qui peut, dans certains cas, augmenter le rendement ou abaisser la température des réactions de production de H_2 par un effet extracteur (déplacement des équilibres thermodynamiques). Pour certaines méthodes de production de H_2 , le développement d'une membrane à intégrer dans le procédé est même considéré comme un point clé pour sa viabilité.

- *Membranes polymères, hybrides et composites organique/inorganique*

En dessous de 200°C , les membranes polymères (qui fonctionnent par un mécanisme de solution/diffusion) sont utilisables. Ces membranes doivent généralement fonctionner sous forte pression pour donner des flux conséquents et fonctionnent par concentration de l'hydrogène et extraction préférentielle (solubilisation) des autres gaz tels que le CO_2 par exemple.

Un certain nombre de travaux actuels s'intéressent aux membranes hybrides et composites organique/inorganique pour améliorer la stabilité (thermique et chimique) et les performances (perméance/perméabilité) de ces membranes.

- *Membranes purement inorganiques*

Lorsqu'une extraction sélective de H_2 au travers de la membrane est nécessaire ou lorsque la séparation doit être réalisée au-delà de 300°C et/ou en milieu corrosif, seules les membranes purement inorganiques (métalliques ou céramiques) peuvent être utilisées. Les membranes commerciales à base d'alliages de Pd sont extrêmement sélectives mais leur coût reste lié à la disponibilité de la matière première. De plus, elles ne peuvent pas toujours répondre à la grande diversité des cahiers des charges pour la purification de H_2 (impuretés soufrées, conditions parfois sévères de pression, température, cyclages thermiques, corrosivité et complexité des mélanges, ...). Le JARI (Japon) et le

DOE (USA) ont donc lancé plusieurs programmes d'envergure ciblant le développement et l'intégration de membranes céramiques et composites céramique-métal dans les procédés de production de H₂.

A ce jour, les pistes les plus prometteuses concernent les membranes ultra-microporeuses à base de silice amorphe, de silicates ou bien les membranes denses composites de type perovskite-métal.

Des innovations sur les matériaux membranaires (organiques/inorganiques ou purement inorganiques) sont encore attendues pour apporter des solutions, tant au niveau de la reproductibilité et la thermostabilité des membranes et des supports, que de leurs performances en séparation, mais aussi de la durabilité, du coût et de la compacité des modules.

L'obtention d'avancées significatives dans ce domaine clé, très peu étudié en France, nécessite la structuration d'un consortium pluridisciplinaire (idéalement les membres du GdR) qui permettra :

- ▀ de développer de nouvelles membranes pour le transport sélectif de H₂, par ex. à partir des matériaux étudiés pour le stockage de H₂ (hydrures métalliques réversibles, MOFs,...)
- ▀ de mettre en œuvre une plateforme de test standardisée et sécurisée pour les membranes sélectives à H₂,
- ▀ de générer des programmes de R&D permettant une extension d'échelle au travers du développement de modules et de procédés intégrés.

Catalyse

De nombreux matériaux (alliages à base de magnésium, alanates, borohydrures,...) ne peuvent désorber rapidement l'hydrogène qu'en présence d'espèces additives qui jouent un rôle de catalyseur de la réaction. Il est donc très important de mener l'étude des procédés catalytiques (catalyseurs et/ou activateurs) et des énergies associées au stockage ou à la production d'hydrogène. Ceci demande la mise en œuvre de techniques calorimétriques et d'analyse thermique afin d'étudier les cinétiques de décomposition ou de réaction, la réversibilité des réactions et de déterminer les énergies d'activation de divers procédés de production d'hydrogène (hydrolyse des borohydrures, décomposition, réversibilité et cyclage des hydrures métalliques et alliages de structure cubique centrée, reformage catalytique). La caractérisation physicochimique avant et après réaction des catalyseurs et/ou activateurs impliqués dans ces processus fait partie intégrante des objectifs pour accéder au mécanisme réactionnel.

2. Identification des acteurs académiques et industriels

Les acteurs académiques du GdR ACTHYF sont répartis dans 30 laboratoires rattachés à 5 Instituts du CNRS : Chimie (INC), Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes (INSIS), Sciences de l'Univers (INSU), Physique (INP), Sciences Biologiques (INSB).

Les autres partenaires institutionnels sont le CEA, l'IFP, l'INERIS et l'ADEME.

Les acteurs industriels du domaine de l'hydrogène sont : Air Liquide, Total, BIC, GDF-Suez, Veolia, PSA, Renault (liste non-exhaustive).

3. Analyse de la structure de recherche : forces et faiblesses

- ▀ De très nombreuses compétences d'excellent niveau international dans tous les domaines scientifiques mentionnés précédemment (production, stockage, modélisation, transport)
- ▀ Une structuration en réseau maintenant bien établie : 3 GdR : ACTHYF, BIO-H2, PACTE
- ▀ Une très bonne participation auprès de l'ANR avec 15 labellisations sur PAN-H et H-PAC (H2PAC, HYBOU, APH, CATHY, SIPOPAC, CASTAFHYOR, ALHAMO, ECOTRANSHY, HYPE, MATHYSSE, METALICA, MODERNHY-T, ENDEMAT, CYRANO, OSIRHYS IV)
- ▀ Une bonne participation auprès des instances européennes (9 projets dans le FP6 et 1 FP7) : STORHY, NESSHY, CMA, HYCONES, SURMOF, MOFCAT, HYTRAIN, COSY, HYDROGEN, NANOHY) et internationales (IEA-HIA, IPHE), mais à renforcer
- ▀ Un transfert technologique entre recherche fondamentale et appliquée à améliorer
- ▀ Un espace pour la recherche purement fondamentale à ménager pour les sujets innovants et à risques.

4. Partenariats à privilégier et à renforcer

- ▶ Renforcer les structures transversales de type GdR ou PIE
- ▶ Mieux collaborer avec les EPICs acteurs du domaine : CEA, ADEME, IFP. L'alliance ANCRE est une avancée sur ce point dans laquelle le CNRS doit garder son rôle d'opérateur de recherche
- ▶ Participer aux instances décisionnelles de l'ANR. La contribution du CNRS ne l'est qu'au travers des personnes membres des différents comités
- ▶ Renforcer la présence des unités de recherche dans les plateformes H2 nationale et européenne (HyPAC, JTI N-ERGHY)
- ▶ Etre représenté dans les instances internationales de type IEA-HIA.

5- Quelques considérations pour terminer...

Si plusieurs pays font des efforts considérables dans le domaine de l'hydrogène et des piles à combustible, c'est parce qu'ils envisagent des applications industrielles de grande envergure à court et moyen terme. Dans ce domaine, la France ne semble pas aujourd'hui en mesure de développer des applications industrielles compétitives. La question sur la nécessité de définir au niveau national des priorités de recherche est donc posée.

De ce qui ressort de ce document, on peut affirmer sans ambiguïté qu'une grande partie des progrès et des percées technologiques attendues relèvent de compétences en chimie et plus généralement en matériaux. Il apparaît donc souhaitable d'inventorier nos forces nationales dans ces domaines et les compétences auxquelles nous pourrions avoir accès hors de France.

Enfin, notre retard en matière d'applications tient en partie à la faible implication de nos industriels. Ceci pourrait être du à l'absence d'une politique nationale claire dans le domaine de l'hydrogène et à une méconnaissance de nos très bons résultats de recherche. D'autres pays savent faire et le faire savoir (*ndlr*).