



## L'émergence d'une industrie française de la pile à combustible

L'un des objectifs affichés il y a cinq ans par les pouvoirs publics – fonder une industrie de la PAC sur un partenariat avec la recherche publique et en particulier avec le CEA – semble en passe d'être atteint.



Axane a notamment développé un générateur électrique autonome et mobile de 0,5 à 5 kW (Rollerpac) pouvant être utilisé comme groupe électrogène, par exemple, pour des secours sur le terrain.

utilisateurs. Ceci suppose que soient sans tarder mises en place de véritables "filères françaises d'application" correspondant aux attentes perceptibles du marché de série.

### Axane : le stationnaire et le transport urbain

Axane, implantée à Sassenage (Isère), a été créée en 2001 par Air Liquide, dont elle est une filiale à 100% depuis qu'a pris fin l'accord passé avec Nuvera<sup>(1)</sup>. Employant une trentaine de personnes, la société a commencé à fabriquer et livrer des cœurs de pile ou *stacks* : d'abord, une toute première de 400 W pour le *Polar Observer* de Jean-Louis Étienne, puis un générateur électrique autonome et mobile de 0,5 à 5 kW (*Rollerpac*) pouvant être utilisé comme groupe électrogène (2 kW) ou installé sur une voiturette électrique. Ce système, présenté à la foire de Hanovre 2003, a obtenu le grand prix Siemens de l'innovation en 2004. La stratégie d'Axane, adossée à celle de sa maison mère, consiste à développer des petits générateurs pour des applications "secours" pour lesquelles le prix de l'énergie n'est pas déterminant, en vue d'atteindre un prix du kW acceptable (1 500 €) dès 2006.

L'objectif pour 2015 est un coût de 50 à 300 €/kW afin d'apporter des solutions "hydrogène énergie" complètes à essentiellement deux marchés, le **stationnaire** et le transport urbain public. Sur le premier, des marchés de niche ont été visés dès 2003-2004 avec des générateurs de petite puissance de 500 W jusqu'à 5 à 10 kW ("génération 1") pour l'alimentation domestique, les bornes GSM et autres sites isolés, ainsi que le marché de l'alimentation sans interruption (ASI) et de la sécurisation du réseau électrique. Des unités de 100 kW sont prévues à partir de 2010. Pour le transport urbain public (bus et tram), des piles de 20 kW et plus sont développées, d'abord pour des démonstrations, le vrai marché ne décollant qu'à partir de 2015-2020. Un premier système de 20 kW devait être livré en 2004 dans le cadre du projet européen Febuss, et un système complet de 120 kW (6 x 20 kW) fin 2005. Bien que travaillant sur la technologie **PEMFC**, la société assure une veille sur la technologie **SOFC**.

### Héliion : les marchés de niche exigeants

Héliion a été créée en 2001 à Aix-en-Provence (Bouches-du-Rhône). Cette filiale de Technicatome (groupe Areva) compte une trentaine d'ingénieurs et s'intègre dans la stratégie d'Areva en matière de technologies pour l'énergie (nucléaire et énergies alternatives dont la pile à combustible). L'entreprise, qui se définit comme un "fabricant de systèmes pile à combustible de type PEM", a été créée à l'origine pour la propulsion de sous-marins sur la base de technologies **anaérobies**

La multiplication des annonces d'opérations de démonstration, voire de mise sur le marché de pré-séries (automobiles ou stationnaires) japonaises, nord-américaines ou, plus proches de nous, allemandes, amène à s'interroger sur les chances de voir l'industrie française participer à ce défi de la **pile à combustible** (PAC), si prometteur en termes de bénéfices environnementaux et économiques.

« Permettre l'émergence d'une filière française de la pile à combustible » était l'un des objectifs assignés au **réseau PACo** (encadré 1) lors de son installation par le ministre de la Recherche en juin 1999. Force est de constater, cinq ans après, qu'il a bien suscité le développement de partenariats forts entre recherches publique et privée et favorisé la création d'entreprises dédiées à la PAC, qu'elles soient issues de grands groupes comme Axane (Air Liquide) ou Héliion (Areva), ou le fruit d'essai-mage de la recherche comme N-GHY, CETH ou plus récemment PaxiTech (encadré 2).

Les deux premières démarrent la fabrication de prototypes de petites puissances (jusqu'à 5 kW). PaxiTech a déjà fabriqué des prototypes, tandis que les deux dernières sociétés, prometteuses de futures ruptures technologiques, doivent encore réaliser un prototype industriel, voire un démonstrateur technologique pour valider leur acquis immatériel. Ces cinq sociétés, premiers jalons d'une industrie française de la pile à combustible, ont besoin pour se développer, à l'instar de leurs grandes sœurs étrangères, d'être aidées par un marché de démonstration notamment porté par les

(1) Elle était à l'origine une joint-venture Nuvera-Air Liquide.



Pile pour groupe de secours industriel de 5 kW électriques mise au point par Héliion dans le cadre du projet européen Helps.

hydrogène/oxygène. Elle vise également, aujourd'hui, les marchés de l'énergie stationnaire (alimentation de secours, alimentation sans interruption, électrification de sites isolés, **cogénération**) et, de façon spécifique, les activités de niche à fortes exigences de sûreté et de disponibilité sur les marchés de la défense, du transport urbain et du pétrole.

Héliion a réalisé, en février 2002, un premier prototype fonctionnel de système pile à combustible de 2 kWe, puis une deuxième pile, d'une puissance de 5 kWe et un banc d'essai de 10 kWe, en décembre 2002, pour équiper le **CNRT de Belfort** (Université technologique de Belfort-Montbéliard, voir encadré 3). Un groupe de secours de 5 kWe (réalisé dans le cadre du projet européen Helps) a été présenté en février 2003. Actuellement testé en configuration complète *électrolyseur, stockage hydrures, pile et convertisseurs*, il sera prochainement livré à Dalkia.

Après avoir développé une nouvelle génération courant 2003-2004, Héliion a présenté au deuxième semestre 2004 une pile de 20 kWe qui constituera le module élémentaire permettant l'accès aux marchés nécessitant des puissances de plusieurs dizaines, voire

plusieurs centaines de kilowatts. Les collaborations en R&D et sur projets déjà initiées entre Héliion et le CEA devraient s'intensifier.

### CETH : les technologies de l'hydrogène

CETH a été créée en octobre 2000 pour valoriser au plan industriel, dans le domaine des technologies de l'hydrogène, les recherches et compétences acquises par Claude Étievant dans le cadre de sa carrière au CEA et de divers contrats passés avec des instituts de recherche pour la purification de l'hydrogène et le **reformage** de différents combustibles.

Le capital initial a été apporté par le fondateur et certains de ses proches, puis abondé plusieurs fois, toujours par des personnes physiques<sup>(2)</sup>. Par un accord de partenariat de recherche, CETH qui compte aujourd'hui sept personnes, bénéficie de l'environnement de l'École Polytechnique : tant matériel (hébergement dans la pépinière de l'école) que scientifique (partenariats avec plusieurs laboratoires).

L'objectif de CETH est de développer et de réaliser plusieurs types d'applications des technologies de l'hydrogène. La société développe des procédés innovants pour la production d'hydrogène en vue d'alimenter les PAC. La réalisation d'un système de reformage avec extraction continue de l'hydrogène par **perméation** gazeuse à travers une membrane métallique dense est la clef pour la production d'un hydrogène ultrapur pour PEMFC. L'extraction et la purification de l'hydrogène

(2) Une augmentation de capital en 2004 ouvrira la porte aux fonds communs de placement dans l'innovation (FCPI) et aux sociétés de capital-risque (SCR).

## Le réseau PACo, initiative réussie pour la structuration de la R&D sur les piles à combustible en France

1

Les réseaux de recherche et d'innovation technologique (RRIT) constituent un outil important pour la mise en œuvre de la politique de R&D industrielle stratégique. Ils sont un soutien à la politique d'innovation que conduit le ministère chargé de la Recherche avec l'appui du ministère chargé de l'Industrie dans des domaines jugés prioritaires.

Malgré des avancées significatives sur les **piles à combustible** (PAC) ces dernières années, les coûts de production restent élevés et le seuil de compétitivité par rapport aux solutions concurrentes ne pourra être atteint qu'à la faveur de nouveaux sauts technologiques. Le développement des PAC est donc conditionné par l'ampleur et l'efficacité des soutiens publics et privés qui lui sont apportés. Le réseau "Piles à combustible" (appelé aussi réseau **PACo**) a été créé en juin 1999 pour favoriser le couplage sur ces technologies entre la recherche publique et les entreprises afin d'assurer la réussite de leur industrialisation. Il fédère et structure une communauté d'acteurs de la R&D, provenant de la recherche publique, des entreprises et de l'Administration ([www.reseaupaco.org](http://www.reseaupaco.org)). Il a pour principal objectif de faire émerger des projets coopératifs, dont les meilleurs sont labellisés.

Cette structure se compose d'un comité d'orientation d'une vingtaine de personnes, réunissant industriels et chercheurs, qui définit les orientations stratégiques du réseau, d'un bureau où se retrouvent les organismes assurant le financement (ministères chargés de la Recherche, de l'Industrie et des Transports, **Ademe, Anvar**) et d'une cellule de coordination, co-animée par le CEA et l'Ademe.

Le réseau PACo aborde la filière dans sa globalité, en partant du carburant nécessaire à l'alimentation de la PAC, pour aller jusqu'à

l'utilisation de l'énergie fournie par la pile. Depuis sa création, le réseau a labellisé plus d'une cinquantaine de projets portant la moitié sur les piles (composants et systèmes) et pour un tiers sur les combustibles. Les autres projets concernent les actions transverses comme la sûreté, les études technico-économiques et la veille technologique. Le financement public pour le réseau est d'environ 10 M€ par an, le taux des aides étant proche de 45%. Le réseau a joué un rôle clé dans la création en France d'une dynamique sur la pile à combustible et l'émergence d'une communauté active dans ce domaine en suscitant des synergies entre laboratoires publics et privés et entre industriels, dont des PME. Il a permis de rassembler une communauté d'une centaine de laboratoires issus d'une soixantaine d'entités et aussi d'améliorer le niveau de connaissances scientifiques et de savoir-faire français sur l'ensemble des technologies liées à la PAC. La création récente de deux entreprises, Axane et Héliion, se positionnant sur la production industrielle de piles à combustible, la montée en puissance de quelques PME (CETH, N-GHY, PaxiTech...) ainsi que la mise en place d'une plate-forme nationale de tests de pile à combustible à Belfort (encadré 3) sont des retombées encourageantes de cette action de stimulation publique. Le réseau PACo a bien joué un rôle d'effet de levier R&D mais, compte tenu de la route qui reste à parcourir pour atteindre les objectifs ambitieux qui sont en jeu, les efforts de recherche technologique doivent être poursuivis.

> **Françoise Barbier**

Cellule d'animation du réseau PACo  
Direction de la recherche technologique  
CEA centre de Fontenay-aux-Roses



## PaxiTech, première essaimée du CEA dans les NTE

2

Première *start-up* du domaine des nouvelles technologies de l'énergie (NTE) à bénéficier de la politique d'essaimage du CEA, PaxiTech est apparue en septembre 2003. Après une année d'incubation au CEA/Grenoble, cette société implantée à Claix (Isère) s'est fixé pour objectif de produire et de commercialiser des composants de  **piles à combustible** , ainsi que des piles complètes. Dans un premier temps, le marché visé est celui des cœurs de pile (ensembles membrane/**électrodes**), porté plus particulièrement par les fabricants de générateurs d'électricité à pile à combustible tels que Axane (Air Liquide) ou Héliion (Areva). Il recouvre tous les intégrateurs potentiels de cette technologie quelle que soit l'application visée, du transport particulier au générateur **stationnaire** (individuel ou centralisé), en passant par les applications spatiales ou marines. Cette activité appelée à se développer rapidement devrait être par la suite couplée à la production de sources d'énergie à pile à combustible utilisant une architecture planaire originale élaborée au CEA/Grenoble. Ces sources viseront principalement les applications portables et portatives nécessitant des puissances électriques comprises entre 1 et 150 watts.

Afin de s'affranchir de la présence de plaques bipolaires complexes et coûteuses, PaxiTech développe un nouveau concept

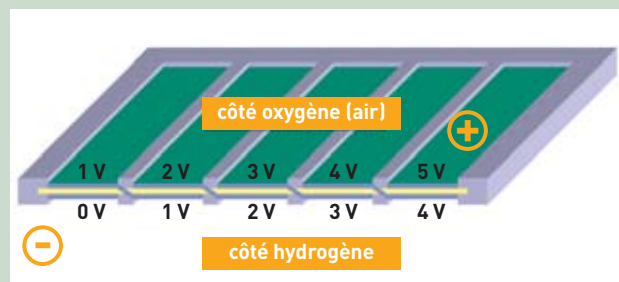


Figure.  
Le concept Pacrete.

d'architecture dans lequel l'empilement disparaît, la tension d'un élément unique étant augmentée par une mise en série planaire de plusieurs unités (figure). Les éléments ne sont plus ici empilés, mais disposés côte à côte sur un même plan, et reliés par une jonction électronique à travers l'**électrolyte** : l'électrode à air (**cathode**) d'un élément est reliée à l'électrode à hydrogène (**anode**) de l'élément suivant. Il est ainsi possible de produire un mono-élément planaire de la tension désirée. Afin de réaliser ces nouvelles piles, des procédés innovants (protégés par le CEA/Grenoble) ont été développés.

Si cette configuration permet aisément d'élever le niveau de tension, elle interdit en revanche de délivrer de forts courants du fait des pertes de tension importantes dans les jonctions électroniques, limitant son utilisation à des puissances relativement faibles (150 **watts**). Ce concept Pacrete (pile à combustible à rendement et tension élevés) fonctionne de façon passive à température ambiante avec des gaz à pression atmosphérique, limitant ainsi les consommations parasites des auxiliaires tels qu'un compresseur ou des pompes associés à la pile.

Les applications visées sont celles de l'alimentation des appareils électriques et électroniques portables (multimédia portatif, ordinateurs, TV, caméras et appareils photo, lecteurs K7, lecteurs CD et DVD portables, *talkie-walkie*, etc.), l'outillage sans fil (perceuses, visseuses, éclairage), l'électroménager sans fil (mixers, batteurs, presse-agrumes, etc.), les alimentations de secours (réserves électriques) et sécurisées (alarmes), ainsi que diverses applications militaires.

Des prototypes ont déjà été testés dans des conditions réelles d'utilisation pour alimenter un lecteur CD pendant plusieurs milliers d'heures sans dégradation notable des performances (y compris durant la canicule de l'été 2003). Le seul point réellement bloquant est à présent la disponibilité du combustible.

➤ **Renaut Mosdale**

Direction de la recherche technologique  
CEA Grenoble

par un procédé membranaire constitue l'une des percées technologiques des plus prometteuses.

Le développement par CETH de sa propre technologie permet de lui garantir la production et l'approvisionnement des membranes nécessaires à cette filière. Le développement de la membrane séparatrice a déjà été réalisé dans le cadre d'un projet du réseau PACo. Également labellisé par le réseau et jugé tout à fait pertinent d'un point de vue technologique, un autre projet porte sur le développement d'un reformeur **éthanol** avec une membrane interne et son couplage avec une PAC pour réaliser à échéance de deux ans un groupe de cogénération électrique de petite puissance (1,5 KWe). Le reformage de gazole et d'essence constitue un autre axe de la stratégie industrielle de CETH. Les travaux

menés sur le gazole portent sur l'approche **auto-thermique catalytique** basse température. La technologie proposée correspond à une voie particulièrement attrayante par ses perspectives industrielles. CETH a déposé quatre brevets<sup>(3)</sup> (procédé d'assemblage d'une membrane d'extraction sur un support, processus d'oxydation partielle à deux étages, membranes métalliques composites et système de **pyrolyse** intégrée) et d'autres sont en cours de dépôt.

### N-GHY, le reformage "tous combustibles"

N-GHY a été créée en janvier 2002 pour valoriser au plan industriel, dans le domaine des processeurs et piles à combustibles, les recherches et compétences acquises par l'École des Mines d'Albi-Carmaux (EMAC) en matière de reformage de combustibles dans le cadre d'un contrat passé entre Renault (Direction de la recherche) et Armines, avec pour résultat une maquette d'une puissance thermique de 7 à 20 kW sous 1 à 3 **bars** pour la conversion de différents combustibles en mélanges H<sub>2</sub>/CO/CO<sub>2</sub>.

N-GHY propose une technologie de conversion à haute température non catalytique et présentant une forte adaptabilité aux combustibles lourds et légers, liquides et gazeux et permettant la valorisation des



Banc d'essai développé par N-GHY dans le cadre du programme Pacutit.

(3) Brevets en phase d'extension PCT (*Patent Cooperation Treaty*) sans antériorités.



**biocombustibles** (huiles végétales, **bioéthanol** et **bio-gaz**), et aussi la possibilité d'un fonctionnement en oxygène sous pression avec captation de CO<sub>2</sub>. Enfin, N-GHY développe une approche système, gérant au mieux les interactions entre le processeur de combustible et la pile à combustible et le contrôle/commande de l'ensemble. Le capital initial a été apporté par les trois fondateurs de la société, dont Didier Grouset, professeur à l'École des Mines d'Albi-Carmaux, et certains proches<sup>(4)</sup>.

Par un accord de partenariat de recherche, N-GHY, qui compte aujourd'hui dix personnes, bénéficie de l'environnement de l'EMAC : tant matériel (les tests de la maquette du reformeur développée par N-GHY sont effectués dans la halle d'essais énergétique-environnement) qu'humain (interventions de professeurs et enseignants-chercheurs, élèves-chercheurs, ingénieurs-stagiaires...).

L'objectif de N-GHY ? Réaliser plusieurs générations successives de prototypes de reformeurs de puissance, d'une compacité et d'un rendement croissants pour applications stationnaires ou mobiles et proposer d'ici trois ans des réalisations unitaires de puissances de 2 à 100 kW. Pour la production et la commercialisation de ses reformeurs de combustibles, N-GHY envisage de créer des filiales avec ses partenaires de développement.

Ces sociétés constituées d'équipes de très haut niveau, motivées et dynamiques représentent l'espoir de voir se développer, à temps pour être présente sur ce futur marché, une filière française de la pile à combustible.

➤ **Marie-Christine Le Picard**  
Ministère délégué à l'Industrie  
Paris

(4) Initialement de 41 000 € puis abondé à hauteur de 131 390 € (avec notamment une prise de participation de huit employés de la société pour 23,7% du capital), il sera augmenté par appel aux sociétés de capital-risque à fonds publics départementales et régionales.

## Belfort, une plate-forme d'essais unique en Europe

Unique en France et en Europe, la plate-forme nationale pile à combustible de Belfort est un outil dédié aux essais de **piles à combustible** et de leurs interfaces pour les transports terrestres dans des conditions représentatives de la réalité. Propriété de l'Université de technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM), elle constitue une plate-forme d'accueil pour des laboratoires et des industriels. Adossée au CNRT Belfort-



La table vibrante et le caisson climatique de la plate-forme nationale pile à combustible.

Montbéliard-Nancy, réseau de compétences allant des différents éléments du cœur de pile au système (de traction par exemple) utilisant la pile, elle reçoit l'appui technique et scientifique d'une équipe du L2ES (Laboratoire de recherche en électronique, électrotechnique et systèmes), de l'Inrets (Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité) et du CEA<sup>(1)</sup>. Plusieurs projets labellisés par le réseau PACo et par l'Europe sont d'ores et déjà utilisateurs de la plate-forme, optimisée dès le départ pour cette fonction, en concertation avec les industriels qui peuvent y définir librement des profils de mission avec une charge active réelle ou simulée.

Le bâtiment de 1880 m<sup>2</sup> (dont 1200 m<sup>2</sup> pour les installations techniques purement PAC) est conçu pour accueillir des équipes de recherches dans 2 étages de bureaux et 6 locaux à vocation scientifique. Trois vastes cellules de tests pour des piles de 5 à 10 kW, de 70 à 80 kW et jusqu'à 200 kW (suffisant pour bus hybride ou tramway), disposent d'une distribution centralisée des fluides, de dispositifs d'interfaçage, de transmission et de commande, d'une chambre climatique (de -30 à +130 °C) et d'une table vibrante (1220 x 1200 mm<sup>2</sup>) permettant de recréer l'environnement vibratoire, hygrométrique et de température voulu. Une salle de contrôle et une salle dimensionnée pour une grande variété de charges actives (supercondensateurs, batteries, tous types de moteurs et leurs convertisseurs d'alimentation, trains roulants) complètent un ensemble où toutes les sécurités sont prévues, en particulier pour la confidentialité des essais et l'utilisation de l'hydrogène.

■ (1) Contact: Florent Petit, Ineva-CNRT ([www.ineva-cnrt.com](http://www.ineva-cnrt.com)); contact technique: L2ES.

## Avec Paclab, la région grenobloise peut viser un rôle de *leader* dans les PAC

Le développement des nouvelles technologies de l'énergie suscite en France celui de pôles régionaux aux ambitions européennes, avec des acteurs de premier rang, en particulier à Grenoble autour de la pile à combustible.

La transition vers une économie durable de l'**hydrogène** prendra le temps d'une génération. Tous les acteurs de la chaîne de l'innovation, depuis la formation jusqu'à la démonstration technologique, devront être mobilisés et mis en synergie. Une mobilisation qui a besoin, pour se concrétiser, d'un travail soutenu à l'échelle régionale, comme l'illustre l'exemple grenoblois, entre autres initiatives régionales (encadré).

Grenoble a marqué l'histoire de l'énergie en France. La capitale de la "houille blanche" hydroélectrique est désormais surtout connue comme celle des micro-nanotechnologies, avec un couplage éducation, recherche, industrie particulièrement réussi autour du CEA-LETI (Laboratoire d'électronique et des technologies de l'information). Mais les acteurs de l'énergie restent très présents : les conditions sont donc réunies pour l'épanouissement d'une initiative dans

le domaine de l'hydrogène qui fasse de Grenoble la capitale européenne de l'énergie.

Sur le plan de la formation, d'abord : l'INPG (Institut national polytechnique de Grenoble) est la principale école d'ingénieurs en France, formant chaque année 1 200 élèves et surtout 180 docteurs-ingénieurs. Ses écoles spécialisées offrent un *panel* de formations sans équivalent dans le domaine de l'énergie, complétées par les cursus de l'UJF (Université scientifique Joseph Fourier), de l'UPMF (Université des sciences économiques Pierre Mendès-France). Les programmes dédiés de l'INSTN sur les nouvelles énergies (voir *Les NTE, domaine de formation stratégique pour l'INSTN*) complètent cette offre exceptionnelle.

En matière de recherche et développement technologique, le CEA/Grenoble, par les activités du LITEN (Laboratoire d'innovations pour les technologies des



Application dans un ordinateur portable du concept Pacrete de piles à combustible souples mis au point par la société PaxiTech, dont chaque élément délivre une tension de 12 V ou 6 V. Le réservoir d'hydrogène offre à l'utilisateur une autonomie de 10 heures.



D. Michan-Artechnique/CEA

énergies nouvelles et les nanomatériaux) et des laboratoires associés, est le principal regroupement de compétences en France dans le domaine des nouvelles énergies. À Grenoble, la stratégie à long terme se focalise sur le développement des **piles à combustibles** (PAC) pour les transports. Cet objectif ambitieux passera d'abord par la mise au point de systèmes dédiés à des marchés de niche et nécessitera la capitalisation des connaissances de recherche fondamentale conduite à l'échelle européenne. En addition aux compétences du CEA, les laboratoires de recherche de l'INPG ou de l'UJF, associés au **CNRS**, sont reconnus au plan national et européen. Les acteurs industriels, particulièrement dans le secteur de l'énergie, sont nombreux dans la région. Exploitants comme EDF, GDF, GEG, Isergie, SMTIC, Semitag ou fournisseurs de technologie comme Air Liquide, sa filiale Axane ou Schneider, ce sont des partenaires de longue date des acteurs de l'enseignement supérieur et de la recherche. De nouvelles *start-up* comme PaxiTech (**encadré 2**, p. 108) viennent compléter ce tissu industriel particulièrement dense. Enfin, les collectivités locales ont montré avec Minatec, dans les nanotechnologies, leur capacité à mener de grands projets communs et à fédérer les acteurs autour d'une volonté de développement technologique et industriel géographiquement centré. La création d'un partenariat régional dans l'hydrogène et les PAC, sur le modèle du *California Fuel-Cell Partnership*, est dès lors envisagée. Le CEA porte à Grenoble le projet Paclab, centre d'excellence européen sur les piles à combustibles pour le transport propre. Ce projet a pour ambition de fédérer les forces de recherche, de développement technologique et de formation au service du déploiement industriel des piles. Contrairement à Minatec, le projet Paclab n'est pas indissociable d'une volonté de regroupement géographique des activités de recherche, formation et développement industriel.

Des investissements ciblés seront nécessaires et proposés aux partenaires des collectivités locales.

## Quatre programmes cohérents

Le cœur du projet consiste en un ensemble de quatre programmes (formation, recherche de base, développement technologique et communication) cohérents et évolutifs dans le temps, en fonction de la vitesse de maturation des technologies de la filière hydrogène. Le programme de *formation initiale et continue* s'appuie sur les compétences de l'INPG et de l'INSTN, en couplage étroit avec l'**UTBM** de Belfort et les lycées techniques grenoblois. Il a pour objectif de former la nouvelle génération de techniciens, chercheurs et ingénieurs qui assurera le déploiement de la filière. Le programme de *recherche de base* repose sur les compétences du CEA et des autres laboratoires grenoblois en tirant parti des réseaux nationaux de recherche sur les PAC ainsi que d'un rôle leader dans le réseau d'excellence européen SPFCNET (*Solid Polymer Fuel Cells network*).

Le programme de *développement technologique* implique la réalisation à Grenoble de démonstrateurs pilotes, sur les programmes coopératifs de R&D finalisée conduits au CEA avec ses partenaires industriels, ainsi que sur la plate-forme de Belfort, destinée à la validation technologique de PAC en conditions réelles de fonctionnement. Le programme de *communication et sensibilisation*, enfin, s'appuiera sur les opérations de démonstration menées sur le site du CEA/Grenoble, dans la ville, l'agglomération et le département, et visera le grand public sans l'adhésion duquel la filière hydrogène ne pourra s'imposer. Au-delà de son rôle régional structurant, Paclab bénéficie de son ancrage au CEA, qui dispose d'un large réseau de compétences mobilisées autour de la problématique des piles à combustible pour les transports, de son positionnement au cœur des programmes nationaux sur l'hydrogène et les PAC, de sa visibilité européenne et internationale. Avec Paclab d'une part, les opérations de démonstration et "projets phare" de l'autre, toutes les conditions sont réunies pour que la région grenobloise joue un rôle important pour l'hydrogène et les piles à combustible en Europe. Une opportunité que les acteurs locaux devront saisir en s'organisant en partenariat.

➤ **Nicolas Bardi**

Direction de la recherche technologique  
CEA centre de Fontenay-aux-Roses

## La Lorraine mise sur les NTE pour réussir sa mutation industrielle

Confrontée à la récession et à l'arrêt programmé de ses activités extractives, la Lorraine se devait d'apporter une réponse réaliste à la question de sa reconversion. Grâce à ses atouts (infrastructures, matière grise et capacité d'innovation) et aux aides financières déterminantes dont elle a pu bénéficier, la Lorraine et, singulièrement l'Est Mosellan, est devenue, en l'espace de quelques années, l'une des régions les plus attractives d'Europe de l'Ouest pour les investissements français et étrangers, en particulier dans le domaine des nouvelles technologies.

Dans l'espace transfrontalier franco-allemand, à Forbach, un nouveau site d'activité de 90 ha destiné aux nouvelles technologies de l'énergie a ainsi été créé à la faveur d'incitations financières maximales, nationales et européennes. Cette Eurozone

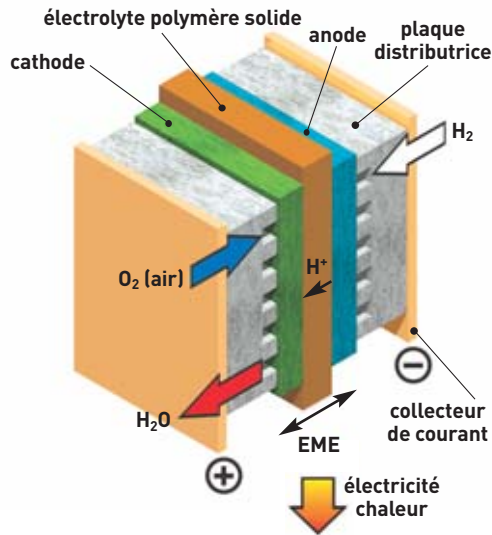
de Forbach-Sarrebruck a accueilli une première entreprise, la société allemande PEM (Precise Electrochemical Machining). Spécialisée dans le traitement de surfaces métalliques de haute précision, elle propose notamment aux constructeurs de piles à combustible des plaques bipolaires métalliques de haute qualité et à moindre coût. Par ailleurs, les contacts avec des industriels de l'énergie (en particulier dans le domaine des piles à combustible et de l'hydrogène) des États-Unis, d'Allemagne, de Norvège et d'Australie pourraient se concrétiser prochainement.

➤ **René Sachs**

Alphéa  
Forbach (Moselle)

C

# Comment fonctionne une pile à combustible ?



Principe de fonctionnement de la pile à combustible. Exemple de la pile à membrane échangeuse de protons. EME représente l'ensemble électrodes-membrane.

La pile à combustible repose sur un principe fort ancien, puisque c'est en 1839 que Sir William Grove construisit la première cellule électrochimique fonctionnant avec de l'**hydrogène** comme carburant, mettant ainsi en évidence la possibilité de produire du courant électrique par conversion directe de l'énergie chimique du **combustible**. La pile à combustible ayant la particularité d'utiliser deux gaz – l'hydrogène  $H_2$  et l'oxygène  $O_2$  – comme couple électrochimique, les réactions d'**oxydo-réduction** qui s'opèrent dans la pile sont donc particulièrement simples. La réaction se produit au sein d'une structure (la **cellule électrochimique élémentaire**) essentiellement composée de deux **électrodes** (l'**anode** et la **cathode**) séparées par un **électrolyte**, matériau permettant le passage des **ions**. Les électrodes mettent en jeu des **catalyseurs** pour activer d'un côté, la

réaction d'**oxydation** de l'hydrogène, et de l'autre côté, la réaction de **réduction** de l'oxygène.

Dans le cas d'une pile à électrolyte acide (ou pile à membrane échangeuse de **protons**), l'hydrogène de l'anode est dissocié en protons (ou ions hydrogène  $H^+$ ) et en **électrons**, suivant la réaction d'oxydation :  $H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$ . À la cathode, l'oxygène, les électrons et les protons se recombinent pour former de l'eau :  $2 H^+ + 1/2 O_2 + 2 e^- \rightarrow H_2O$ . Le principe de la pile à combustible est donc inverse à celui de l'**électrolyse** de l'eau. La tension thermodynamique d'une telle cellule électrochimique est de 1,23 volt (V). Toutefois, en pratique, la pile présente une différence de potentiel de l'ordre de 0,6 V pour des **densités de courant** de 0,6 à 0,8 A/cm<sup>2</sup>. Le rendement d'une telle cellule est donc d'environ 50%, l'énergie dissipée l'étant bien évidemment sous forme de chaleur.