

Programmes PAN-H

Bilan et perspectives scientifiques
Gérald POURCELLY, président du comité de
pilotage H-PAC

Plan d'Action National sur l'Hydrogène et les Piles A
Combustible

*Avec la contribution de
François Beguin*

Rappel du contexte et des enjeux

- **L'hydrogène industriel**: 550 G.NM³/an, 49 M.T dont 7 M.T en Europe, 120 Md€/an, 95 % applications pétrochimie et ammoniac, nette croissance des besoins (pétrochimie)
- **L'hydrogène énergie**: marché émergent (estimation > 30 G.€ à moins de 10 ans, hors automobile)
- **Les électrolyseurs**: seul moyen de produire de l'hydrogène décarboné pour usage énergétique et industriel (si électricité décarbonée...)
- **Les piles à combustible**: convertisseur à haut rendement et non polluant (si hydrogène décarboné...)
- **Une compétition internationale** qui s'intensifie... et pour laquelle il ne faudrait pas reproduire les mêmes erreurs que pour l'énergie solaire au début des 80'...

Objectifs et positionnement des programmes PAN-H (2005-2008) et H-PAC (2009-2010)

- **PAN-H: suite logique du « Réseau PACo »**, programme lancé en 1999 par le MRT (52 projets, 40 M€ d'aides)
- **PAN-H: structuration de la communauté** académique et industrielle de H₂ et PAC autour d'un programme pluri-annuel
 - **Couvrant l'ensemble de la chaîne** production, stockage, distribution, piles à combustible, sécurité
 - **Avec la priorité donnée à la recherche et l'expérimentation** selon la chaîne composants/procédés/systèmes
 - **Afin de développer une filière industrielle** de l'hydrogène et des piles à combustible
 - **Pour le déploiement de marchés précurseurs** (applications stationnaires et de niche)
 - **Avec une finalité transport automobile** (marché de masse)
- **H-PAC: priorité sur les applications stationnaires**

Périmètre thématique de PAN-H

Axe 1 : Production décarbonée d'Hydrogène (production propre)

- **Objectifs** : augmentation des rendements et baisse des coûts (électrolyse HT et BT couplée aux EnR, génération pour systèmes embarqués, cycles thermochimiques, photo-électrolyse)

Axe 2 : Distribution et Stockage d'Hydrogène

- **Objectifs** : augmentation de la cyclabilité et fiabilité: chaîne logistique, couplage au réseau électrique, stockage THP; stockage dans les matériaux solides, stockage grande capacité (formations géologiques)

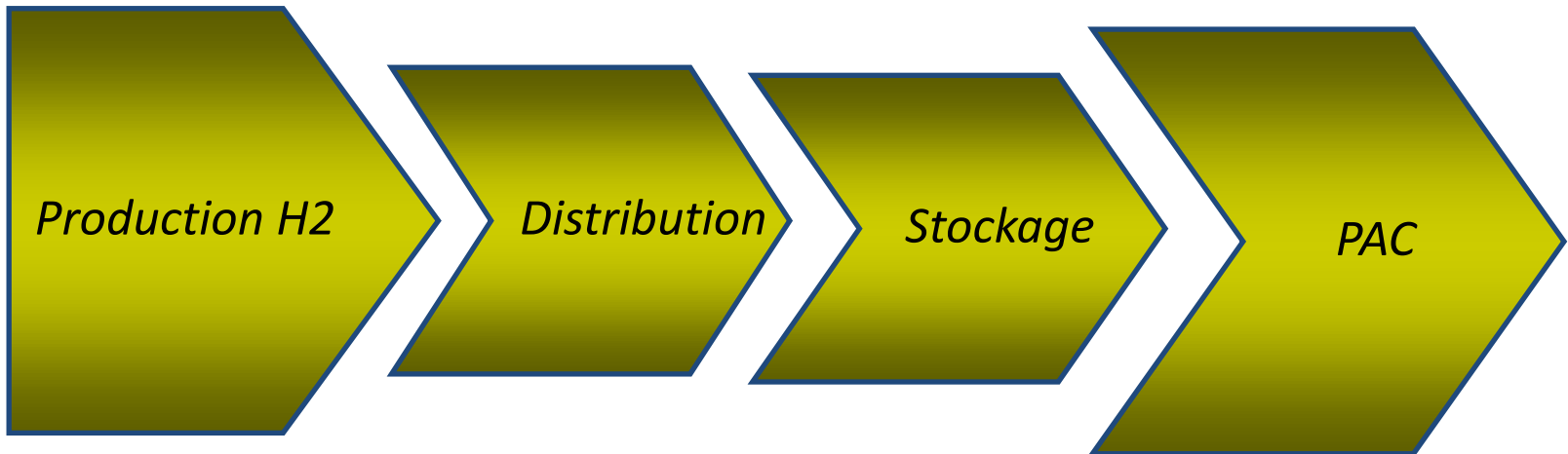
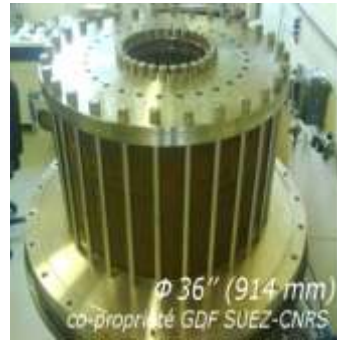
Axe 3 : Piles A Combustible et systèmes piles

- **Objectifs** : mise en œuvre de matériaux bas coût et fiabilité/durabilité: piles à membrane polymère (Basse T PEMFC), piles céramiques (SOFC et PCFC)

Axe 4 : Activités transverses

- **Objectifs** : Economie, acceptabilité sociétale, sécurité, réglementation
- **Remarque**: Axe intégré dans les 3 précédents dans le programme H-PAC

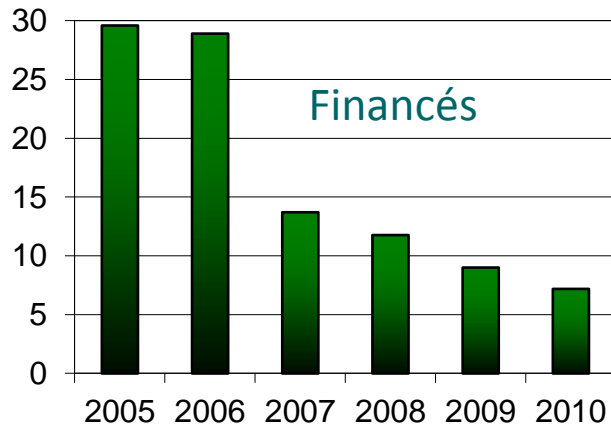
La filière Hydrogène et Piles A Combustible



Sécurité, acceptabilité sociale, économie

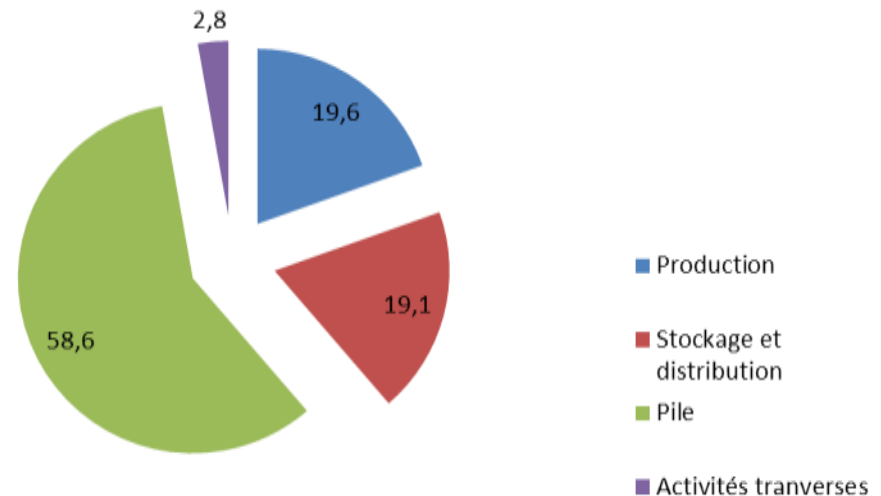
Un bilan chiffré : 89 projets financés en 6 ans

Soumis 75 72 32 56 48 42



Financement total de l'ANR : 100,2 M€
Coût complet des projets : 194 M€

Dans les 4 axes thématiques:



480 partenaires financés

- 60%: organismes publics recherche
- 30% entreprises autres que PME
- 10% PME, TPE, autres

Les apports et impacts du programme (1/7)

Axe 1: Production propre d'hydrogène

- **CELEVA 2006: Assemblage électrode-électrolyte à conduction protonique avec réalisation d'une cellule d'électrolyse de la vapeur.** (AREVA-NP, IEM, LADIR, LISE, ENSMSE, SCT)

Objectifs: Production massive d'hydrogène par électrolyse de vapeur d'eau entre 400 et 600°C et sous HP (10-50 bars) avec rendement faradique élevé et bonne tenue des matériaux.

Résultats: Obtention d'un électrolyte à conduction protonique (10^{-2} S/cm sous 10 bars à 600°C). Brasages céramique-métal (étanchéité), **H₂ produit avec 80 % de rendement à 600°C.**

- **PRODHYGE 2006: Production d'Hydrogène.** (CEA, AREVA, Arcelor-Mittal, SPCTS, LMP)

Objectifs: Faisabilité d'une **architecture co-axiale** pour l'électrolyse HT

Résultats: Cellule tubulaire de 600 cm². 20 NL/h d'hydrogène produit à 850°C. Redémarrage après un cycle thermique complet. **Faisabilité acquise**

- **SEMIHT 2006: Stacks Expérimentaux et Modules Innovants pour EHT**
(CEA, ICMCB, EDF (Eifer), Garlock France, Saint Gobain)

Objectifs: Bases d'une filière française sur l'Electrolyse de la vapeur d'eau à haute température, réaliser un démonstrateur de module d'électrolyse de puissance significative (1 kW),

Résultats: **Empilement de 4 cellules de diam. 120 mm en électrolyse de vapeur d'eau (800 °C) production de 2 g/h d'hydrogène.**

Les apports et impacts du programme (2/7)

Axe 1: Production propre d'hydrogène

- **EVERESTE 2007: *Electrolyse de la vapeur sur cellules symétriques*** (CEA-Liten, IMN, ENSCL, CERAMPILOT, LECA, LEPMI)

Objectifs: Diminution des coûts de fabrication et augmentation de la robustesse des systèmes par intégration du même matériau pour les deux électrodes (fonctionnement dual).

Résultats: Etude technico-économique: gain significatif sur la fabrication d'un électrolyseur. **Concept de cellule symétrique validé.** Reste à améliorer d'un facteur 2 les performances pour atteindre celles des cellules asymétriques et durabilité à démontrer.

- **H2PAC 2005: *Générateur d'hydrogène, à hautes performances à base d'hydrures chimiques*** (CEA, Bic, Récupyl, IRCELyon, LMI, SNPE): **18 brevets**

Objectifs: Générateur d'H₂ non rechargeable basé sur l'hydrolyse du borohydrure de sodium pour alimentation dispositifs électroniques nomades.

Résultats: Conditions d'hydrolyse avec un rendement en H₂ de 9% en masse.
Cartouche produisant de l' H₂ à la demande pour PAC sans dispositifs annexes

Les apports et impacts du programme (3/7)

Axe 2: Distribution et stockage d'hydrogène

- **HYBOU 2005: Matériaux innovants pour liners polymères et coques composites de réservoir de type IV** (CEA, Air Liquide, Paris-Tech AM, ENSMA, RAIGI)

Objectifs: Matériaux et procédés nouveaux pour augmentation des performances et diminution des coûts

Résultats: Faisabilité du rotomoulage de matériaux thermo-durs. Réalisation de liners pour réservoirs H₂. **Structures optimisées de réservoirs 700 bars.** Essais de rupture > 1700 bars.

- **POLHYTUBE 2006: Matériaux innovants pour les réseaux de distribution d'hydrogène** (IFP, CEA, Air Liquide, Arkema, ENSMA, IMP/GEMPPM)

Objectifs: Matériaux performants en termes de perméabilité et tenue mécanique à long terme en présence d'H₂. Identification des problèmes liés à la forte concentration d'H₂.

Résultats: Perméabilité résiduelle constante après 12 mois. **Matériaux « barrière à H₂ » clairement identifiés**

Les apports et impacts du programme (4/7)

Axe 3: Cœurs de Piles PEMFC

- **MENHYR 2006: Membranes hybrides robustes pour PAC de type PEM fonctionnant entre 100 et 150°C sous faible taux d'hydratation** (CEA, ICGM, PCI, LCMC, EDF, IRMA)

Objectifs: Matériau hybride matrice organique : Phase inorganique conductrice protonique. (séparation des fonctions de structure et de conduction)

Résultats: Mise au point d'un matériau PVDF / Silice greffée, à bas coût.

- **EOLHY 2006: Alimentation électrique autonome à partir de sources renouvelables** (Air Liquide, Axane, CETH, Laboratoire IXL, Supélec, ICMO)

Objectifs: Démontrer l'intégration de différents composants d'une chaîne énergétique (EnR, électrolyseur, PAC, stockage d'H₂) en optimisant l'interfaçage et le dimensionnement des composants

Résultats: Réalisation d'un système de production ininterrompue d'énergie électrique de 1,5 kWe à l'échelle 1 à partir des EnR (éolien + solaire) avec H₂ comme tampon. **Plate forme d'essai grandeur réelle (Sassenage)**

Les apports et impacts du programme (5/7)

Axe 3: Cœurs de Piles PEMFC

- **PAC-SM 2005 et 2007: Piles A Combustible pour applications sous marines** (HELION, IFREMER, SNPE, Armines, Cybernétix, ECA)

Objectifs: Faire fonctionner un module PAC H₂/O₂ de 2 kW en conditions anaérobies (applications sous marines).

Résultats: Rendement électrique global de 60 %, puissance maximale 0,25 W/cm², **fonctionnement de 5000 h à 0,72 V et 1 A/cm²** .

- **FISYPAC 1&2 2005 et 2006: Fiabilisation systèmes PAC** (PSA, CEA, UTBM, BERTIN, SHERPA, SOPRANO, EMC, Plus-3D, Arcelor-Mittal, SAFT)

Objectifs: Réaliser et fiabiliser un générateur électrique à PAC de puissance 17 kW et l'intégrer dans un véhicule « range extender » Batterie + PAC

Résultats: **Architecture système, organes de puissance et cartes de diagnostic. Conception système PAC. Intégration véhicule et validation. Démonstration de la technologie pour l'application automobile. Stockage H₂: 150 kg (4,2 kg H₂, 700 bars), autonomie 400 kms (75 km sur batterie), 155 km/h**

Les apports et impacts du programme (6/7)

Axe 3: Piles PCFC et SOFC

- **TECTONIC 2006 et CONDOR 2009:** *Technologie pile à combustible à base de matériaux conducteurs protoniques céramiques dans la gamme de température 400-600°C et Pile à céramique conductrice protonique* : (EDF, ICGM-CNRS, ICMCB-CNRS, IMN-CNRS, LPS-CEA-CNRS, LEPMI-INPG, Ecole des Mines de Paris-Armines, Marion technologie, C.T.I. SA)

Objectifs : Evaluation de la technologie PCFC (Proton Conducting Ceramic Fuel Cell) entre 400 et 600°C en cellule complète. Réalisation et caractérisation de demi-cellules (anode/électrolyte ; cathode/ électrolyte). Assemblage et caractérisations d'une cellule complète

Résultats : **Nouvelle technologie PCFC validée, et à bas coûts.** Elaboration et caractérisation de cellules architecturées PCFC 1^{ère} génération. Performances: 200 mW/cm², à 600°C. 2 brevets

- **CIEL 2005 :** *Chaudière Individuelle Electrogène (Gaz de France, CEA, IRCE (LACE), LEPMI, SPCTS, SIMAP (LTPCM), LMM, Saint-Gobain CREE)*

Objectifs: Spécifier une chaudière électrogène intégrant une pile SOFC avec un fonctionnement direct au gaz naturel, à maintenance limitée et compacte.

Résultats: L'insertion directe d'une pile SOFC au sein d'une chaudière est réalisable

Performances élevées obtenues pour une pile SOFC sous méthane direct (rendements électriques supérieurs à 55%).

Les apports et impacts du programme (7/7)

Axe 4: Activités transverses

- **DRIVE 2005 : Données expérimentales pour l'évaluation des risques de l'hydrogène** (INERIS, CEA, PSA, Irphe,)

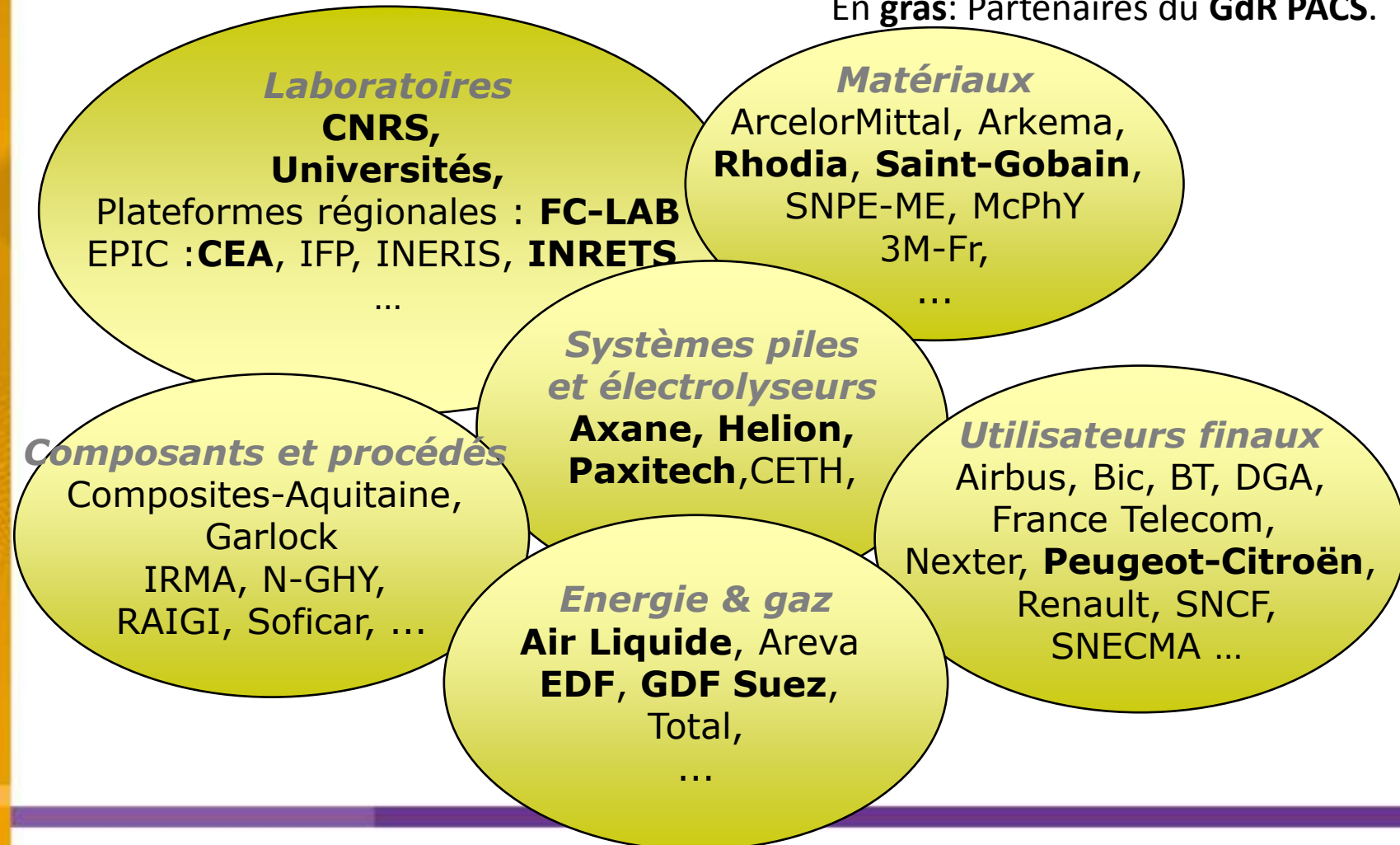
Objectifs: Identifier les situations de fuite liées à l'utilisation de l'H₂ dans le transport public et fournir les éléments quantitatifs pour évaluer objectivement les risques et les maîtriser.

Résultats: Quantification des fuites en H₂ et étude de leur dispersion dans un lieu confiné. Etude des caractéristiques de l'inflammation de l'H₂.
Explosion d'H₂ en milieu confiné.

Les apports et impacts du programme

Contribution à la structuration d'une communauté française associant laboratoires publics, PME et grands groupes

En gras: Partenaires du GdR PACS.



Quelques acquis du programme

- **Avancées scientifiques et techniques** remarquables (70 brevets, 230 ACL pour les éditions 2005, 2006 et 2007)
- **Positionnement technologique de niveau international**: matériaux, composants innovants, mécanismes de fonctionnement, performances des systèmes (électrolyse, réservoirs etc..)
- Une **approche « système »** produisant des résultats très aboutis (FISYPAC, PAC-SM et EOLHY)
- Des **projets collaboratifs** initiés dans PAN-H tels que H2E (OSEO) ou européens (FCH-JU)
- 8 % de projets financés ayant au moins un partenaire étranger.

Forces:

- Couplée à une PAC, l' H_2 offre des avantages indéniables:
 - Alimentation électrique d'équipements portables, de groupes de secours de sites isolés, de groupes auxiliaires de puissance
 - Autonomie accrue des véhicules électriques (range extender) et recharge facilitée de flottes captives
- Structuration efficace d'une communauté recherche-industrie à forte assise GdR CNRS PACS et GdR CNRS ACTHYF
- Recherche amont tirée par la cible automobile (matériaux, composants, systèmes)
- Financement européen FCH-JU: 940 M€ (CE-Industriels 2008-17)

Faiblesses:

- La cible automobile n'est toujours pas atteinte...
- Les performances nécessaires pour un stockage embarqué d' H_2 sont en progrès mais pas encore suffisantes...

Limites actuelles, Perspectives

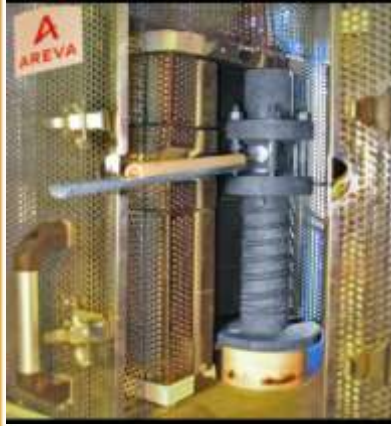
Des efforts de recherche (et de R&D) à cibler sur:

PACs

- **PEMFC: Catalyseurs** mono ou bi-métalliques ($< 50 \mu\text{g Pt}/\text{cm}^2$ soit $50 \text{ mg}/\text{kWe}$ à $1\text{W}/\text{cm}^2$). Catalyseurs en métaux non nobles.
- **PEMFC:** Fonctionnement à $T > 100^\circ\text{C}$ (cinétique électrochimique, moindre passivation par CO, meilleure gestion de la chaleur et de l'eau). Membranes à **forte conduction protonique à $T > 100^\circ\text{C}$ et sous HR réduite**
- **SOFC:** Diminution de la **température de fonctionnement des SOFC** ($< 700^\circ\text{C}$)
- **SOFC et PCFC:** Matériaux plus performants (**notamment protoniques**), durabilité.

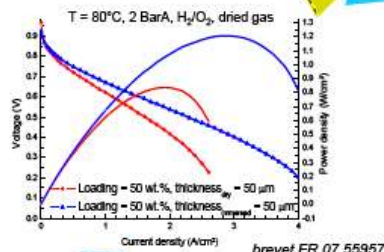
H₂

- **Production centralisée à bas coût** ($< 2 \text{ €/kg}$) à basse T et HP, ou à T entre 500 et 750°C et HP de vapeur d'eau (en aval des centrales nucléaires).
- Meilleures **capacités de stockage de l'H₂** dans les matériaux solides, **coût des réservoirs HP: Stockage chimique embarqué:** Objectifs DoE: **capacité massique du système:** $5,5 \%$ masse de H₂ en 2015, $7,5 \%$ masse en 2020 ($4,5 \%$ à ce jour).
- *A noter: réservoirs stationnaires adiabatiques à MgH₂ commercialisés par la société McPHY.*



**Tâche 2: Nanocomposite
PVDF/Silice-SO₃H**

Alternative « Low-cost »



AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE
ANR



Le débat est ouvert !