



PROGRAMME  
DE RECHERCHE  
HYDROGÈNE

## PEPR HYDROGÈNE DÉCARBONÉ

### PROJETS ET ACTIONS EN COURS

H. BURLET , A. SLAOUI

3<sup>èmes</sup> Rencontres académie-industrie du CNC  
L'Hydrogène vecteur énergétique et réactif chimique



Société Chimique de France



INSTITUT DE FRANCE  
Académie des sciences



Fondation de la Maison de la Chimie

FRANCE  
CHIMIE



PROGRAMME  
DE RECHERCHE  
HYDROGÈNE

## PEPR HYDROGÈNE DÉCARBONÉ

- La stratégie nationale H2 décarboné : motivation et objectifs
- Le PEPR-H2 : mission et feuille de route
- Les projets du PEPR-H2 suivant la chaîne de valeur




# L'hydrogène décarboné: Motivations

## Usage en 2030 et au delà

### Usage en 2020

#### H2 « Industriel »


- World ≈ 90 Mt/yr
- Europe ≈ 9 Mt/yr




- Chemistry (ammonia)
- Refining
- Iron & steel

#### H2 « Industriel » et « Energie »


Achieving deep decarbonization of >80% of CO<sub>2</sub> emissions requires hydrogen




Ultra-low-carbon H<sub>2</sub> as feedstock, e.g, ammonia



High-grade heat for industry & in steel



H<sub>2</sub> to decarbonize the gas grid

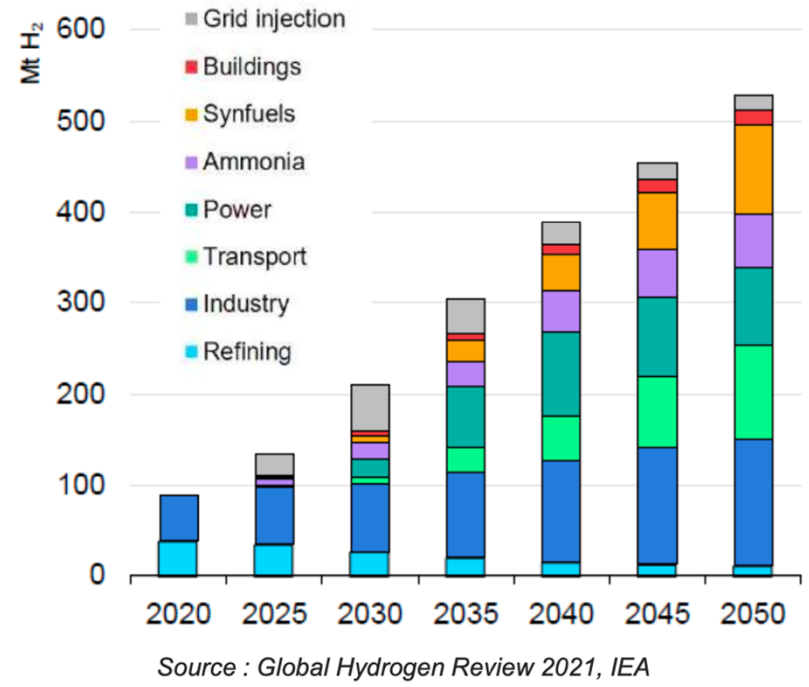


Fuel cells/synfuels for heavy transport and long distances

Source: FCH-JU



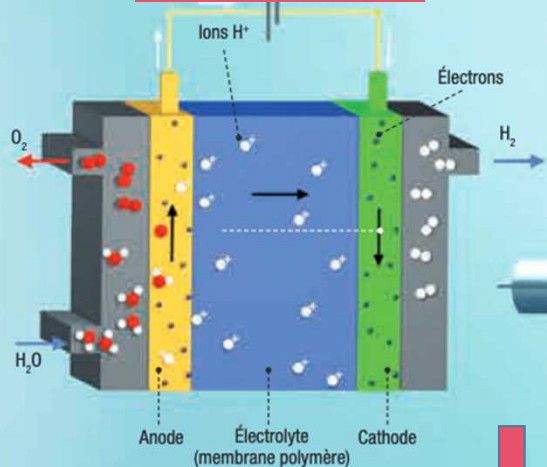
**Hydrogène bas carbone !!**



**Demande en H2 x6 jusqu'à 2050**

# L'hydrogène bas carbone : de la Production à l'Usage

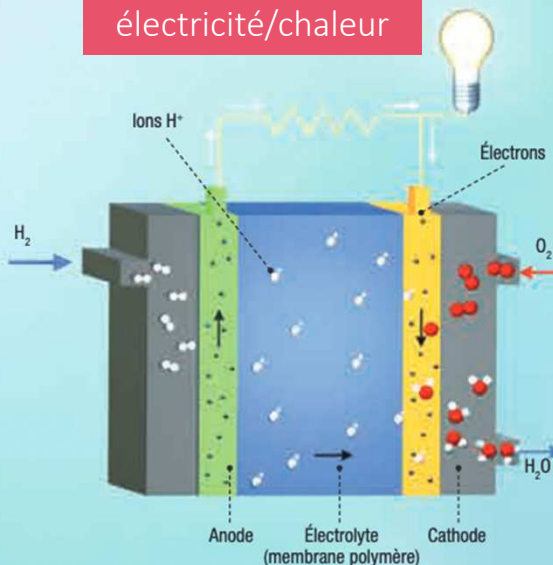
Production Par  
Electrolyse de  
l'eau



Stockage sous  
différentes  
formes



Conversion en  
électricité/chaleur



Usages indirects



Usages directs.

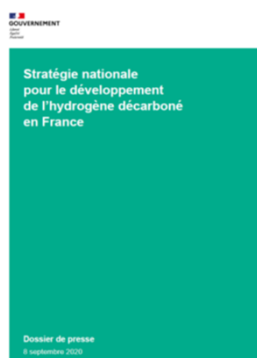
Injection dans le réseau de gaz naturel.



Combinaison avec du CO<sub>2</sub> industriel pour le revaloriser en formant du méthane et des biocarburants  
(power to hydrocarbure).  $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$



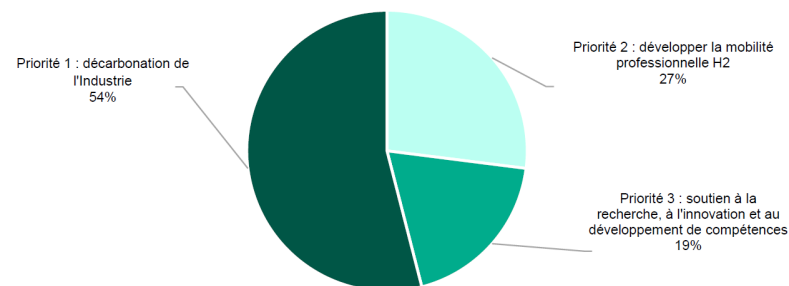
# L'hydrogène décarboné : la Stratégie Nationale



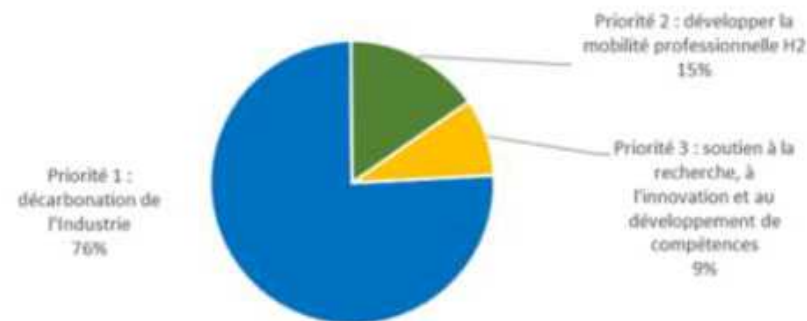
## Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France

(septembre 2020)

Répartition des 3,4 Mds€ alloués sur la période 2020-2023



sur la période 2020-2030 (7,2 Md€)



### LES MESURES DU PLAN HYDROGÈNE

- Mise en place d'un budget de **9,1 Mds€ sur 2020-2030** dont **3,4 Mds€ sur 2020-2023**
- **3 priorités :**
  - Décarboner l'industrie en faisant émerger une **filière française de l'électrolyse** : **6,5 GW d'électrolyseurs installés en 2030.**
  - Développer une **mobilité lourde** à l'hydrogène décarboné ;
  - Soutenir la **recherche, l'innovation et le développement** de compétences afin de favoriser les usages de demain.

PEPR-H2

## PEPR hydrogène décarboné : Missions

- ❑ **Développer l'hydrogène décarboné** comme un vecteur énergétique indispensable à la neutralité climatique.
- ❑ **Soutenir la recherche amont** (TRL 1-4) et préparer la future génération des technologies de l'hydrogène (matériaux, procédés, composants, systèmes, caractérisation, vieillissement, futurs standards).
- ❑ **Contribuer à l'excellence française** dans la recherche sur l'hydrogène (via un financement exclusif aux laboratoires publics de recherche).
- ❑ **Favoriser le transfert rapide** vers le secteur socio-économique

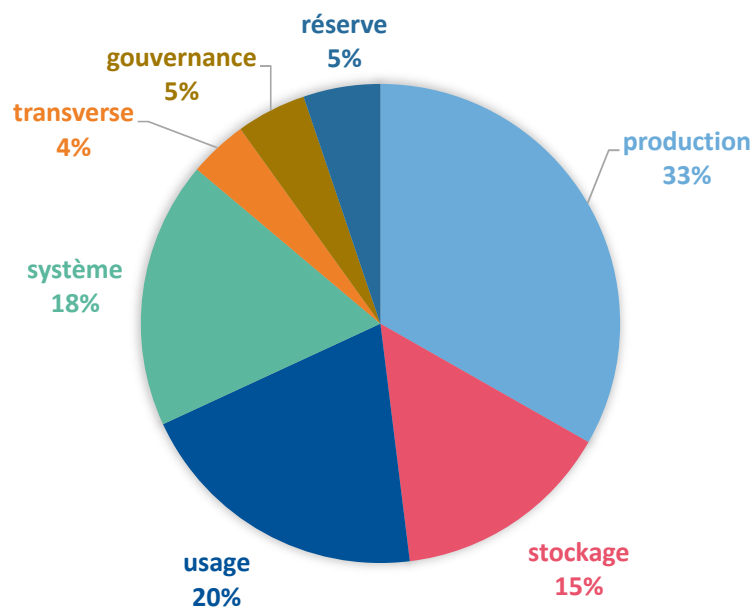
**Coordination scientifique:** CEA (H. Burlet) & CNRS (A. Slaoui)

- ❑ Des axes thématiques alignés avec les **priorités de la stratégie nationale**
  - ✓ Production par électrolyse
  - ✓ Mobilité hydrogène, en particulier pour le transport lourd
  
- ❑ Complétés par des activités visant à favoriser le **déploiement massif** des systèmes hydrogène
  - ✓ Analyses socio-économiques, recherches prénormatives
  - ✓ Analyses de cycle de vie
  
- ❑ Et une ouverture vers des sujets innovants en **préparation de l'avenir**
  - ✓ Production par photo(electro)catalyse
  - ✓ Combustion thermique de l'hydrogène



## Carte d'identité du PEPR H2 à date

### RÉPARTITION BUDGÉTAIRE



- 90% déjà alloués aux projets
- 5% pour l'animation
- 5% disponibles pour de nouveaux projets

### Chiffres clés

- Budget 83M€
- Durée 8 ans
- 18 projets de R&D et 1 équipex  
+ 30 équipes (CNRS-Univ-Ecoles, CEA, IFPEN, INERIS, BRGM, CETIM...)  
Environ 100 doctorants  
Environ 80 post-doctorants

### Pour nous connaître

1 site internet [www.pepr-hydrogene.fr](http://www.pepr-hydrogene.fr)

1 Newsletter 3 numéros/an

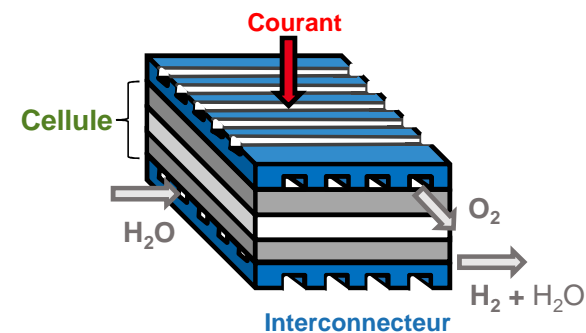
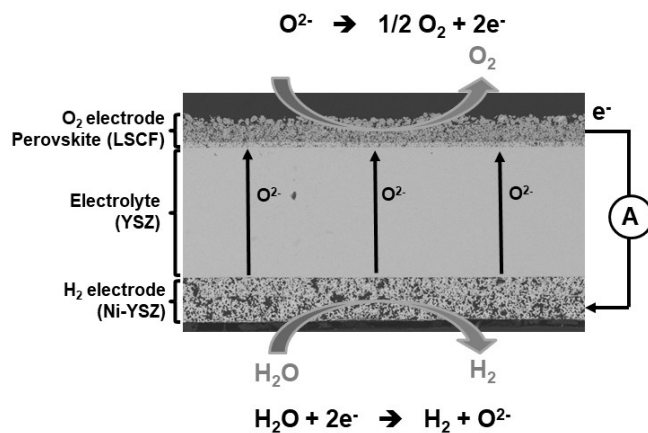
PEPR-H2 day : 12 mars 24 à Grenoble

1 journée de valorisation annuelle

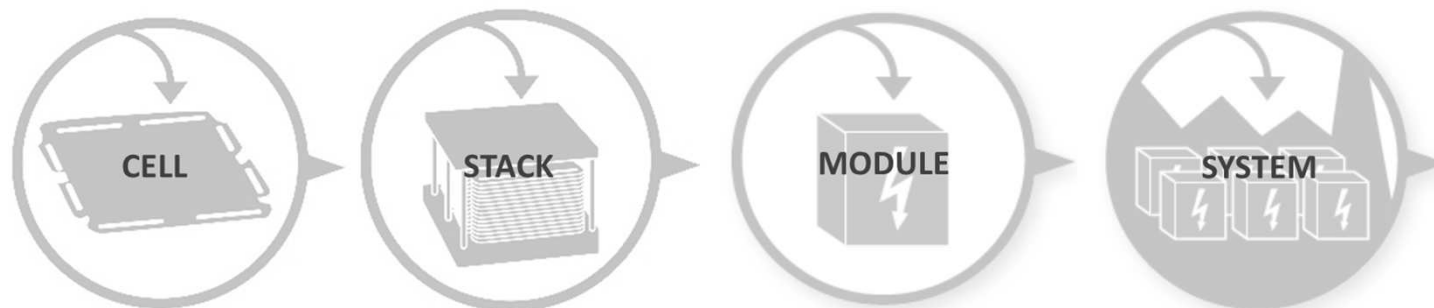


## Les différentes technologies d'électrolyse

Le cœur de la cellule



Technologie modulaire



# Les différentes technologies d'électrolyse



Eau liquide :  
Electrolyse basse température



Vapeur :  
Electrolyse haute température

Fonction de la température

40-60°C  
Electrolyse alcaline à membrane (AEMEL)

60-90°C  
Electrolyse PEM (PEMEL)

40-90°C  
Electrolyse alcaline (AEL)

400-700°C  
Electrolyse à oxyde solide protonique (PCCEL)

650-850°C  
Electrolyse à oxyde solide anionique (SOEL)



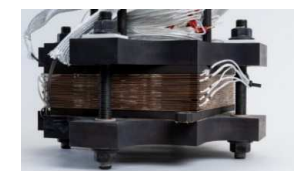
GEN-HY



Elogen



McPhy

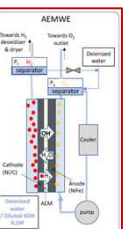


GENVIA

Maturité croissante

Maturité croissante

## Les différentes technologies d'électrolyse basses T



40-60°C  
Electrolyse alcaline à membrane (AEMEL)

### DAEMONHYC (G. Maranzana)

- Nouveaux **matériaux sans platinoïdes** et nouvelles mises en forme pour HER et OER
- Compréhension des mécanismes de dégradation
- Performances
  - ✓ 0.5 A/cm<sup>2</sup> @ 1.8 V avec de l'eau pure
  - ✓ 1 A/cm<sup>2</sup> @ 1.8 V avec 0.1 M KOH
  - ✓ ΔP=15 bar

Electrolyse basse température



Stainless steel substrate before and after ALD

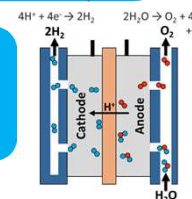
### COSTO (L. Assaud)

- Plaque bipolaire/couche poreuse de transport en acier inoxydable
- **Revêtements anti-corrosion (TiN)** à l'anode, étude et modélisation de leur micro/nanostructure
- Etude des performances et de la durabilité de ces éléments structurels en cellule d'électrolyse



~~60-90°C  
Electrolyse alcaline (AEL)~~

60-90°C  
Electrolyse PEM (PEMEL)



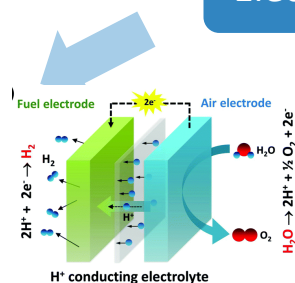
### MATHYLDE (C. Beauger)

- Diminution de la **quantité d'iridium** à l'anode (<0,2mg<sub>Ir</sub>/cm<sup>2</sup>)
- Diminution de l'épaisseur de la membrane (<80µm) et renforcement par intégration de nanofibres
- Morphologies électrodes, couches de transport poreuses et Interfaces

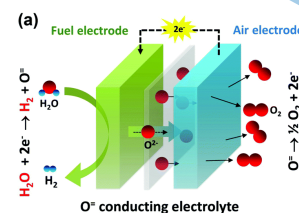


## Les différentes technologies d'électrolyse hautes T

400-700°C  
Electrolyse à oxyde solide protonique (PCCEL)



Electrolyse haute température



650-850°C  
Electrolyse à oxyde solide anionique (SOEL)

### PROTEC (G. Taillades)

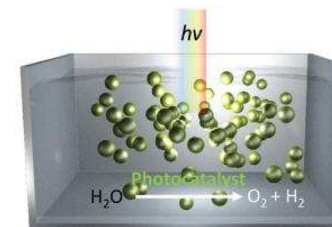
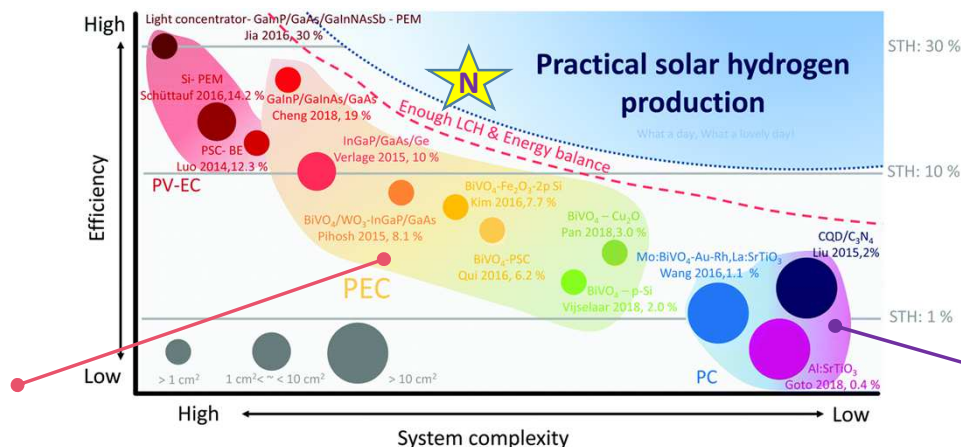
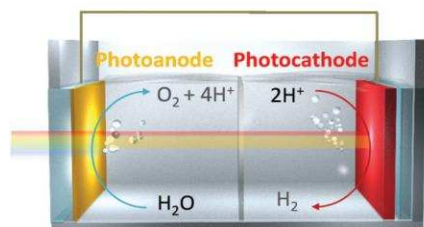
- Optimisation des matériaux, architectures et interfaces
- Optimisation du procédé de mise en forme des cellules pour un transfert technologique
- Évaluation du fonctionnement réversible, de la production de  $\text{NH}_3$  et de l'électro-réduction du  $\text{CO}_2$  sur la base des cellules développées
- Performances visées  $\Phi = 50 \text{ mm}$ ,  $e = 450 \mu\text{m}$   
 **$0,8 \text{ A/cm}^2$  à  $1,3\text{V}$  @  $600^\circ\text{C}$**   
taux de dégradation < 2% **1000h**

### CELCER-EHT (F. Lefebvre-Joud)

- Optimisation des matériaux et interfaces pour augmenter la robustesse, et la durabilité des cellules
- Mise à l'échelle sur cellules >  $100\text{cm}^2$
- Développement de nouveaux matériaux pour augmenter la performance initiale et la durabilité des cellules
- **Performances visées sur cellules >  $100\text{cm}^2$**   
Taux de dégradation des cellules :  
 **$0,7\%/1000\text{h}$  à  $1,3\text{V}$  et  $1 \text{ A/cm}^2$**

Maturité croissante

# Les différentes technologies de photo(électro)catalyse



## NAUTILUS (C. Cornet)

- Développement de cellules PEC performantes et durables
- Nouveaux empilements de matériaux pour les photoélectrodes III-V/Si pour une meilleure protection et des propriétés catalytiques supérieures. .
- Performances d'une Cellule PEC à deux photoélectrodes, co-catalyseur/couche de protection/empilement III-V/Si :



**STH >10%, une durée de vie extrapolée >1000 heures.**

- Objectif LCOH < 1,5 \$/kg

## HYDRO (D. Zigah)

- Synthèse de nouveaux photocatalyseurs stables et performants basés sur les oxydes à haute entropie
- Analyse operando des matériaux
- Prédiction des structures de bandes (modélisation)
- Mesure des performances



# Les différentes technologies de stockage/transport

Procédés physiques

Dans les matériaux

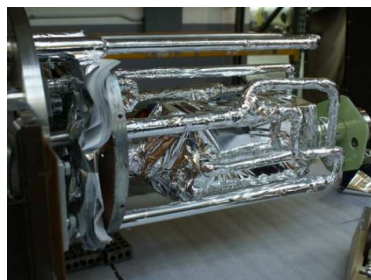
Gaz comprimé  
hyperbare

H2 liquide  
cryogénique

Milieu liquide :  
LOHC

Dérivés : NH<sub>3</sub>

Milieu solide:  
Hydrures solides  
MOF



# Les différentes technologies de stockage/transport

Gaz comprimé  
hyperbare

## HYPERSTOCK (D. Chapelle)

- Compréhension des interactions hydrogène et matériaux : cas des métalliques (FPH), des polymères et composites
- Analyse de cycle de vie
- Recensement des contraintes normatives pour les différentes classes de matériaux
- Etablissement d'un référentiel pour les polymères et composites
- **Préconisations** sur le choix et l'usages des matériaux/procédés pour baisser l'impact carbone

H2 liquide  
cryogénique

## ESKHYMO (E. Havret)

- **Etude de deux scénarios accidentels:**
  - ✓ *entrée d'air suite à une rupture de l'enveloppe externe d'un réservoir isolée sous vide* : quantification des phénomènes physiques mis en jeu
  - ✓ *déversement d'hydrogène liquide consécutif à la défaillance catastrophique du réservoir cryogénique* : cinétique d'évaporation à la brèche, prédiction de la taille des nuages inflammables et de la sévérité de l'inflammation du nuage .
- **Validation de modèles** par l'expérimentation (adaptation de l'instrumentation en cryogénie)



# Les différentes technologies de stockage/transport

## Milieu liquide :LOHC

### BHYOLOHC (K. Viguier)

- Développement d'une chaîne hydrogénation/déshydrogénation pour le stockage et le transport de H<sub>2</sub> à faible empreinte environnementale
- LOHC haute capacité à base de **polyols biosourcés**
- Optimisation des procédés : **hydrogénation catalytique et déshydrogénation électrocatalytique**
- Modéliser l'électro-déshydrogénation des LOHC

## Dérivés : NH<sub>3</sub>

### GREENH<sub>3</sub> (M. Robert)

- Développement d'une technologie alternative et performante pour la production de NH<sub>3</sub>
- Nouveaux électrolytes tels que les **liquides ioniques**
- **Identification** des mécanismes catalytiques
- **Optimisation** des catalyseurs dans des cellules de (photo)électrolyse
- Performances visées  
**Densité de courant** >0,1 A/cm<sup>2</sup> @ 0,9-1,5 V  
**Productivité** de 18-100 mg<sub>NH<sub>3</sub></sub> cm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> à 80-95% d'**efficacité faradique** et une durabilité > 100 h

## Milieu solide: Hydrures solides & MOF

### SOLHYD (F. Cuevas)

- Dépassement des limites des différentes familles des matériaux considérées actuellement pour le stockage solide de l'H<sub>2</sub>
  - ✓ Nouvelle génération d'**hydrures métalliques** à capacité massique améliorée
  - ✓ Nouveau procédé de régénération d'**hydrures non-réversibles** moins énergivores
  - ✓ Nouvelle génération d'**hydrures complexes** et de **matériaux poreux** fonctionnant à T **ambiante**
- Mise en place des nouvelles stratégies de modélisation et de calcul (Machine Learning ) pour guider la synthèse de nouveaux matériaux micro et (nano)structurés





# Les différentes technologies de conversion

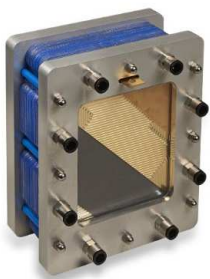
Piles à combustible

Combustion H2



Piles basses températures

Piles hautes températures



# Les différentes technologies de conversion

## Piles basse température

### Matériaux/composants

#### PEMFC95 (M. Chatenet)

- Développement d'une **PEMFC opérant à 95°C** : simplification du refroidissement, tolérance à H2 impur, baisse des coûts
  - ✓ Membranes et catalyseurs
  - ✓ **Intégration** en AME, cellule de 25 cm<sup>2</sup> et mini-stack
  - ✓ Instrumentation des cellules → compréhension *operando* des performances et de la durabilité
- Performances visées :  
Fonctionnement à **densité de courant élevée** stable sur quelques 100 h, à T = 95°C à chargement faible en catalyseur

#### DURASYS-PAC (N. Steiner)

- **Augmentation de la durabilité** pour la mobilité lourde
  - ✓ Durée de vie > 25 000 h.
  - ✓ Efficacité > 65%.
  - ✓ Continuité de service 99%.
- **Meilleure tolérance aux conditions dégradantes**
  - ✓ Validation en cible temps réel d'algorithmes de contrôle tolérant aux défauts .
- **Capacité accrue de démarrage à froid**
  - ✓ démarrage à -30°C avec un apport (minimal) d'énergie en moins de 30 secondes.
  - ✓ Capacité de survie à -40°C.

### Systèmes

#### HYSYSPEM (JP. Poirot)

- **Optimisation** du rendement global du système à pile à combustible hybride, de sa durabilité et de sa disponibilité pour les applications de mobilité lourde
  - ✓ Rendement système > 65 %
  - ✓ Durabilité > 20000 heures
  - ✓ Disponibilité > 98 %
  - ✓ Dynamique (Pmax en 1 s)
- Accélération du développement et de la validation de nouveaux concepts avec une **approche semi-virtuelle** (plateforme XiL)





## Les différentes technologies de conversion

### Piles haute températures

#### FLEXISOC (A. Le Gal La Salle)

- Nouvelle génération de piles à combustibles à oxydes solides anioniques **flexibles en combustibles** (H<sub>2</sub> impur, CH<sub>4</sub>...) et à températures moins élevées
  - ✓ Nouveaux catalyseurs de matériaux d'électrodes
  - ✓ Optimisation des procédés de mise en forme des matériaux
  - ✓ Elaboration de cellules
  - ✓ Optimisation des cellules et modélisation
- Performances visées @600°C :  
**durée de vie > 30 000h**  
sans reformage ni désulfuration

### Combustion H<sub>2</sub>

#### MONTHY (P. Desgroux)

- Qualification de la combustion d'hydrogène
- Etablissement d'une base de données sur la combustion H<sub>2</sub> en régime laminaire et turbulent
  - ✓ Mesure des propriétés physico-chimiques
  - ✓ Mesures quantitatives in-situ des espèces chimiques
- Détermination des mécanismes physiques/chimiques de la formation de NO<sub>x</sub> dans les flammes turbulentes H<sub>2</sub>
- Compréhension/modélisation de la formation des NO<sub>x</sub> indispensables pour développer des outils HPC nécessaires pour **concevoir les futures chambres de combustion à H<sub>2</sub>**

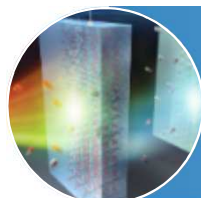




PROGRAMME  
DE RECHERCHE  
HYDROGÈNE

## Les 18 projets de R&D +1 Equipex du PEPR-H2

### Production



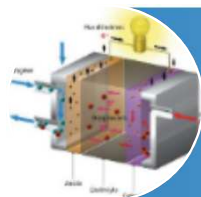
Electrolyse haute température : **CELCER-EHT, PROTEC**  
Electrolyse basse température : **COSTO, DAEMONHYC, MATHYLDE**  
Photo(electro)catalyse : **HYDRO, NAUTILUS**

### Stockage



Solide : **SOLHYD**  
Gaz : **HYPERSTOCK**  
Liquide : **GREENH3, BHYOLOHC, ESKHYMO**

### Usage



PEMFC : **PEMFC95, DURASYS-PAC**  
SOFC : **FLEXISOC**  
Combustion : **MONTHY**

### Systemes



Equipex : **DURABILITHY**  
Systeme integre : **HYSYSPEM**



AIDHY  
Analyse socio-tech-eco & ACV



# Analyse de la soutenabilité et responsabilité sociale des projets hydrogène décarboné

AIDHY (M. Merad)

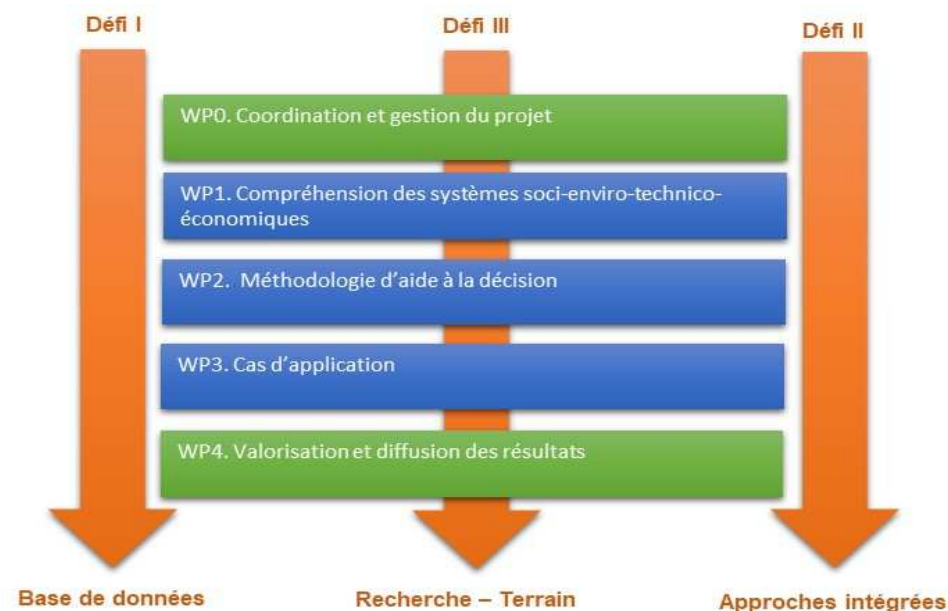
## Objectifs et finalité

**Consortium** : pluri-disciplinaire alliant sciences humaines et sociales, sciences économiques, sciences naturelles et sciences de l'ingénieur

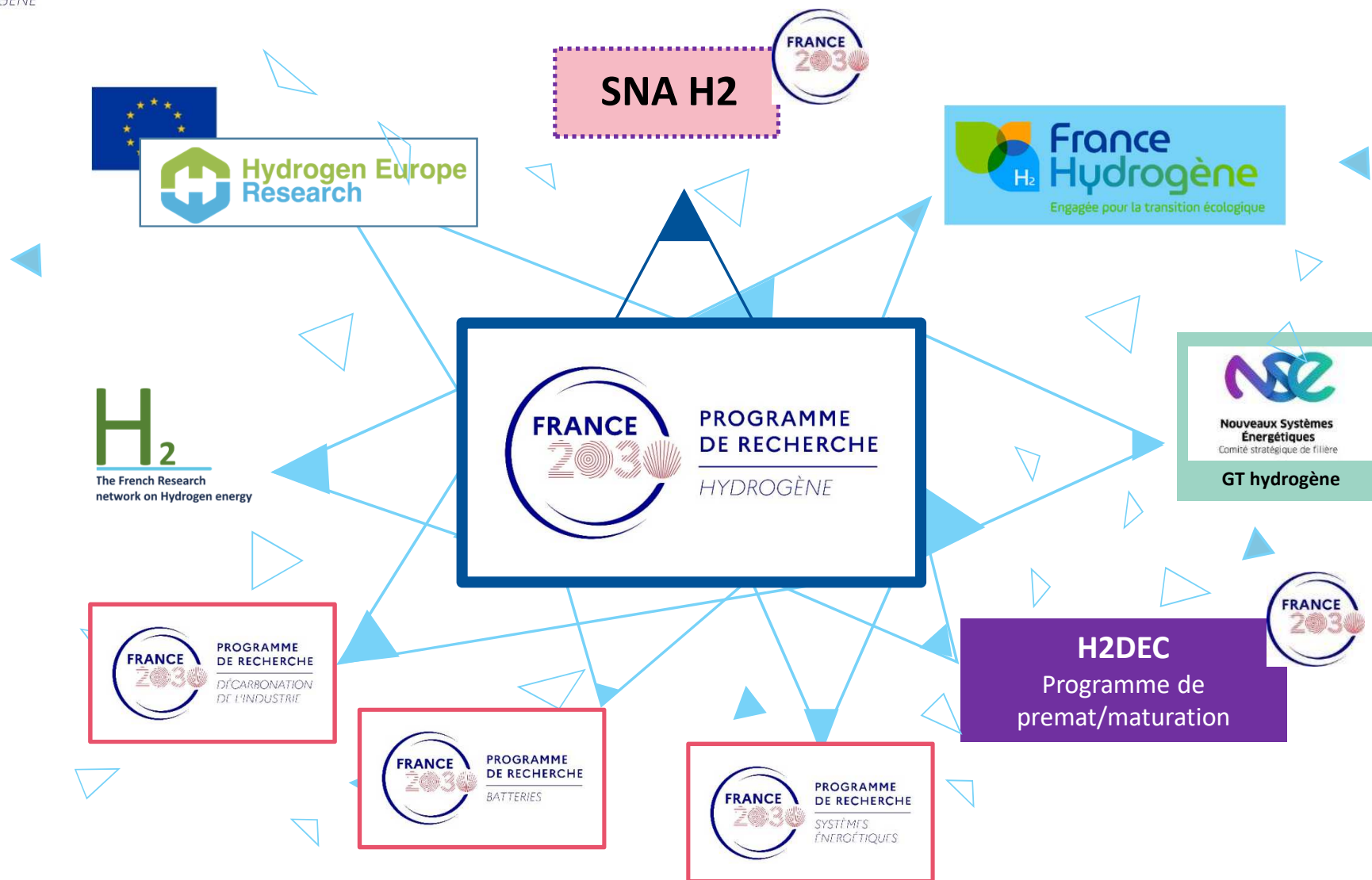
**Objectifs**: mieux caractériser et comprendre les enjeux, les opportunités et les risques autour des projets en lien avec l'hydrogène décarboné et de juger du niveau de soutenabilité et de responsabilité sociale de ces derniers.

**Finalité**: fournir une aide à la décision pour des porteurs de projets, des régulateurs, des territoires, des tiers garants, et des citoyens

## Méthodologie



# Le PEPR-H2 dans l'écosystème





Pour plus de détails sur les résultats issus des projets

PEPR  DAY

3<sup>e</sup> ÉDITION

12 mars 2024  
Maison Minatec  
Grenoble - France



PROGRAMME  
DE RECHERCHE  
HYDROGÈNE





PROGRAMME  
DE RECHERCHE  

---

HYDROGÈNE

# Merci

Pour nous contacter

[www.pepr-hydrogene.fr](http://www.pepr-hydrogene.fr)

[pepr.hydrogene@cea.fr](mailto:pepr.hydrogene@cea.fr)

