



PROGRAMME  
DE RECHERCHE  
HYDROGÈNE

Newsletter  
Septembre 2024



Programme et Équipements Prioritaires  
de Recherche Hydrogène décarboné



## EDITO

Depuis juillet 2024, le portefeuille de projets du PEPR-H2 s'est enrichi de deux nouveaux projets, portant le nombre total de projets financés à vingt. Ces nouveaux projets complètent les travaux réalisés autour de la production d'hydrogène par électrolyse, renforçant ainsi les études sur les électrolyseurs, en cohérence avec la stratégie nationale sur l'hydrogène décarboné. En effet, le projet ANGELIC vise à développer un stack d'électrolyseur à membrane échangeuse d'anions de type AEM. Il complète le projet DAEMONHYC déjà lancé. Le projet ASTERHYX aborde la problématique des tests accélérés des électrolyseurs à membrane échangeuse de protons de type PEM. Avec ces deux nouveaux projets, le budget global du PEPR est dorénavant entièrement attribué.

Concernant, le dossier de cette lettre, il traite de comment les textes réglementaires actuels façonnent le déploiement de la filière hydrogène, en identifiant les leviers et les obstacles potentiels. Une réflexion sur l'harmonisation nécessaire pour une régulation soutenable est proposée.

Ces aspects sont étudiés dans le cadre du projet AIDHY. Par ailleurs, cette lettre met un focus sur des avancées majeures dans certains projets du programme : le projet MATHYLDE dédié à l'amélioration de la technologie d'électrolyse PEM, a révélé des résultats intéressants issus de tests électrochimiques sur électrode tournante ou en mono-cellule; le projet CELCER-EHT sur les électrolyseurs à base de céramique (SOC) à conduction anionique a démontré les avantages d'une architecture gradient d'électrode à oxygène obtenue par atomisation électrostatique ; le projet SOLHYD sur le stockage de l'hydrogène dans des structures solides a montré l'augmentation des capacités volumétriques de stockage d'un matériau hybride issu du mélange d'un MOF avec du charbon actif. Cette lettre fait également un éclairage sur la dernière conférence internationale « Prospects on Protonic Ceramic Cells (PPCC) » à laquelle les partenaires du projet PROTEC ont présenté leurs derniers résultats relatifs au développement de nouveaux matériaux, la mise en forme et les performances des cellules.

*Hélène Burllet et Abdelilah Slaoui,  
Directeurs scientifiques du PEPR-H2*



ACTUS

LES ACTUALITÉS DES  
PROJETS DU PEPR-H2

- # Tests harmonisés au sein du projet MATHYLDE
- # Électrodes à oxygène composites nanostructurées de cellules SOC
- # Vers des cellules céramiques protoniques
- # Stockage d'hydrogène dans des hybrides MOF@Charbon actif



DOSSIER

ENTRE PROMESSE  
TECHNOLOGIQUE ET  
DÉFI RÉGLEMENTAIRE:  
VERS UN CADRE  
SOUTENABLE POUR LA  
FILIÈRE D'HYDROGÈNE



AGENDA

LES ÉVÈNEMENTS À VENIR

OCTOBRE  
NOVEMBRE  
DÉCEMBRE 2024



## LES ACTUALITÉS DES PROJETS DU PEPR-H2

Ce numéro s'intéresse aux projets de recherche de production par électrolyse de type PEM, SOC et PCC, et de stockage de l'hydrogène en milieu solide.

### Tests harmonisés au sein du projet MATHYLDE

Les matériaux développés dans le cadre du projet **MATHYLDE** dédié à l'amélioration de la technologie d'électrolyse PEM, ont vocation à être testés en monocellule au sein d'assemblages membrane-électrodes (AME) avant de passer à l'échelle du stack. Pour limiter les biais introduits par la mise en composant (AME), les équipements et les protocoles, il a été décidé d'harmoniser autant que possible les différentes procédures au sein du consortium.

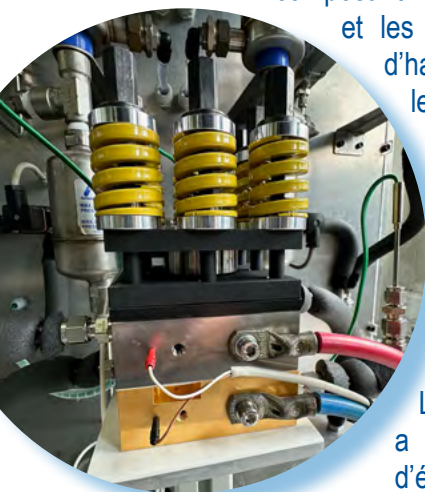


Figure 1 : Monocellule d'électrolyse 25 cm<sup>2</sup> développée par le LEMTA pour des essais sous pression © LEMTA (CNRS / Univ Lorraine)

### Une cellule commune pour tout le consortium

Le LEMTA, partenaire du projet a développé une monocellule d'électrolyse qui sera utilisée par les partenaires du projet. Avec 25 cm<sup>2</sup> de surface active, elle permet de réaliser des essais jusqu'à 16 ou 100 bars selon le modèle. La contrainte de serrage, réglée par capteur de force, est contrôlée par des ressorts pour maîtriser l'impact des variations de température. La température de la cellule, mesurée par une sonde Pt, est régulée par circulation d'eau thermostatée. Les partenaires ont fait le choix d'une cathode en acier inoxydable doré et d'une anode en Ti revêtue de Pt pour minimiser la résistance de contact avec la couche de transport

de force, est contrôlée par des ressorts pour maîtriser l'impact des variations de température. La température de la cellule, mesurée par une sonde Pt, est régulée par circulation d'eau thermostatée. Les partenaires ont fait le choix d'une cathode en acier inoxydable doré et d'une anode en Ti revêtue de Pt pour minimiser la résistance de contact avec la couche de transport

### Électrodes à oxygène composites nanostructurées de cellules SOC

Dans le cadre du projet **CELCER-EHT** dédié à l'optimisation des cellules à oxydes solides (SOC), il est question de développer une électrode à oxygène innovante permettant la réduction de la température de fonctionnement de la cellule et facilitant ainsi le déploiement de la technologie SOC. En effet, la dégradation réduite des matériaux et composants à température intermédiaire (< 850 °C), ainsi qu'une augmentation du rendement du système suite à l'économie d'énergie requise pour le chauffer, ont des effets bénéfiques mutuels. En revanche, cette stratégie limite les cinétiques des réactions. La solution étudiée

poreuse (PTL), fritté de poudre rigide à petits pores, évitant la pénétration de la membrane sous pression et autorisant un fonctionnement en différence de pression Anode/Cathode. Les cellules sont également équipées d'une électrode de référence hydrogène.

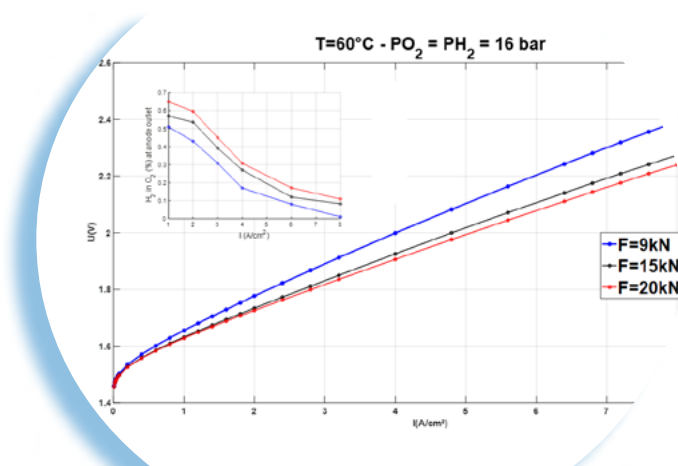


Figure 2 : Courbes de polarisation obtenues à trois forces de serrage différentes. © LEMTA (CNRS / Univ Lorraine)

### Des protocoles d'essai partagés

Les protocoles de tests électrochimiques sur électrode tournante (RDE) ou en monocellule ont été partagés au sein du consortium pour permettre une comparaison au plus juste des résultats obtenus par les différents partenaires, idem pour la préparation des électrodes et des assemblages membrane-électrodes.

Les premiers résultats obtenus sur un assemblage membrane-électrodes à l'état de l'art montrent que l'efficacité énergétique est d'autant meilleure que la force de serrage est importante (cf. figure 2).

Mais la perméation de l'hydrogène au travers de la membrane est également une fonction croissante de cette contrainte de compression. Le choix de la contrainte de serrage résulte donc d'un compromis.

Christian Beauger  
Coordinateur du projet MATHILDE  
Gaël Maranzana  
Coordinateur du projet DAEMONHYC

pour pallier cet inconvénient côté électrode à oxygène, a consisté à déposer sur l'électrolyte des couches actives fonctionnelles nanostructurées par atomisation électrostatique (ESD) (cf. figure 1) et à base de matériaux, comme le La<sub>2</sub>NiO<sub>4+d</sub> (LNO), présentant des propriétés de transport d'oxygène supérieures

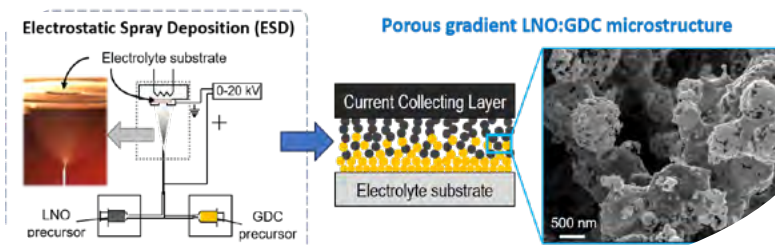


Figure 1 : Réalisation d'une architecture gradient d'électrode à oxygène par atomisation électrostatique (ESD) et microstructure poreuse d'une coupe transversale. © LEPMI (CNRS / Univ Grenoble Alpes / Univ Savoie Mont blanc) et CEA-Liten

### Des couches actives à gradient de composition

Les études par impédance électrochimique (EIS) des





électrodes en LNO ont démontré une contribution principale à la résistance de polarisation due à la réaction électrochimique aux sites actifs du LNO. Dans ce travail, pour améliorer les échanges de charges, des architectures alternatives d'électrodes à oxygène ont été conçues, tout en gardant une porosité élevée des couches actives fonctionnelles. L'approche a consisté à synthétiser des composites à gradient de composition, en modulant le ratio entre LNO et GDC ( $Ce_xGd_{1-x}O_z$ ) dans l'épaisseur de la couche, et en cristallisant le LNO en grains de taille nanométrique. Cette microstructure a permis de contrôler la localisation des points de contact entre LNO et GDC.

## Une réduction de la résistance de polarisation mesurée

En variant la composition totale en LNO et GDC des électrodes à gradient, une amélioration de la résistance de polarisation de 0.20 à 0.05  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  a été obtenue à 750°C (cf. figure 2) pour le matériau à gradient (LNO:GDC 72:25 %) par rapport au LNO de référence.

Ce résultat représente une première étape réussie dans l'optimisation du transfert de charges. Pour aller plus loin, la fabrication de cellules complètes est en cours, ce qui permettra à la fois de vérifier les résultats sous polarisation et d'étudier la stabilité des électrodes à long terme.

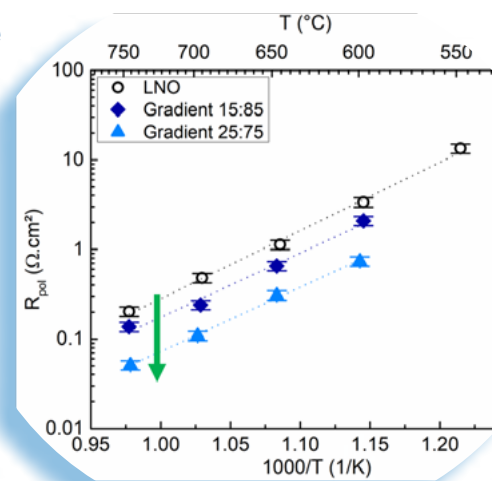


Figure 2 : Logarithme de la résistance de polarisation de cellules symétriques en fonction de la température. (EIS à l'OCV,  $V_{ac} = 0.02 \text{ V}$ )

© LEPMI (CNRS / Univ Grenoble Alpes / Univ Savoie Mont blanc) et CEA-Liten

En savoir plus

Michael Spann et Elisabeth Djurado, *LEPMI*  
Jérôme Laurencin, *CEA-Liten*

## Vers des cellules céramiques protoniques

Du 18 au 21 juin 2024 s'est tenu à Dijon la septième édition du congrès PPCC (Prospects on Protonic Ceramic Cells). Cet événement est focalisé sur les céramiques à conduction protonique. Les rencontres internationales PPCC couvrent les domaines de la chimie du solide, de la science des matériaux, des caractérisations physico-chimiques et électrochimiques et des applications de cette technologie.

## PPCC : Le rendez-vous bisannuel de la communauté internationale des céramiques à conduction protonique

PPCC permet à la communauté internationale d'échanger sur les avancées en matière de recherche et de développement des cellules céramiques à conduction protonique et de leurs applications. Lors de cette édition, 80 participants issus du monde universitaire, de l'industrie et de centres de recherche ont eu l'occasion de partager connaissances techniques et théoriques avec des collègues de 19 nationalités. 40 chercheurs ont présenté leurs travaux dans les 4 sessions plénières programmées (PCC materials : from fundamental to characterization, PCC Modelling : from calculation to simulation, PCC Cells : from manufacture to performance, PCC Applications : from laboratory to market).

## Les résultats de PROTEC mis en lumière

Les membres du consortium **PROTEC** ont communiqué sur les 3 axes du projet (développement de matériaux, mise en forme et performance des cellules) en présentant 4 posters et 2 communications orales décrites succinctement ci-dessous.

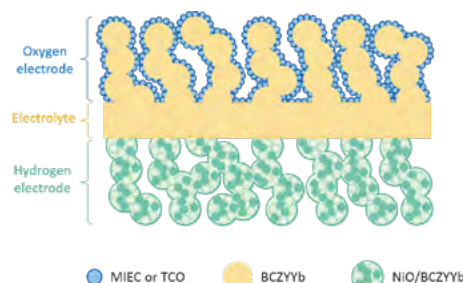


Figure : Représentation schématique d'une cellule de pile à combustible de type PCFC avec une électrode à oxygène architecturée élaborée par infiltration

© ICMCB (Bordeaux INP / CNRS / Univ Bordeaux)

L'équipe de l'ICMCB a présenté ses résultats obtenus sur une électrode à oxygène architecturée basée sur un squelette poreux de conducteur protonique et infiltrée par de nouveaux matériaux MIECs (conducteurs mixtes ioniques électroniques) et TCOs (oxydes triples conducteurs) (cf. figure). Les tests électrochimiques réalisés en mode pile à combustible et couplés à des caractérisations post-mortem ont permis d'identifier les architectures les plus prometteuses.

L'équipe de l'IMN a présenté une étude approfondie sur le conducteur protonique  $BaZr_{0.1}Ce_{0.7}Y_{0.1}Yb_{0.1}O_{2.9}$  pour son potentiel en tant qu'électrolyte dans un électrolyseur à conduction protonique. Une caractéristique notable de la structure de ce matériau, analysée par diffraction des neutrons et des rayons X, est le tilt des octaèdres, qui pourrait être lié au degré d'hydratation ou de protonation du matériau.

Gilles Taillades (*ICGM*), Gilles Caboche (*ICB*), Lionel Combemale (*ICB*), Pascal Briois (*UTBM*), membres du consortium PROTEC et organisateurs de PPCC2024



Photographie des organisateurs de PPCC2024 et du consortium PROTEC © PPCC



## Stockage d'hydrogène dans des hybrides MOF@Charbon actif

Le stockage de l'hydrogène dans des milieux poreux solides est une des voies explorées dans le cadre du projet **SOLHYD**. Des travaux conduits à l'Institut Jean Lamour (IJL) étudient plus particulièrement la physisorption de l'hydrogène en conditions cryogéniques et à des pressions modérées dans des matériaux poreux à grande surface spécifique. Or de tels matériaux ont souvent une densité tassée ( $\rho_{\text{pack}}$ ) très faible. Son augmentation est donc indispensable pour optimiser la capacité de stockage volumétrique de  $\text{H}_2$  dans un réservoir.

Les matériaux « Metal Organic Framework » (MOFs) présentent une porosité ajustable et peuvent offrir des surfaces spécifiques très élevées. Cependant, ils peuvent parfois être instables en présence d'humidité. L'objectif de mélanger un MOF avec du charbon actif (CA) est de produire un matériau hybride, MOF@CA, aux propriétés améliorées pour le stockage de  $\text{H}_2$ .

### Synthèse simple et rapide avec la technique RAM

L'équipe de l'IJL a synthétisé des hybrides MOF@CA en incorporant un CA, le MSC30 (Kasai), couramment utilisé comme adsorbant de référence pour le stockage de  $\text{H}_2$ , dans la matrice du MOF HKUST-1 (BASF) à l'aide d'un équipement de Mélange Acoustique par Résonance (RAM) (cf. figure). Le RAM utilise un mouvement à basse fréquence et haute intensité pour créer une zone de micro-mélange uniforme dans le récipient, facilitant ainsi le déplacement des matériaux et

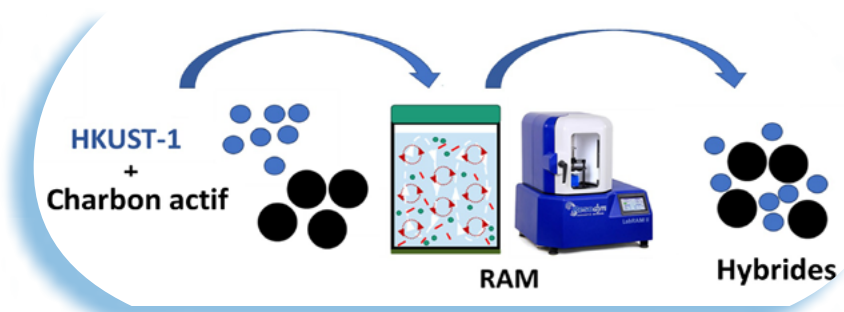


Figure : Étapes de synthèse des matériaux hybrides  
© IJL (CNRS / Univ Lorraine)

permettant d'obtenir un mélange physique homogène des poudres en 15 minutes seulement.

### Le potentiel des hybrides MOF@CA validé par les expériences

Les résultats montrent que l'ajout de CA au HKUST-1 connu pour son instabilité en présence d'humidité, réduit considérablement son affinité pour l'eau, et que cette réduction est supérieure à la valeur théorique calculée par combinaison linéaire des affinités des deux solides, en tenant compte de leur proportion respective dans le mélange.

L'augmentation de la surface spécifique apportée par le CA, et de la  $\rho_{\text{pack}}$  apportée par le MOF mais aussi par un meilleur remplissage de l'espace puisque les deux matériaux présentent des tailles de particules différentes, ont contribué à la réduction importante du volume de stockage mesurée : les capacités volumétriques de stockage de  $\text{H}_2$  ( $\text{kg/m}^3$ ) des hybrides sont supérieures à celles des matériaux purs pris individuellement. En outre, les capacités d'adsorption de ce matériau hybride sont stables après des tests d'adsorption d'hydrogène répétés de manière cyclique.

#### En savoir plus

L. Jimenez-Lopez, R. Morales Ospino, J. Castro Gutierrez, A. Celzard, V. Fierro.  
IJL\_ Laboratoire du projet SOLHYD

### EN BREF

#### Le PEPR-H2 présent à Paris-Saclay Spring 2024

Le PEPR-H2 a participé, lors du **Paris-Saclay Spring**, à la table ronde « Cleantech : tackling climate change through innovation » pendant laquelle la filière hydrogène a été évoqué comme prometteuse pour la transition énergétique et également source d'innovation importante.

#### Le PEPR-H2 présent au colloque de l'Innovation de l'Association nationale de la recherche et de la technologie (ANRT)

Le PEPR-H2 est intervenu sur une table ronde consacrée aux défis technologiques de la décarbonation des transports lors du **cocktail de l'Innovation de l'ANRT** du 30 mai 2024.

#### Une participation active du PEPR-H2 à MH-2024

Le projet SOLHYD a contribué activement à la conférence **Metal-Hydrogen Systems 2024** qui s'est tenue à Saint-Malo du 26 au 31 mai, tant dans l'organisation du congrès, qu'en contributions scientifiques avec pas moins de 8 communications orales et 3 posters. Le prestigieux prix Michel Latroche, récompensant la meilleure présentation orale de MH2024 pour un ou une scientifique, a été décerné à Laura Jimenez-Lopez, doctorante de l'Institut Jean-Lamour pour ses travaux réalisés dans SOLHYD (voir l'actualité ci-dessus).



Ci-dessus : Remise du Prix Michel Latroche à Laura Jimenez-Lopez (IJL) lors de la conférence MH2024 © Jean-Claude Crivello, MH2024







## ENTRE PROMESSE TECHNOLOGIQUE ET DÉFI RÉGLEMENTAIRE : VERS UN CADRE SOUTENABLE POUR LA FILIÈRE D'HYDROGÈNE DÉCARBONÉ EN FRANCE

L'hydrogène décarboné est présenté comme étant la clé de la transition énergétique en France. Cet article explore comment les textes réglementaires actuels façonnent le déploiement de cette filière, en identifiant les leviers et les obstacles potentiels. Une réflexion sur l'harmonisation nécessaire pour une régulation soutenable est proposée.



Dans un monde de plus en plus conscient de ses propres limites et de ses effets sur l'écosystème, l'hydrogène décarboné apparaît comme une promesse quasi-messianique, capable de réconcilier industrie et environnement, économie et écologie. La France, en quête d'une souveraineté énergétique et d'une réduction significative de ses émissions de gaz à effet de serre, place de grands espoirs dans cette filière émergente. Ce nouvel or vert, dans sa pureté chimique, cache toutefois une complexité sociale, technique et réglementaire. Il s'agit, en quelque sorte, de «purifier» nos pratiques industrielles tout en veillant à ce que les infrastructures et les régulations qui encadrent cette purification ne viennent pas contaminer l'idée même de durabilité et de soutenabilité.

Pour que l'hydrogène décarboné tienne sa promesse, il ne suffit pas d'en maîtriser la technologie : il faut de même un cadre réglementaire qui soit à la fois précis et flexible, un cadre qui articule les relations entre les différents acteurs de manière cohérente et sans contradictions. Le législateur, en tant que figure centrale du réseau sociotechnique, et son écosystème ont la responsabilité de tracer un chemin où innovation, sécurité, et responsabilité sociétale ne se contredisent pas, mais se renforcent mutuellement.

### Comment le cadre réglementaire peut-il accompagner ou freiner le déploiement de la filière d'hydrogène décarboné ?

Le système réglementaire français et le cadre normatif sont conçus de manière fragmentée et sont orientés vers des objets de régulation.



Dans le cadre du déploiement de la filière d'hydrogène décarboné, plusieurs textes viennent s'articuler dont la conscience de l'ensemble n'est pas donnée aux acteurs des territoires. Parmi ces textes :

- ▶ La Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte
- ▶ Le Plan Hydrogène
- ▶ La réglementation sur la sécurité des installations industrielles
- ▶ La loi Climat et Résilience
- ▶ La responsabilité sociétale/sociétale et éthique dans le développement de l'hydrogène décarboné

### Les travaux de recherche sur le cadre réglementaire et la soutenabilité de l'hydrogène décarboné en France

Le projet **AIDHY** a pour vocation de se pencher sur la soutenabilité du cadre réglementaire dans l'accompagnement responsable au déploiement de la filière d'hydrogène décarboné. Plus largement, et de manière non limitative, la recherche en France sur la régulation de l'hydrogène décarboné témoigne d'une diversité d'approches qui, ensemble, esquissent un futur possible pour cette filière.

Ainsi, l'ADEME, par ses rapports, constitue un espace où des données multiples sont collectées, analysées et transformées en propositions politiques. Ses recommandations pour simplifier les procédures administratives et harmoniser les cadres réglementaires entre régions répondent à un besoin pressant de cohérence. Les travaux de l'ADEME soulignent également l'importance de ne pas isoler l'hydrogène des autres composantes de la transition énergétique : il doit être pensé en relation avec l'électricité renouvelable, l'efficacité énergétique, et les changements d'usages.

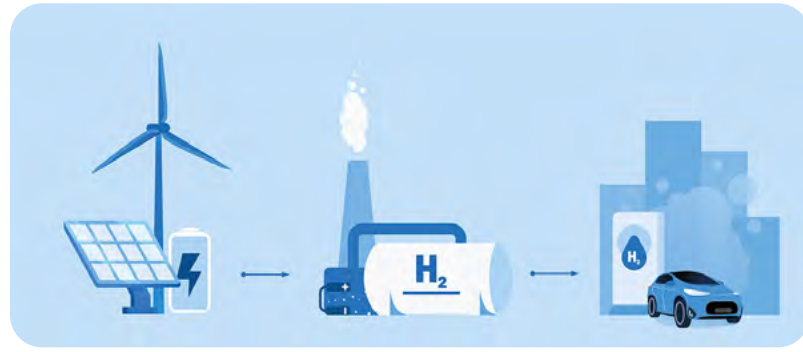
Les travaux de l'IFPEN se concentrent sur les standards techniques, nécessaires pour assurer la sécurité et la compatibilité des infrastructures hydrogène.

Ces standards sont essentiels pour stabiliser le réseau technique et permettre son expansion. Mais, comme le montrent les conclusions des recherches menées à l'IFPEN, l'absence d'un cadre normatif spécifique et cohérent crée des « zones d'ombre » où l'incertitude règne, freinant ainsi l'investissement et l'adoption des technologies hydrogène.

De nombreuses autres études académiques (ex. CNRS, Université Dauphine, Université Paris Sciences & Lettres (PSL), Université de Pau, etc.) offrent une perspective critique sur l'intégration de l'hydrogène dans le tissu sociétal. La nécessité de créer des plateformes de dialogue entre les acteurs, et d'intégrer des critères éthiques et sociaux dès les premières phases de projet, répond à une demande de transparence et de justice sociale. Ces travaux montrent aussi que l'hydrogène décarboné ne peut être considéré comme une solution technique isolée ; il doit être pensé dans un réseau de relations sociales, politiques, et environnementales complexes.

## Discussion et conclusion

En synthétisant ces différentes approches, il apparaît que le déploiement de l'hydrogène décarboné en France repose sur une articulation sensible entre innovation technologique, régulation stricte, et responsabilité sociétale. Pour que cette articulation fonctionne de manière soutenable, il est essentiel de développer un cadre réglementaire unifié, qui ne soit pas seulement un ensemble de règles contraignantes, mais un réseau de relations soutenant la soutenabilité/durabilité.



L'un des grands défis pour la France sera de naviguer entre les impératifs parfois contradictoires de rapidité et de sécurité, d'innovation et de stabilité, de local et de global. Il faudra de même que ce cadre soit suffisamment flexible pour s'adapter aux évolutions futures, tout en étant assez visionnaire pour garantir la soutenabilité des projets.

En conclusion, la régulation de la filière d'hydrogène décarboné ne doit pas être vue comme un simple obstacle à franchir, mais comme un levier de transformation.

Myriam Merad  
Coordinatrice du projet AIDHY

En complément, lire l'article [Promesses et paradoxes de l'hydrogène décarboné](#).



## LES ÉVÈNEMENTS À VENIR...

### OCTOBRE 2024

- **5 - 11 octobre - LA GRANDE-MOTTE**  
École du PEPR-H2 sur l'hydrogène décarboné réservée aux doctorants du programme  
<https://ecolehydrogenepprh2.sciencesconf.org/>
- **7 - 11 octobre - LA GRANDE-MOTTE**  
4<sup>e</sup> Réunion plénières de la Fédération HYDROGÈNE (FRH2) du CNRS  
<https://frh2.sciencesconf.org/>
- **23 - 24 octobre - HAMBURG MESSE**  
Hydrogen Technology Conference  
<https://www.hydrogen-worldexpo.com/conference-overview>

### NOVEMBRE 2024

- **6 novembre - PARIS**  
Journée valorisation du PEPR-H2  
*Participation sur invitation*
- **13 - 14 novembre - PARIS**  
Horizon Hydrogène 2024  
<https://www.horizon-hydrogene.fr/>

### DECEMBRE 2024

- **4 - 6 décembre - RABAT**  
International Conference on Green Hydrogen (ICGH)  
<https://i-cgh.com/>

### JANVIER 2025

- **28 au 30 janvier - PARIS**  
Hyvolution Paris  
<https://paris.hyvolution.com/fr>

Directeurs de la rédaction	Hélène Burllet et Abdellilah Slaoui
Comité éditorial	Hélène Burllet, Abdellilah Slaoui, Stéphanie Demaretz,
Conception et réalisation	Stéphanie Demaretz
<b>S'abonner à la newsletter du PEPR-H2</b>	
<b>Se désinscrire de la liste de diffusion de la newsletter du PEPR-H2</b>	
Crédits photos : iStock, PEPR-H2	

