



PROGRAMME  
DE RECHERCHE  
HYDROGÈNE

Newsletter  
Décembre 2023



Programme et Équipements Prioritaires  
de Recherche Hydrogène décarboné



## EDITO

Les 18 projets R&D du Programme et Équipements Prioritaires de Recherche sur l'Hydrogène (PEPR-H2), couvrant toute la chaîne de valeur, sont en très bonnes voies et certains commencent à produire des résultats originaux et prometteurs. Nous aurons l'occasion de les évoquer lors de la journée annuelle H2 Day prévue le 12 Mars 2024 à Grenoble.

Le dossier de cette lettre concerne la combustion de l'hydrogène, thème du projet MONTHY, qui pourrait être une solution intéressante pour décarboner des procédés nécessitant de très hautes températures. Il s'agit de comprendre puis de maîtriser les propriétés physico-chimiques de la combustion d'hydrogène qui sont bien différentes de celles des carburants hydrocarbonés conventionnels.

Cette lettre fait également un focus sur le projet HYperStock qui cherche à identifier pour le stockage de dihydrogène comprimé, des matériaux (métalliques ou non) adéquats en termes d'étanchéité, de tenue mécanique, de densité gravimétrique et d'impact environnemental.

Un autre focus concerne des résultats préliminaires obtenus dans le cadre de projet PEMFC95 qui ambitionne le développement de piles à combustible à membrane échangeuse de protons fonctionnant à 95 °C pour des applications dans les véhicules lourds. A plus hautes températures, le projet FLEXISOC sort des premiers résultats sur l'élaboration de matériaux céramiques utilisés comme électrolyte dans les piles à combustible de type SOFC présentant une conduction ionique à l'oxygène exceptionnellement élevée à basse température (en dessous de 700°C).

Au-delà d'accroître les connaissances, le PEPR-H2 ambitionne d'être connecté au monde industriel de la filière. A cet égard, la journée de valorisation du 24 octobre 2023 a permis un échange fructueux entre chercheurs et industriels.

De plus, pour s'intégrer dans la dynamique mondiale de la recherche sur l'hydrogène, le PEPR-H2 a mis en place des dispositifs d'aide à la mobilité entrante et sortante, les soumissions sont attendues pour le 1<sup>er</sup> février 2024.

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



### LES ACTUALITÉS DES PROJETS DU PEPR-H2

- # Des améliorations attendues pour le stockage hyperbare
- # Procédé de fabrication d'un électrolyte d'oxyapatite orienté pour les SOFC fonctionnant à basse température
- # Des PEMFC performantes pour l'application transport lourd
- # Des dispositifs d'aide à la mobilité



### LA COMBUSTION DE L'HYDROGÈNE, UNE AUTRE SOLUTION D'AVENIR POUR ATTEINDRE L'OBJECTIF D'UNE SOCIÉTÉ BAS CARBONE EN 2050



### LES ÉVÈNEMENTS À VENIR

JANVIER  
FÉVRIER  
MARS 2024

RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

Liberté  
Égalité  
Fraternité



anr®

cnrs

cea



## LES ACTUALITÉS DES PROJETS DU PEPR-H2

Ce numéro du mois de décembre, s'intéresse aux projets de recherche liés au stockage et transport de l'hydrogène et à sa conversion.

### Des améliorations attendues pour le stockage hyperbare

Le projet **HYperStock**, pour stockage et transport hyperbare de l'hydrogène, mène une analyse des solutions de stockage de dihydrogène comprimé en s'intéressant d'une part aux composants métalliques et d'autre part aux matériaux non métalliques. Les différents résultats et livrables du projet fourniront les éléments permettant de discriminer les matériaux retenus au regard d'un prisme multi objectifs d'optimisation mécanique, de densité gravimétrique, et de réduction d'impact environnemental.

#### Les axes de recherche sur les composants métalliques

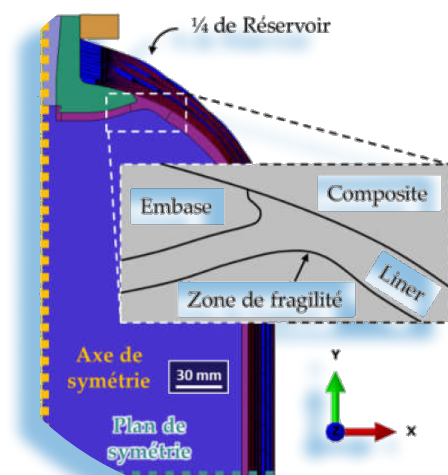
Le réservoir hyperbare de Type 4, à liner polymère, conserve une partie métallique essentielle, l'embase ; elle permet de connecter la bouteille au réseau. Cette pièce est en contact direct avec le dihydrogène, tout comme le métal de nombreux éléments de connexion ou de transport du gaz.

Aujourd'hui encore, la fragilisation par l'hydrogène est un défi majeur pour une utilisation prolongée et sécurisée de ces éléments. Les études lancées cherchent à comprendre les mécanismes mis en jeu depuis les échelles nano-microscopiques jusqu'à l'échelle macroscopique, en mettant en œuvre les modèles les plus récents. Elles traitent aussi l'équivalence possible entre chargements cathodiques et hydrogène gazeux, avancée considérable pour les campagnes de caractérisation.

En cette fin 2023, deux nouveaux doctorants sont venus renforcer les équipes déjà impliquées, les matériaux d'études ont été définis et livrés afin de collectivement établir prochainement les premières préconisations d'usage.

### Procédé de fabrication d'un électrolyte d'oxyapatite orienté pour les SOFC fonctionnant à basse température

Une coupe de réservoir de Type IV hyperbare, image issue des simulations Eléments Finis menées par le CEA



#### Concernant les composants non métalliques

Les autres éléments du réservoir sont des polymères, des élastomères et des matériaux composites. Pour ces matériaux, l'enjeu diffère par la fonction du composant et/ou par son exposition au gaz.

Pour l'enveloppe étanche (liner), mono ou multicouche, le défi est de tenir les spécifications de transfert gazeux et maîtriser les pertes de gaz. De nombreux polymères ont été envisagés pour satisfaire ce premier objectif, mais il convient également de tenir compte de la sollicitation mécanique sévère du liner et de la compatibilité avec H<sub>2</sub>, état qui induit des endommagements internes préjudiciables à la fonction.

Les équipes travaillent à établir un référentiel matériaux basé sur l'historique et sur les derniers développements, à fournir des méthodologies expérimentales et numériques d'aide à la sélection des matériaux et à établir des propositions de géométries optimisées. Une plus-value importante réside dans l'ACV du réservoir, pour la partie liner dans le cadre d'une thèse et pour le stockage complet au travers d'un contrat postdoctoral.

David Chapelle  
Coordinateur du projet HYperStock

Les récents travaux menés à l'IRCER (Institut de recherche sur les céramiques, CNRS - Université de Limoges), dans le cadre du projet **FLEXISOC**, ont bénéficié de résultats antérieurs obtenus sur un nouveau procédé de mise en forme en vue d'obtenir un matériau texturé d'oxyapatite (La<sub>9,33+x/3</sub>(SiO<sub>4/6</sub>O<sub>2+x/2</sub>)).

Ces matériaux présentent une conduction ionique à l'oxygène exceptionnellement élevée à basse température. Utilisés comme électrolyte dans les piles à combustible de type SOFC (Solid Oxide Fuel Cell), ces matériaux permettraient d'abaisser très significativement leurs températures de fonctionnement en dessous de 700°C.



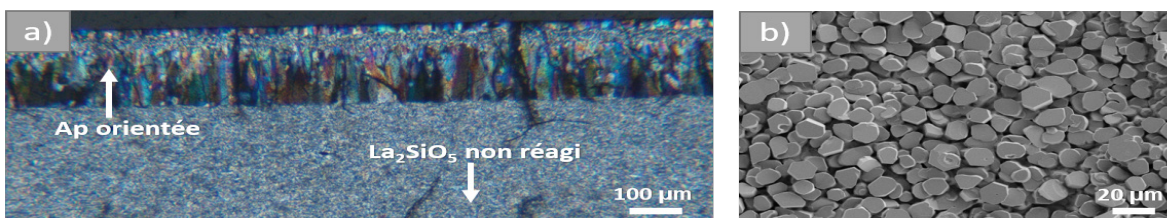


Figure 1. a) Micrographie optique en lumière polarisée du produit de réaction formé par la diffusion entre  $\text{La}_2\text{SiO}_5 / \text{SiO}_2$  après frittage réactif à  $1600^\circ\text{C}/10\text{h}$ . b) Cristaux d'oxyapatite orientés. © IRCER

## Un procédé issu d'une compréhension approfondie des mécanismes de croissance des cristaux d'apatite

Le procédé développé à l'IRCER repose sur un frittage réactif à haute température entre des couches alternées de précurseurs :  $\text{La}_2\text{SiO}_5$  et  $\text{SiO}_2$  qui sont mises en forme par coulage en bande et assemblées par thermo-compression. Des couches d'oxyapatite (Ap) hautement orientées de plus de  $100\ \mu\text{m}$  ont été obtenues (Figure 1 a) et b)). Le développement de ce procédé est le fruit de nombreuses années de recherche qui ont permis de mieux cerner et contrôler les mécanismes réactionnels mis en jeu dans la formation de cristaux d'oxyapatite orientés [1-2].

En particulier, ces travaux montrent que les mécanismes de germination et croissance des cristaux d'apatite sont conditionnés par l'apparition d'une phase liquide à l'interface  $\text{La}_2\text{SiO}_5 / \text{SiO}_2$  (sur les grains de silice), et la précipitation d'une couche intermédiaire de  $\text{La}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ , qui est le support à la croissance des cristaux d'apatite orientés.

## Applications potentielles des matériaux texturés

Les architectures obtenues par ce procédé de frittage réactif peuvent être exploitées pour la fabrication en une seule étape de demi-cellule de piles à combustible de type SOFC.

La figure 2 montre une telle architecture constituée d'une couche très dense d'apatite orientée, correspondant à la couche de l'électrolyte, et d'une couche poreuse également d'apatite, mais non orientée, correspondant à l'anode support. Cette dernière couche devra être infiltrée par une source de nickel pour obtenir une conduction mixte ionique et électronique.

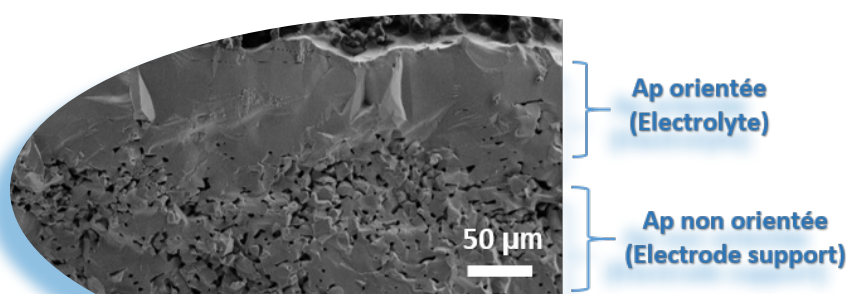


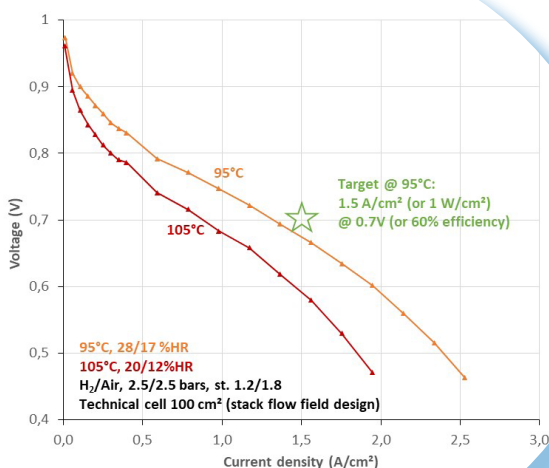
Figure 2. Micrographie MEB de la section transversale de la fracture du bicouche  $\text{La}_2\text{SiO}_5 / \text{SiO}_2$  après frittage réactif à  $1600^\circ\text{C}/10\text{h}$ . © IRCER

[1] <https://hal.science/hal-04266023>

[2] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884220320265>

L. Arbelaez, A. Aimable, E. Bechade, PM Geffroy  
IRCER\_ Laboratoire du projet FLEXISOC

## Des PEMFC performantes pour l'application transport lourd



Courbes de polarisation à 95 et  $105^\circ\text{C}$  en monocellule  $100\ \text{cm}^2$  d'un Assemblage Membrane Electrodes de pile à combustible de PEMFC destiné à l'application transport lourd, développé dans le cadre du projet PEMFC95 © CEA-LITEN

L'intégration des piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) dans les applications de transport lourd requiert une élévation de leur température de fonctionnement nominale de  $80$  à  $95^\circ\text{C}$ . Cette augmentation vise à faciliter la gestion thermique du système, avec pour objectif ultime d'améliorer sa compacité.

Dans ce contexte, le développement d'électrodes plus résistantes devient impératif pour faire face aux conditions de fonctionnement plus sévères, pour lesquelles les phénomènes limitant les performances et la durabilité sont accentués.

Dans le cadre du projet PEMFC95, le CEA-LITEN développe des électrodes composites poreuses constituées d'un catalyseur accélérant les cinétiques de réaction, lié par le polymère conducteur protonique.

## Une optimisation de la structure et de la composition des cœurs de pile

Le CEA-LITEN a travaillé sur la composition du cœur de pile, appelé Assemblage Membrane Electrodes (AME), avec des composants commerciaux et, en particulier, de l'électrode afin d'obtenir des performances optimales dans une large gamme de conditions opératoires, qu'elles soient humides pour permettre le démarrage de la pile ou sèches comme en conditions nominales.

La composition offrant le meilleur compromis a été sélectionnée pour fabriquer des cœurs de pile de 100 cm<sup>2</sup> qui ont été testés dans une monocellule avec un design représentatif des piles de puissance.

## Pour des performances au meilleur état de l'art

Des essais ont été réalisés dans des conditions compatibles avec les contraintes systèmes, non seulement à la température de fonctionnement nominale visée de 95°C mais également dans des conditions plus extrêmes à 105°C qui peuvent être rencontrées temporairement.

Les performances obtenues sont au meilleur état de l'art et se rapprochent des objectifs du projet. Fort de cette expérience nous allons maintenant intégrer les nouveaux composants développés par les partenaires (membrane, catalyseurs et GDL) de façon à accroître les performances et améliorer la durabilité de la pile.

A. Morin, C. Nayoze-Coyne, T. Cavoue, L. Flores, A. Fabulet  
CEA-LITEN\_ Laboratoire du projet PEMFC95

## Des dispositifs d'aide à la mobilité

La collaboration internationale est essentielle pour faire avancer rapidement les recherches dans des domaines clés de l'énergie du futur, avec comme finalité la neutralité carbone en 2050. L'hydrogène, comme vecteur d'énergie, permettra d'avancer dans cette direction. Pour poursuivre cet objectif, le PEPR-H2 a mis en place des dispositifs d'aide à la mobilité. Le financement peut être demandé pour deux types de mobilités : la mobilité entrante (accueil de

chercheurs étrangers de renom dans nos structures) et la mobilité sortante qui concernent des séjours courts de doctorants ou jeunes chercheuses ou chercheurs permanents dans des laboratoires étrangers.

L'objectif est de faire avancer les connaissances fondamentales et technologiques dans les thématiques principales du PEPR-H2 décarboné (production, stockage, usage, systèmes, aspects socio-économiques) en croisant les idées et les expériences.

Les soumissions sont attendues pour le 1<sup>er</sup> février 2024.

Pour candidater : [contact@pepr-hydrogene.fr](mailto:contact@pepr-hydrogene.fr)

### EN BREF

#### 3<sup>e</sup> Rencontres académie-industrie du CNC

Le PEPR-H2 a participé activement à la journée « 3<sup>e</sup> Rencontres académie-industrie » organisée le 7 décembre 2023 par le Comité National de la Chimie et consacrée à « l'Hydrogène vecteur énergétique et réactif chimique ». La feuille de route du PEPR et des premiers résultats y ont été présentés (voir les présentations [ici](#)).

#### Marc Robert, un des chimistes «les plus cités» dans le monde

Le chimiste [Marc Robert](#) porteur du projet [GREENH3](#) (qui vise la conversion photoélectrochimique directe d'azote atmosphérique en ammoniac), au sein du PEPR-H2, a fait son entrée dans la liste des «chercheurs les plus cités» en chimie dans le monde selon Clarivate. A cette occasion, il répond aux questions de CNRS Chimie.

#### Des chercheurs récompensés pour leurs travaux

[Nadia Yousfi Steiner](#) a été récompensée de la médaille Blondel 2023, lors de la cérémonie des Grands Prix de la SEE, pour ses travaux sur la résilience des systèmes piles à combustible et hydrogène.

#### Journée valorisation du PEPR-H2

Le 24 octobre s'est tenue à Paris, la première journée organisée par le PEPR-H2 réunissant les chercheurs et les industriels de la filière hydrogène.

Les participants répartis dans six ateliers thématiques d'une quinzaine de personnes chacun, ont identifié des pistes de recherche à amplifier.



Présentation de Christophe Coutanceau lors de la journée valorisation du PEPR-H2  
© PEPR-H2



Mme Nadia Yousfi Steiner reçoit la médaille Blondel 2023

© SEE - Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication





## LA COMBUSTION DE L'HYDROGÈNE, UNE AUTRE SOLUTION D'AVENIR POUR ATTEINDRE L'OBJECTIF D'UNE SOCIÉTÉ BAS CARBONE EN 2050

L'hydrogène est un combustible zéro-carbone qui permet de décarboner tout procédé nécessitant de très hautes températures. Cependant la combustion de l'hydrogène constitue un défi majeur car ses propriétés physico-chimiques sont très différentes de celles des carburants hydrocarbonés conventionnels.

### La combustion hydrogène, un secteur en expansion

Plus de 80% de l'énergie primaire dans le monde est actuellement obtenue par la combustion majoritairement de combustibles d'origine fossile (pétrole et ses dérivés, gaz, charbon). Utilisée dans la production d'électricité, les transports, le chauffage et l'industrie manufacturière, elle est responsable en France de 70% des émissions de gaz à effet de serre. L'hydrogène, considérée comme la molécule stockeuse d'énergie la plus prometteuse, est aussi un combustible zéro-carbone, qui permet de décarboner les systèmes basés sur la conversion thermique. Toutefois, cet objectif ambitieux pose de grands défis scientifiques au niveau de la combustion. En effet, les propriétés chimiques et physiques de  $H_2$  sont très différentes de celles des carburants hydrocarbonés conventionnels.

Ainsi de nombreuses questions doivent trouver des réponses comme, par exemple celles concernant la stabilisation de flamme, les échanges thermiques aux parois, les émissions de  $NO_x$ , l'effet de pression, la capacité de stockage, l'auto-inflammation et la sécurité. A l'heure actuelle les connaissances théoriques ou les modèles prédictifs doivent progresser afin de permettre le développement d'outils de simulation pour concevoir des systèmes de conversion d'énergie performants, flexibles et non polluants. Face à cette ambition, de nombreux projets de recherche académiques et industriels voient le jour en France et à l'étranger. Nous en citons quatre emblématiques dans ce dossier.

### Une communauté nationale très active en combustion de l'hydrogène

Le dynamisme de la recherche autour de la combustion de  $H_2$  s'est manifesté lors de la Journée Combustion Hydrogène, organisée par le Groupement Français de Combustion (avec le soutien du Labex CAPRYSSSES), le 19 octobre 2023 à l'Université d'Orléans.

Cette journée a réuni plus de cent personnes du secteur académique et de l'industrie. Une trentaine de travaux ont été présentés, avec deux conférences invitées au cours desquelles Thierry Schuller (Prof., IMFT) a présenté les progrès récents et les challenges de la



Photographie d'une flamme hydrogène-air stabilisée au-dessus d'un injecteur coaxial à double vrille du laboratoire EM2C-CNRS.  
© Maxime Leroy and Cecile Oriot - CentraleSupélec

combustion de  $H_2$ , en particulier dans les brûleurs industriels et Benoît Fiorina (Prof., EM2C) les défis de la modélisation de la combustion turbulente associée à l'introduction de  $H_2$  dans les systèmes réactifs.

### La combustion hydrogène au sein du PEPR-H2

La conception des chambres de combustion à hydrogène de demain doit répondre aux exigences environnementales en particulier au niveau des émissions de  $NO_x$ . Le projet MONTHY, soutenu par le PEPR- $H_2$ , vise à mieux comprendre et modéliser la formation des  $NO_x$  dans les flammes turbulentes de  $H_2$  et à identifier des solutions permettant de les réduire, notamment par l'effet de l'ajout d'eau.

Parmi les verrous à lever, la contribution respective des voies réactionnelles impliquées dans la formation de  $NO$ , notamment  $NNH + O = NH + NO$ , sera clarifiée. Par ailleurs, un formalisme de combustion turbulente compatible avec une grande variabilité du nombre de Damköhler rencontrée lors de la chimie des  $NO_x$  dans des flammes  $H_2$  sera établi. Un schéma cinétique d'oxydation de  $H_2$  incluant la chimie des  $NO_x$  ainsi qu'un code de simulation aux grandes échelles pour la



Assemblée présente lors de la journée Combustion Hydrogène (photo publique)



prédiction des  $\text{NO}_x$  lors de la combustion de  $\text{H}_2$  en flammes turbulentes seront fournis, tout en favorisant un transfert rapide vers les entreprises via le développement d'outils de calcul haute performance (HPC). Les résultats de MONTHY pourront être valorisés dans d'autres projets France 2030 (SNA décarbonation de l'industrie) et contribuer au déploiement de cette technologie.

### Projet ERC Advanced «SELECT-H», porté par Thierry Schuller professeur à l'IMFT

Le projet SELECT-H de l'IMFT vise à favoriser le développement de technologies permettant de brûler  $\text{H}_2$  de manière sûre et fiable. La réactivité élevée de  $\text{H}_2$  pose des problèmes de sécurité lors de fuites qui peuvent facilement s'enflammer voire mener à des explosions. Dans les foyers opérant avec des combustibles conventionnels, les remplacer par  $\text{H}_2$  peut mener à des allumages violents, des retours de flammes dans les injecteurs, mais aussi des augmentations substantielles du niveau de bruit favorisant également le déclenchement d'instabilités de combustion. SELECT-H vise à développer la nouvelle génération d'outils permettant de simuler ces phénomènes pour guider la conception des brûleurs à  $\text{H}_2$ .

### Projet ERC «Synergy HYROPE», co-porté par Laurent Selle, directeur de recherche CNRS à l'IMFT

Le projet HYROPE «Hydrogen under pressure» propose de combiner les compétences fondamentales uniques de quatre laboratoires européens pour réaliser des expériences à pression atmosphérique et à haute pression, associées à des simulations très performantes d'un concept innovant de turbines à gaz brûlant des carburants sans carbone à base de  $\text{H}_2$ .

HYROPE étudiera les effets de la pression sur la combustion des combustibles à base de  $\text{H}_2$  dans le cadre d'une approche étagée de combustion, où la première étape est contrôlée par la propagation de la flamme et la seconde par l'auto-inflammation.

### L'hydrogène pour un transport aérien décarboné : le projet européen HESTIA coordonné par Safran Tech (Nicholas Treleven et Stéphan Zurbach)

L'un des enjeux de la mise en œuvre de  $\text{H}_2$  en tant que combustible dans des turboréacteurs est la conception d'une chambre à combustion peu émettrice de  $\text{NO}_x$ . Le projet HESTIA «Hydrogen Combustion in aero engines», regroupant dix-huit universités et centres de recherche ainsi que six constructeurs de moteurs aéronautiques européens, s'inscrit dans cette démarche (huit organismes français impliqués). Trois objectifs ont été fixés : améliorer la compréhension de la combustion  $\text{H}_2$ /air par une démarche expérimentale et de simulation ; développer des méthodes de conception avancées pour l'optimisation de chambre de combustion à bas  $\text{NO}_x$  ; évaluer différentes technologies d'injecteur dans le but d'identifier les concepts les plus performants à tester lors de futurs essais.

<sup>1</sup> source : [www.notre-environnement.gouv.fr](http://www.notre-environnement.gouv.fr)

<sup>2</sup> initiée par Pascale Desgroux (PC2A, projet MONTHY) et Fabrice Foucher (PRISME, porteur de la Chaire Industrielle ANR DELhyce)

<sup>3</sup> <https://cordis.europa.eu/project/id/101056865/fr>

Pascale Desgroux  
Coordinatrice du projet MONTHY  
Christine Rousselle  
Professeure à Polytech Orléans



## LES ÉVÈNEMENTS À VENIR...

### JANVIER 2024

- **30 janvier - 1<sup>er</sup> février - PARIS**  
Le PEPR-H2 sera présent à Hyvolution  
<https://paris.hyvolution.com/fr>
- **19 janvier (clôture)**  
Participez à la consultation sur la nouvelle stratégie française pour le déploiement de l'hydrogène décarboné  
<https://www.ecologie.gouv.fr/consultation-sur-nouvelle-strategie-francaise-deploiement-lhydrogene-decarbore>

### FÉVRIER 2024

- **07 - 08 février - CAEN**  
Journée annuelle de l'Association Française de l'Adsorption (AFA)  
<https://www.adsorption.fr/>

### MARS 2024

- **12 mars - GRENOBLE**  
PEPR-H2 DAY  
*participation sur invitation*
- **27 - 28 mars - PARIS**  
Colloque du CNRS sur les PFAS  
*lien à venir*

|  |   |
|--|---|
| Directeurs de la rédaction   | Hélène Burllet et Abdellilah Slaoui                     |
| Comité éditorial   | Hélène Burllet, Abdellilah Slaoui<br>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, CNRS Images                              |   |

