



Programme et Équipements Prioritaires  
de Recherche Hydrogène décarboné



## EDITO

Prioritaires de Recherche sur l'hydrogène décarboné est heureux de partager des informations et des avancées obtenues dans le cadre de ses projets. Depuis ses débuts le programme a produit plus de 100 articles publiés dans des revues à fort impact et 18 mémoires de thèses. Deux chapitres de livre impliquant plusieurs membres du programme complètent cette production scientifique conséquente. Côté transfert, trois projets de prématuration exploitant des résultats issus du PEPR ont obtenu des financements amorçant le cycle de valorisation du programme.

Le dossier de ce numéro est consacré aux méthodes de stockage de l'hydrogène en cours d'investigation dans le PEPR-H2 et qui ont servi à la rédaction de plusieurs chapitres d'un livre récemment paru dans ce domaine.

Comme à l'habitude, la lettre fait le focus sur quelques résultats marquants issus de projets. La recherche de performances améliorées des électrolyseurs PEM a conduit le projet **COSTO** à développer des revêtements pour protéger

Le Programme  
et Equipements

des plaques bipolaires en acier inoxydable et a poussé le projet **MATHYLDE** à mener des études expérimentales ex situ sur l'écoulement diphasique dans les couches poreuses de transport des charges en ayant recours à la technique d'imagerie par résonance magnétique pour quantifier leur saturation en eau.

Côté pile à combustible, des études réalisées dans le projet **PEMFC95** sur les couches actives peu chargées en Pt/C ont montré une moindre performance de celles-ci par rapport aux couches conventionnelles, en raison des limitations accrues par le transport de matière. Concernant le stockage, les investigations menées dans le projet **SOLHYD** sur les alliages à haute entropie ont permis d'identifier un alliage particulièrement prometteur en termes de capacité massique.

Enfin, notez dans vos agendas la cinquième édition du PEPR-H2 days prévue les 10-11 mars 2026 à Bordeaux, à laquelle nous espérons vous voir nombreux.

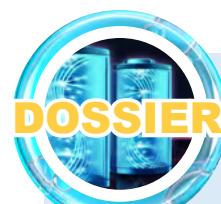
Nous vous souhaitons nos meilleurs voeux pour 2026 !

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



### LES ACTUALITÉS DES PROJETS DU PEPR-H2

- # Des plaques bipolaires en acier revêtu pour l'électrolyseur PEM
- # Étude expérimentale du mécanisme d'invasion dans une PTL d'électrolyseur PEM
- # Couches actives cathodiques de PEMFC faiblement chargées en platine
- # Les alliages à haute entropie, des matériaux prometteurs pour le stockage solide de l'hydrogène



### STOCKAGE DE L'HYDROGÈNE : UN LARGE ÉVENTAIL DE SOLUTIONS



### LES ÉVÈNEMENTS À VENIR

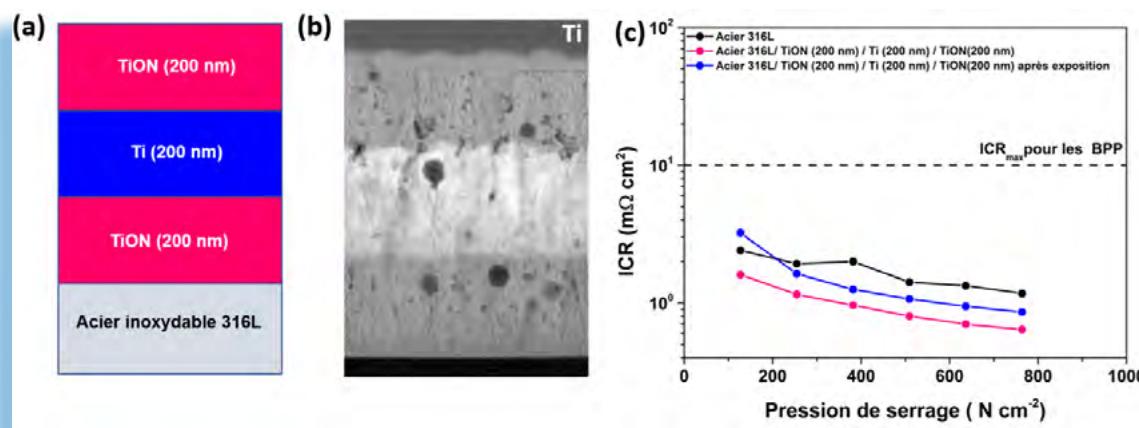
**JANVIER**  
**FÉVRIER**  
**MARS 2026**

## Des plaques bipolaires en acier revêtu pour l'électrolyseur PEM

La transition énergétique impose de décarboner les usages industriels et d'accélérer la production d'hydrogène bas carbone. L'électrolyseur à membrane échangeuse de protons (PEMWE) est une technologie clé contribuant à cet objectif, mais son coût reste élevé.

## Substituer le titane revêtu de métaux nobles

Les plaques bipolaires (BPP), en titane revêtu de métaux nobles, peuvent représenter jusqu'à 50 % du coût du stack. Une alternative consiste à utiliser l'acier inoxydable 316L, plus économique et facile à usiner. Toutefois, ce matériau se dissout ou se corrode dans les conditions représentatives du fonctionnement des BPP dans le compartiment anodique, ce qui nuit à la durabilité de l'électrolyseur PEM. Dans ce contexte, nous avons développé, dans le cadre du projet COSTO, des revêtements à base de TiON déposés par pulvérisation cathodique. Ces structures visent à former une barrière dense, résistante à la corrosion, tout en assurant une bonne conductivité électrique traduite par une faible valeur de la résistance interfaciale de contact (ICR < 10 mΩ cm<sup>2</sup>).



## Stabilité chimique et optimisation des performances électriques

La stabilité chimique des revêtements à base de TiON, élaborés selon différentes architectures, en couche simple et en multicouche, a été évaluée dans les conditions optimales de fonctionnement des électrolyseurs PEM, ainsi que dans des conditions dégradées à plus faible pH et polarisation anodique [1]. Parmi toutes les structures testées, seul le revêtement multicouche TiON/Ti/TiON garantit une bonne stabilité et une faible valeur de l'ICR. La stabilité du revêtement schématisé sur la figure (a) est attribuée à sa structure dense et homogène révélée par les micrographies HAADF STEM en coupe transversale - figure (b). La figure (c) montre une valeur de l'ICR très faible de l'ordre de 1,5 mΩ cm<sup>2</sup>. Cette valeur reste constante après le test de stabilité et se situe en dessous de la valeur de l'ICR de l'acier et en dessous du critère d'acceptabilité. Des études supplémentaires corroborent cette faible valeur de l'ICR à une réduction de la dureté

Khaoula Chergui  
Lab-STICC

(Bretagne INP / ENSTA / IMT Atlantique / Univ Bretagne / CNRS)

## Références :

- [1] Chergui K, Lescop B, Prestat M, Ringot G, Vucko F, Demange V, et al. Protective TiO<sub>x</sub>Ny-based multilayer coatings for 316L stainless steel bipolar plates in a PEM water electrolyzer. International Journal of Hydrogen Energy 2025; 178:151650.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.151650>

## Etude expérimentale du mécanisme d'invasion dans une PTL d'électrolyseur PEM

Dans le cadre du projet MATHYLDE, une étude expérimentale ex situ de l'écoulement diphasique dans la PTL (Porous Transport Layer) d'un électrolyseur PEM a été réalisée.

## Imagerie par résonance magnétique (IRM)

La technique d'imagerie par résonance magnétique (IRM) est utilisée pour quantifier la saturation en eau dans la couche poreuse durant une expérience de drainage, pour différents débits d'oxygène et d'eau. Comme la véritable PTL en titane est paramagnétique et ne peut donc pas être utilisée en IRM, des filtres en borosilicate présentant une épaisseur, une porosité et une taille de pores similaires à celles de la PTL ont été employés pour les expériences. Les mesures IRM permettent d'obtenir une carte bidimensionnelle de la saturation en eau au sein du matériau poreux, qui peut ensuite être moyennée afin de produire des profils de saturation dans la direction d'écoulement du gaz.

## Mécanisme d'invasion du gaz

La dépendance du profil de saturation aux propriétés de l'échantillon et aux débits d'eau et de gaz est analysée afin de mieux comprendre le mode d'invasion de l'oxygène dans de tels matériaux poreux. Les mesures IRM ont révélé que la saturation en eau présente un comportement quasi indépendant vis-à-vis du débit d'oxygène gazeux dans la plage considérée dans cette étude, pour laquelle les forces capillaires dominent les forces visqueuses durant le processus d'invasion. Une fois qu'un état stable a été atteint, les variations du débit de gaz ont un impact minimal sur le profil global de saturation en eau, indiquant que la répartition de l'eau dans le milieu poreux reste inchangée sous différentes conditions d'écoulement de gaz. Le niveau

moyen de saturation dépend toutefois fortement de la microstructure du matériau poreux : un matériau présentant des pores plus larges retient une quantité d'eau plus importante. Par ailleurs, une accumulation de gaz a été observée à l'interface entre le milieu poreux et le canal, avec un effet plus marqué pour des débits de gaz plus élevés. En revanche, du côté de l'électrode (interface d'injection du gaz), la saturation en eau présente une variation spatiale linéaire.

Ces résultats ont été publiés dans la référence [1]

Tien-Dung LE

LEMTA (CNRS / Univ Lorraine)

[1] <https://doi.org/10.1007/s11242-025-02152-w>

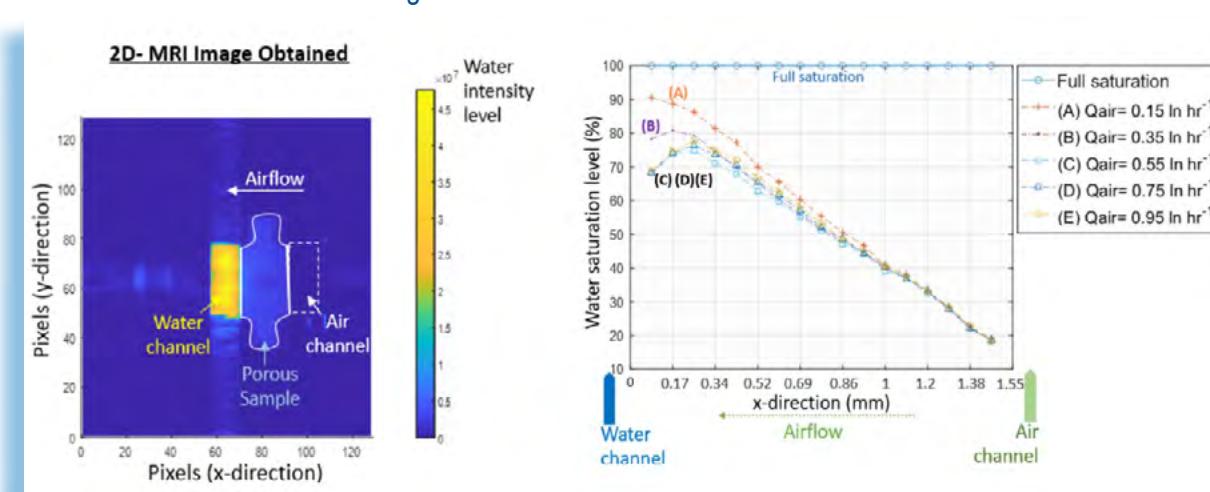


Figure : left ) Water intensity map obtained from MRI measurement during gas invasion process  
right) Normalized water intensity profiles in the x-direction during gas infusion for B10;  $Q_w = 2 \text{ ml min}^{-1}$  [ref 1] © LEMTA

## Couches actives cathodiques de PEMFC faiblement chargées en platine

Le projet **PEMFC95** a pour objectif de concevoir, fabriquer et valider des PEMFC capables de fonctionner durablement à 95°C (objectif principal), tout en ayant moins recours aux métaux de la famille du platine (objectif secondaire). Cet objectif secondaire est actuellement poursuivi par l'ensemble de la communauté scientifique car les défis y sont nombreux. En effet, les couches actives cathodiques faiblement chargées (< 200  $\mu\text{gPt/cm}^2$ ) sont en général beaucoup moins performantes que les couches actives usuelles et leur durabilité est incertaine. Certains acteurs du projet PEMFC95 (le LEPMI, le LEMTA et le CEA-LITEN) ont particulièrement étudié de telles couches actives peu chargées, en utilisant des composants (catalyseurs, membranes, couches de diffusion) commerciaux ; ces couches actives (à base Pt/C) ont également été modélisées, notamment pour prendre en compte les dégradations réversibles des performances,

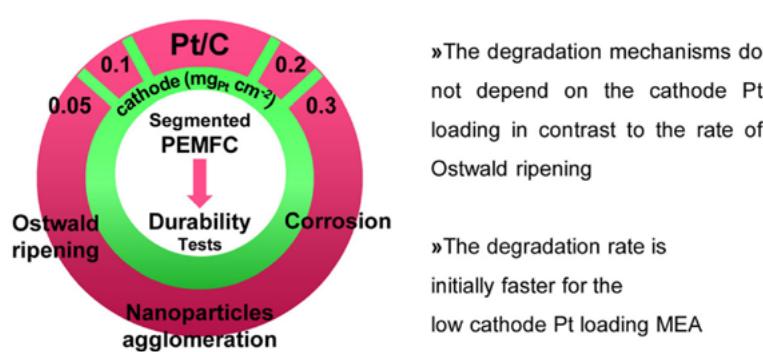
en partie liées à la formation/réduction des oxydes de platine à haut potentiel. Les résultats montrent que les couches actives cathodiques faiblement chargées en Pt/C sont moins performantes que les couches actives conventionnelles, notamment parce qu'elles impliquent des limitations accrues par le transport de matière, à la fois pour les protons et les molécules de dioxygène.

## Des mécanismes de dégradation inchangés mais à la dynamique différente

Par ailleurs, nous avons cherché à comprendre comment ces couches actives cathodiques faiblement chargées se comportent lors de tests de dégradation accélérée. Il ressort de ces tests, réalisés pour des chargements entre 0,05 et 0,3  $\text{mgPt/cm}^2$  (figure), que les couches actives faiblement chargées subissent les mêmes mécanismes de dégradation que les couches plus chargées de composition équivalente, mais que la dynamique de dégradation est différente, c'est-à-dire plus rapide initialement pour les couches peu chargées.

Fabrice Micoud, CEA-Liten

Marian Chatenet, LEPMI (CNRS / UGA / Univ Savoie Mont Blanc)



### Références :

- [1] <https://www.scipen.com/article/10.1039/d3im00059a>
- [2] *Electrochim. Acta*, 2025, 511, pp.145364.  
([10.1016/j.electacta.2024.145364](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.145364))
- [3] *Electrochim. Acta*, 2025, 535, pp.146542.  
([10.1016/j.electacta.2025.146542](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2025.146542))
- [4] *Ind. Chem. Mater.*, 2023, 1, pp. 501. ([10.1039/d3im00059a](https://doi.org/10.1039/d3im00059a))

Figure : Mécanismes de dégradation en fonction de la teneur de platine [1]  
© LEPMI / LEMTA / CEA-LITEN

## Les alliages à haute entropie, des matériaux prometteurs pour le stockage solide de l'hydrogène

Les alliages à haute entropie représentent une nouvelle classe des matériaux pour le stockage solide de  $H_2$ , avec une émergence récente il y a une dizaine d'années. Les travaux de recherche menés en France sur cette thématique ont récemment reçu une reconnaissance internationale, comme en attestent deux articles de revue publiés en 2025. (<https://doi.org/10.1002/ids.2.12216>, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115903>). Dans le cadre du projet SOLHYD du PEPR-Hydrogène décarboné, des recherches sont en cours sur ces alliages avec des résultats prometteurs détaillés ci-dessous.

### Étude en trois parties basée sur apprentissage automatique, validations expérimentale et théorique

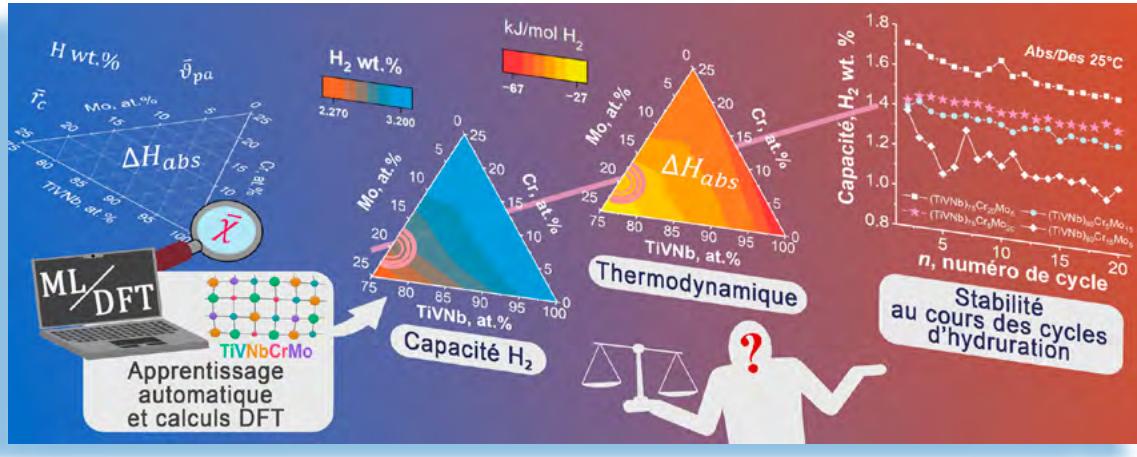
Dans ce projet, nous avons mené une étude sur des alliages à haute entropie dans l'espace compositionnel  $(TiNb)_{100-x}(Cr,Mo)_x$  combinant apprentissage automatique, calculs basés sur la théorie quantique et expériences de laboratoire et aux grands instruments. Tout d'abord, l'apprentissage automatique basé sur une base de données prédit que l'augmentation de la

teneur en Mo dans cette série change favorablement l'enthalpie de formation des phases hydrures. Ceci permet l'utilisation de ces alliages à température ambiante. Ensuite, une validation expérimentale confirmée par la «théorie de la fonctionnelle de la densité» a été effectuée. Les alliages ainsi préparés sont des matériaux cristallins monophasés de type cubique centré et absorbent rapidement l'hydrogène pour former des hydrures de type cubique faces centrées avec une capacité très élevée comprise entre 2,27 et 3,2 % en poids.

Les expériences de cyclage d'absorption et désorption à l'ambiante soulignent la nécessité de trouver un compromis entre la capacité réversible, la durée de vie et la stabilité cristalline de ces phases. Compte tenu de tous ces résultats, l'alliage le plus prometteur en termes de propriétés a été identifié comme étant  $(TiNb)_{75}Cr_5Mo_{20}$ , avec une capacité maximale de 2,6 % en poids, une enthalpie raisonnable de formation de l'hydrure (-38,6 kJ/mol  $H_2$ ) et une capacité réversible gravimétrique notable de 1,42 % en poids à température ambiante.

En conclusion, pour identifier les alliages à haute entropie les plus prometteurs pour le stockage solide de  $H_2$ , les prédictions issues de l'apprentissage automatique, suivies de validation expérimentale et la confirmation par calculs théoriques ab initio, se sont avérées être une stratégie efficace (<https://doi.org/10.1021/acsami.5c08574>).

Claudia Zlotea et Andrei Agafonov  
ICMPE (CNRS / UPEC)



© ICMPE

### EN BREF

#### La production scientifique du PEPR-H2

Une production scientifique conséquente : avec plus de 100 articles dans des revues, 2 chapitres de livre, et 18 thèses soutenues, les projets du PEPR contribuent activement à la connaissance des technologies hydrogène. Trois projets de prématuration exploitant des résultats issus du PEPR ont obtenu des financements amorçant le cycle de valorisation du programme.

#### Workshop Hydrogène du CETIM

Le PEPR-H2 a été mis à l'honneur à l'occasion du Workshop technique sur l' $H_2$  organisé par le CETIM, le 11 décembre 2025 à Nantes, à travers les exposés d'Hélène Burlet (CEA), Olivier Joubert (IMN) et Marie-Hélène Klopffer (IFPEN).



#### Séminaire IA au service de l'hydrogène

Le séminaire IA au service de l'hydrogène a rassemblé une soixantaine de participants sur deux jours à Paris. Chercheurs et industriels ont partagé leurs expériences dans ce domaine.



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



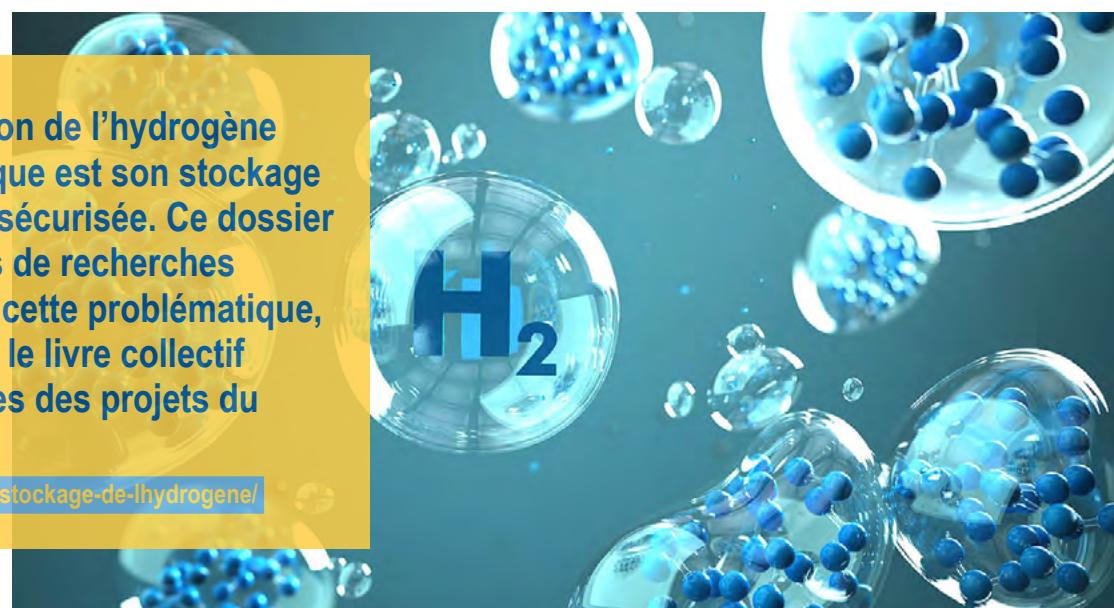
Newsletter  
Janvier 2026



## STOCKAGE DE L'HYDROGÈNE : UN LARGE ÉVENTAIL DE SOLUTIONS

Un des défis de l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique est son stockage sous forme compacte et sécurisée. Ce dossier donne les grandes lignes de recherches menées pour répondre à cette problématique, et qui sont reprises dans le livre collectif auquel plusieurs membres des projets du PEPR-H2 ont contribué :

<https://www.istegroup.com/fr/produit/stockage-de-lhydrogogene/>



### Stockage hyperbare

Le stockage sous forme de gaz comprimé, pour des pressions de quelques centaines de bar, est la solution la plus mature pour le stockage de l'hydrogène. Pour bien prendre la mesure des défis que représentent une telle solution, il convient de présenter les fondamentaux concernant l'hydrogène et la mécanique d'une structure sous pression. Ceci établi, il est possible de se focaliser sur les techniques les plus récentes de modélisation et de simulation et enfin d'aborder les procédés employés et les perspectives d'amélioration des réservoirs renforcés par matériaux composites. Voir projet [HYPERSTOCK](#).



Machine robotisée d'enroulement filamentaire pour la fabrication de composites autour d'un liner polymère © CEA

sur le développement des catalyseurs, afin de limiter l'emploi de métaux nobles tout en permettant un grand nombre de cycles hydrogénations/déshydrogénations. Voir projet [BHYOLOHC](#).

### Stockage liquide : ammoniac

La conversion de l'hydrogène en ammoniac représente une alternative aux méthodes cryogéniques ou sous haute pression pour le stocker et le distribuer à grande échelle. Facilement liquéfié, l'ammoniac bénéficie déjà d'un réseau de transport mondialisé. Cela nécessite cependant de repenser le procédé Haber-Bosch de production actuelle en petites unités modulaires adaptées aux énergies renouvelables et fonctionnant en conditions modérées. Deux stratégies parallèles sont étudiées : la découverte de matériaux catalytiques innovants capables d'activer le diazote de l'air à plus basse température que les catalyseurs industriels classiques ; le développement de procédés alternatifs de synthèse thermo- ou électrochimiques. La récupération de l'hydrogène en fin de chaîne de distribution nécessite une étape de décomposition de l'ammoniac qui fait également l'objet de travaux de recherche innovants. Voir projet [GREENH3](#).

### Stockage solide : alliages à haute entropie

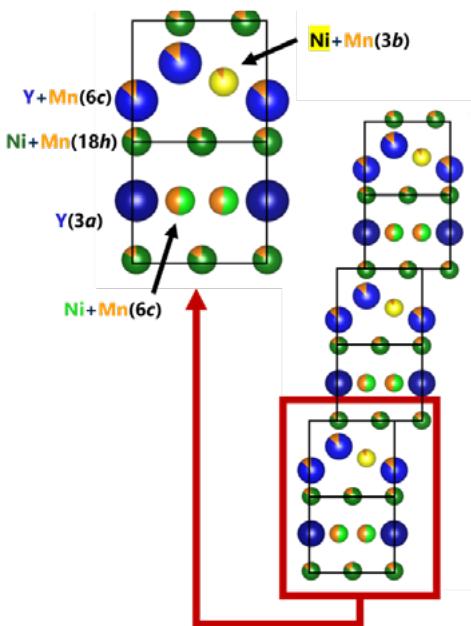
Les alliages à haute entropie (High Entropy Alloys - HEA) sont composés d'au moins 5 éléments introduits dans des proportions quasi-équimolaires. Leur potentiel pour le stockage de l'hydrogène n'a été découvert que récemment et ouvre la voie à l'exploration d'un vaste champ compositionnel. Une compréhension détaillée des relations structure-propriétés dans ces alliages est difficile en raison de l'interaction complexe des différents paramètres physico-chimiques et de la grande diversité des compositions possibles. Par conséquent, des modèles d'apprentissage automatique corroborés par des calculs de la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT) ont été proposés pour cibler avec succès les compositions présentant des propriétés de stockage optimisées. Ce nouvel axe de recherche laisse entrevoir des découvertes qui permettront l'utilisation de ces matériaux dans des applications concrètes de stockage de l'hydrogène. Voir projet [SOLHYD](#)

### Stockage liquide : LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carriers)

Le stockage d'hydrogène dans les liquides organiques (LOHC) est une option basée sur la réversibilité des réactions catalytiques d'hydrogénation et déshydrogénation de certains composés organiques. Cette méthode présente un avantage de sécurité et est adaptée au stockage longue durée et au transport longue distance de l'hydrogène. Parmi les LOHC étudiés, figurent des molécules aromatiques, des hétérocycles azotés mais aussi des composés oxygénés. La capacité de stockage peut dépasser les 7% massique dans certains cas. De nombreuses recherches se focalisent



## Stockage solide : composés intermétalliques et matériaux à base de magnésium



Les hydrures métalliques sont utilisés pour le stockage réversible de l'hydrogène, et peuvent stocker jusqu'à 2% massique d'hydrogène dans les conditions ambiantes. Les matériaux les plus prometteurs sont des alliages de structure BCC, des composés intermétalliques de type  $AB_x$  ( $1 \leq x \leq 5$ ), ou encore le magnésium et ses alliages.

Structure cristalline de la phase  $AB_3$   $Y_{0.88}Ni_{2.2}Mn_{0.8}$  affinée conjointement par diffraction de rayons X synchrotron et par diffraction de neutrons  
© ICMPE (CNRS | Univ Paris-Est Creteil Val-de-Marne)

La formation d'hydrures par absorption d'hydrogène est exothermique, tandis que leur décomposition par désorption d'hydrogène est endothermique. Pour remplir les critères de température ( $293 \text{ K} \leq T \leq 373 \text{ K}$ ) et de pression ( $0,1 \text{ MPa} \leq P \leq 1 \text{ MPa}$ ) permettant d'alimenter une pile à combustible, l'enthalpie de formation doit être comprise entre 25 et 50 kJ/mol  $H_2$ . Les propriétés thermodynamiques de ces familles de matériaux peuvent être ajustées en variant leur composition chimique. Voir projet **SOLHYD**

## Hydrures régénérables

Les hydrures régénérables, constitués d'éléments légers comme le lithium, le magnésium ou le bore, offrent une densité énergétique exceptionnelle. Ces matériaux sont capables de libérer de l'hydrogène de manière efficace sous des conditions relativement modérées de température et de pression. Cependant, leur déshydrogénération est un processus exothermique, ce qui empêche un stockage réversible simple, et nécessite une régénération chimique pour être réactivés. Malgré ces défis techniques, les hydrures régénérables continuent de susciter un grand intérêt en raison de leur potentiel pour des avancées technologiques significatives dans des domaines comme les énergies renouvelables ou la mobilité hydrogène. Voir projet **SOLHYD**

## Adsorption de l'hydrogène dans les matériaux poreux à surface spécifique élevée

Les matériaux poreux à surface spécifique élevée, comme les matériaux carbonés et les MOF (Metal Organic Framework), permettent un stockage efficace de l'hydrogène à basses températures et pressions modérées. Un grand espoir et donc plusieurs défis sont associés à ces matériaux et aux technologies cryogéniques pour le stockage de ce vecteur d'énergie durable. Voir projet **SOLHYD**.

Patricia De Rango,  
Coordinatrice du projet **SOLHYD**  
David Chapelle  
Coordinateur du projet **HYPERSTOCK**



## LES ÉVÈNEMENTS À VENIR...

### JANVIER 2026

- **19 - 20 janvier - LONDRES (UK)**  
International Conference on Hydrogen Safety ICHS (Digital)  
<https://conferenceindex.org/event/international-conference-on-hydrogen-safety-ichs-2026-january-london-gb>
- **26 janvier - SYDNEY (AUSTRALIA)**  
International Conference on Hydrogen Energy and Fuel Cell Technology ICHEFCT (Digital)  
<https://waset.org/hydrogen-energy-and-fuel-cell-technology-conference-in-january-2026-in-sydney>
- **27 - 29 janvier - PARIS**  
Hyvolution « A Decade of Hydrogen »  
<https://paris.hyvolution.com/en>

### FÉVRIER 2026

- **16 février - New York (USA)**  
International Conference on Hydrogen Energy and Fuel Cell Technology ICHEFCT (Digital)  
<https://waset.org/hydrogen-energy-and-fuel-cell-technology-conference-in-february-2026-in-new-york>

### MARS 2026

- **2 mars - TAIPEI (TAIWAN)**  
International Conference on Hydrogen Storage Materials and Systems ICHSMS (Digital)  
<https://waset.org/hydrogen-storage-materials-and-systems-conference-in-march-2026-in-taipei>

### SAVE THE DATES 2026

[contact@pepr-hydrogène.fr](mailto:contact@pepr-hydrogène.fr)

**10 - 11 mars : PEPR-H2 DAYS à Bordeaux**

**15 - 18 juin : PEPR-H2 SCHOOL à Sète**

Directeurs de la rédaction	Hélène Burlet et Abdelilah Slaoui
Comité éditorial	Hélène Burlet, Abdelilah 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	



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



**Newsletter**  
Janvier 2026