



PROGRAMME  
DE RECHERCHE  
HYDROGÈNE

Newsletter  
Mai 2025



Programme et Équipements Prioritaires  
de Recherche Hydrogène décarboné



## EDITO

Trois ans déjà !!  
C'est le slogan de  
la 4<sup>e</sup> édition des journées scientifiques  
du Programme et Équipements Prioritaires de  
Recherche sur l'Hydrogène (PEPR-H2) qui a eu lieu  
les 18-19 mars 2025 à Nantes. Le PEPR-H2 DAY a  
été suivi par près de 200 participants provenant de  
nombreuses structures, d'organismes de recherche  
et d'industries, intéressés par la filière hydrogène.

Les journées ont été introduites par Hoang  
Bui, coordinateur de la stratégie nationale sur  
l'hydrogène décarboné, rappelant le contexte de  
la feuille de route nationale et sa future évolution,  
suivi par un rappel des objectifs et orientations  
du PEPR-H2 présenté par les directeurs du  
programme. Puis des chercheurs du PEPR-H2 ont  
présenté les avancées majeures obtenues cette  
dernière année dans les domaines des procédés  
hautes températures (électrolyses et piles à  
combustible à base de céramique), de l'électrolyse  
PEM et AEM, des piles à combustible PEM pour la  
mobilité ainsi que des différentes voies de stockage  
liquide, gazeux et solide.

Un aperçu de quatre de ces présentations est  
donné dans les « actualités » de ce numéro.

Le PEPR-H2 DAY a été l'occasion d'organiser  
deux tables rondes sur les thèmes  
« Quels défis / opportunités pour accélérer le  
transfert de la recherche vers l'industrie ? » et  
« Analyser et évaluer les soutenabilités - Regards  
croisés ». La première journée s'est terminée par une  
session de posters présentés par les doctorant.es  
et post-doctorant.es impliqués dans le programme.  
Des visites de sites (IMN, CETIM, CEA-Tech, Ecole  
Centrale) ont été organisées le 19 mars après-midi  
afin de mieux faire connaître l'écosystème nantais  
et les infrastructures existantes.

Les enregistrements des sessions plénières du  
PEPR-H2 DAY peuvent être visionnés sur la  
chaîne @PEPRHYDROGENE : <https://www.youtube.com/playlist?list=PLmGDoGJdEWyLFDgkfQQZMMGzYFSCp9bx>

Le dossier de cette newsletter est consacré à  
l'utilisation d'oxydes à haute entropie dans les  
procédés de production de l'hydrogène.

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



### LES ACTUALITÉS DES PROJETS DU PEPR-H2

# Procédés hautes  
températures : de l'électrolyse aux piles à  
combustible flexibles

# Développements de la technologie PEM :  
nouveaux matériaux et modélisation

# Développements de la technologie AEM :  
des matériaux jusqu'au stack

# Approche multi-échelles pour le  
développement de piles à combustible de  
type PEM pour la mobilité lourde



### LES MATÉRIAUX À HAUTE ENTROPIE : DE NOUVEAUX MATÉRIAUX POUR LA PRODUCTION D'HYDROGÈNE DÉCARBONÉ



### LES ÉVÈNEMENTS À VENIR

MAI  
JUIN  
JUILLET 2025

RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

Liberté  
Égalité  
Fraternité



anr®

cnrs

cea



## LES ACTUALITÉS DES PROJETS DU PEPR-H2

Ce numéro résume les faits marquants présentés au PEPR-H2 DAY sur les procédés d'électrolyse et les piles à combustible à basses et hautes températures.

### Procédés hautes températures : de l'électrolyse aux piles à combustible flexibles

Les systèmes à hautes températures présentent de nombreux avantages par rapport aux basses températures, tels qu'un rendement énergétique élevé, l'absence de platinoïdes, une flexibilité d'utilisation, et une modularité adaptée à divers besoins industriels.

Deux types de cellules sont en développement :

- Les cellules SOC (Solid Oxide Cells) utilisent un électrolyte conducteur anionique et fonctionnent à des températures comprises entre 700 et 800°C. Cette technologie est au stade de démonstrateurs de plusieurs MW. Toutefois, pour accélérer le déploiement de ces solutions, une réduction des coûts est indispensable. Cette diminution passe par l'amélioration des performances et de la durabilité des cellules à l'échelle industrielle.
- Les cellules PCC (Protonic Ceramic Cells) exploitent un électrolyte conducteur protonique et opèrent à des températures plus basses (400-600°C). Elles sont encore au stade de développement.

### Trois projets du PEPR-H2 contribuent à cette dynamique

En 2024, ces projets ont enregistré des avancées significatives dans les domaines des matériaux, des microstructures, des procédés et de la compréhension des mécanismes de fonctionnement, à savoir :

- **CELCER-EHT** : réalisation de cellules de 144 cm<sup>2</sup> (surface active de 100 cm<sup>2</sup>) présentant un niveau de

dégradation de 1%/1000h lors d'un fonctionnement à 1 A/cm<sup>2</sup>, grâce à l'amélioration des matériaux de cellule actuels

- **PROTEC** : mise à l'échelle de cellules de diamètre 50 mm avec les performances cibles de fin de projet (0.8A/cm<sup>2</sup> à 1.3V et 600°C) et une durabilité prometteuse. La mise en place d'une approche combinatoire permet d'accélérer les développements matériaux
- **FLEXISOC** : premières cellules du consortium validées, démontrant une flexibilité du combustible et de bonnes propriétés catalytiques.

### Des projets en support de la filière Française

La production d'électricité en mode SOFC avec des combustibles autres que l'hydrogène est démontrée dans le projet **FLEXISOC**. Côté électrolyse haute température, la technologie SOEC poursuit sa montée en maturité, notamment grâce à **CELCER-EHT** et à la mise en service d'une ligne pilote pour la fabrication de cellules de 200 cm<sup>2</sup>. La technologie PCC, soutenue par **PROTEC**, doit encore émerger pour structurer une véritable filière française.

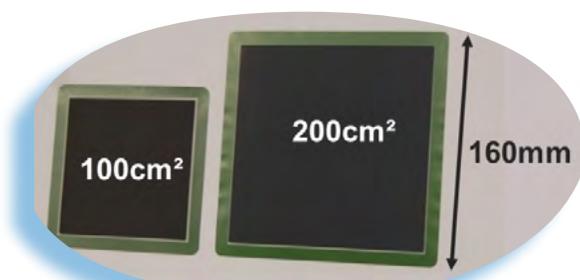


Figure : Cellules SOC de 100 et 200 cm<sup>2</sup> de surface active fabriquées sur la ligne pilote du CEA-Liten dans le cadre du projet CELCER-EHT. © CEA-Liten

Elisa Grindler  
Coordinatrice du projet CELCER-EHT

### Développements de la technologie PEM : nouveaux matériaux et modélisation

Les trois projets sélectionnés dans le cadre du PEPR H2 décarboné, **MATHYLDE**, **COSTO** et **ASTERHYX**, ont pour objectifs d'améliorer les performances, de réduire les coûts et de limiter le temps de développement de la technologie d'électrolyse de l'eau à membrane échangeuse de protons (PEMWE). Les deux premiers se concentrent essentiellement sur les matériaux au cœur de la technologie, catalyseurs anodiques, membrane électrolytique, couches de transport poreuses et plaques bipolaires. **ASTERHYX** tout juste sélectionné, s'intéressera quant à lui au développement de protocoles de tests accélérés sous condition d'usage.

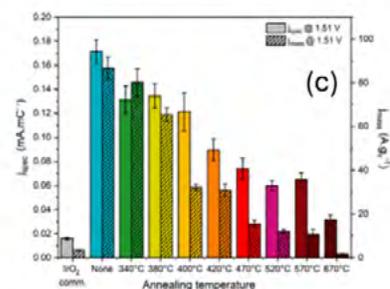
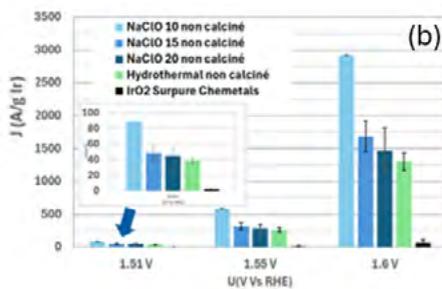
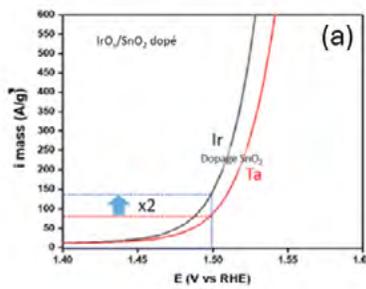
### Nouveaux matériaux et composants d'assemblages membrane-électrode

Au cœur de la technologie, de l'iridium (Ir) dont il faut user avec parcimonie tant les réserves aujourd'hui accessibles sont limitées et le coût élevé. Les nouveaux catalyseurs développés à base d'oxyde d'Ir, nanoparticules déposées sur nanofibres de SnO<sub>2</sub> dopé, film déposé sur aérogels de TiO<sub>2</sub> ou encore oxyde d'iridium nanotexturé permettent d'ores et déjà de réduire d'un facteur 5 à 7 la quantité d'iridium à l'anode. Autre composant névralgique, la membrane. Les solutions composites développées à base de Nafion® et de fibres de PBI électrofilées répondent aux attentes : conductivité protonique voisine de celle du Nafion® et propriétés mécaniques améliorées pour des membranes de 80 µm contre 150 dans les dispositifs actuels.

Figure 1 (page suivante) : Activité massique des différents catalyseurs développés : IrOx sur nanofibres de SnO<sub>2</sub> dopés Ir ou Ta (a) ou aérogels de TiO<sub>2</sub> (b) et IrOx nanotexturé (c).

© ICGM (CNRS / ENSC Montpellier / Univ Montpellier), PERSEE (Mines Paris / PSL), LEPMI (CNRS / UGA / Univ Savoie Mont Blanc), Sara cavalière, Luc Zhang, Delphine Claus.





## Revêtements anticorrosion pour les couches de transport poreuses et les plaques bipolaires en Ti

Deux types de revêtement déposés selon deux procédés : nitrure et oxynitrure de Ti, nitrure de Ta, par PVD en couche simple ou multicouches (dépôt dense, résistants à la corrosion et peu résistifs) ou SnO<sub>2</sub> par ALD à partir de précurseurs organométalliques ou inorganiques pour maîtriser la composition et l'épaisseur des couches, qui se sont révélées très efficaces contre la corrosion et plus conductrices qu'espéré. Les caractérisations réalisées par AFM ont permis de relier la composition des couches à la topographie, la dureté et la conductivité à l'échelle des grains et de mettre en évidence les gains obtenus en termes d'ICR.

conditions d'usage, repose sur des essais de longue durée de monocellules et de stacks et la modélisation des dégradations. La validation s'effectuera par une série de caractérisations en début de vie, in-situ et post mortem.

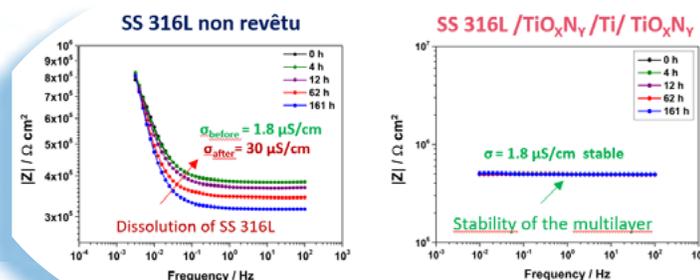


Figure 2 : Résistance à la corrosion (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH=5.5, OCP, 60 °C) sur 161h d'acier inoxydable 316L non revêtu (gauche) et revêtu d'une multicouche d'oxynitrure de Ti et de Ti.

© ISCR (CNRS / ENSC Rennes / Univ Rennes), Lab-STICC (IMT Atlantique), Khaoula Chergui

## Protocoles de tests accélérés

Le développement de protocoles de test accélérés, sous

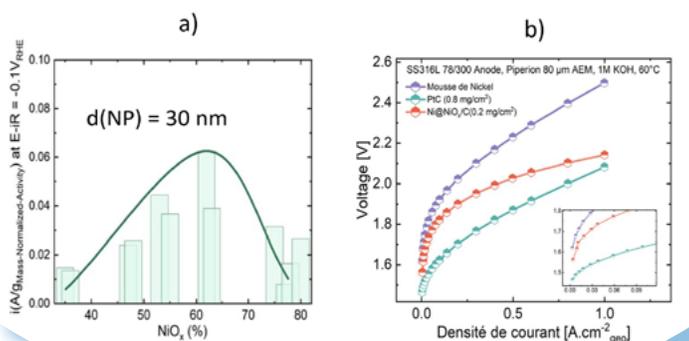
Christian Beauger  
Coordinateur du projet MATHYLDE

## Développements de la technologie AEM : des matériaux jusqu'au stack

Le PEPR H2 Day a été l'occasion de faire un point sur les avancées de la technologie d'électrolyse alcaline à membrane échangeuse d'anions (AEMWE) qui est étudiée dans deux projets. **DAEMONHYC** démarré début 2023 a pour objectif le développement des cellules élémentaires, et **ANGELIC** démarré fin 2024, celui des stacks. L'exposé a mis en avant les résultats du projet **DAEMONHYC** détaillés ci-dessous, et précisés les attendus du projet **ANGELIC**.

### Le défi des catalyseurs à la cathode

En milieu alcalin, les catalyseurs à base de platine pour le dégagement de l'hydrogène (HER) peuvent être remplacés par des matériaux moins coûteux à base de nickel. Leurs performances sont fortement liées à leur nanostructuration et à leur état de surface. Des nanostructures très petites (< 10-15 nm) augmentent la surface développée et par conséquent l'activité du catalyseur. L'état d'oxydation des particules doit être contrôlé parce que l'activité intrinsèque du nickel est optimale en présence d'hétérostructures «Ni@NiO<sub>x</sub>», autrement dit lorsque la surface métallique (Ni) est partiellement oxydée (NiO<sub>x</sub>).



## Des hétérostructures de nickel préparées par électrodéposition

De telles hétérostructures ont été obtenues en utilisant une technique d'électrodéposition : l'application d'un potentiel suffisamment négatif permet de réduire un sel de nickel en solution sur un substrat choisi. Cette électrodéposition est suivie d'une oxydation de la surface contrôlée en temps et en potentiel de façon à produire des hétérostructures avec différents degrés d'oxydation. Nous avons été ainsi en mesure de fabriquer une librairie de matériaux à base de nickel et de déterminer les optimums sur le degré d'oxydation en fonction de la taille des particules. Par exemple, la figure 1a montre un ratio d'oxydation optimal de 60% pour des particules de 30nm.

### Vers des performances similaires au platine ?

Ces matériaux ont ensuite été mis à l'échelle, c'est à dire préparés sur des électrodes suffisamment grandes pour être intégrées dans une cellule d'électrolyse de 25cm<sup>2</sup> représentative de l'application industrielle. La première cathode originale issue de **DAEMONHYC** a été testée (cf. figure 1b) et présente des performances supérieures aux électrodes non-nobles de l'état de l'art, permettant ainsi de réduire l'écart de performance avec le platine, malgré le faible chargement en nickel de ce premier essai.

Gaël Maranzana  
Coordinateur du projet DAEMONHYC

Figure : a) Courant de dégagement d'hydrogène à -0.1V/RHE en fonction du taux d'oxydation de particules de taille 30nm. et b) Performances en cellule de 25cm<sup>2</sup> pour différentes cathodes, dont l'hétérostructure Ni@NiO<sub>x</sub> fabriquée dans le cadre de DAEMONHYC chargée à 0.2mgNi/cm<sup>2</sup>.

© ICPEES (CNRS / Univ Strasbourg), LEMTA (CNRS / Univ Lorraine), Julie Guehl, José Martinez Rosales.



## Approche multi-échelles pour le développement de piles à combustible de type PEM pour la mobilité lourde

Les trois projets du PEPR H2 sur les piles à combustible de type PEM visent des objectifs communs, discutés lors d'échanges inter-projets. Ils sont en phase avec les objectifs au niveau international pour la mobilité lourde, à savoir une augmentation de la durabilité, de la performance et du rendement, tout en diminuant le coût. Le découpage en trois projets, regroupant 14 partenaires académiques, permet de traiter de manière cohérente des sujets ayant des implications depuis l'échelle du catalyseur jusqu'à celle du système

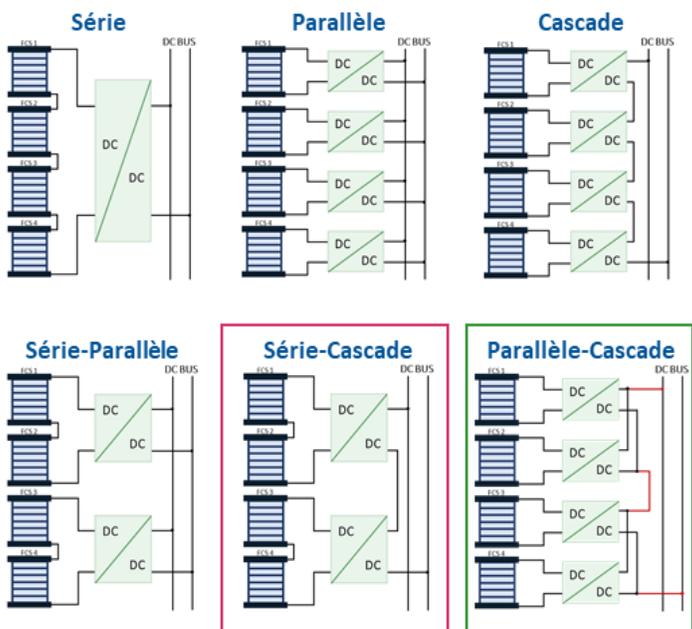


Figure 1 : Architectures électriques de système multi-stack. © IPFEN, Inès Siad

### Amélioration des membranes et simplification du système

Les fortes puissances requises pour les transports lourds conduisent à associer plusieurs stacks, ce qui multiplie les possibilités en termes de refroidissement, de gestion d'énergie et d'alimentation en réactifs. La

simplification du système devient alors l'une des clés pour progresser. Simplifier l'alimentation en air est une option possible étudiée dans **HYSYSPEM**, qui montre que certaines conditions de pression et de température sont favorables à une suppression de l'humidificateur. Par ailleurs, l'encombrement, l'efficacité et le coût du système de refroidissement sont cruciaux pour les transports lourds. Sa simplification passe par une augmentation de température, visée par **PEMFC95**. En effet, l'ajout de nanofibres fonctionnalisées dans les membranes augmente leur stabilité chimique et leur étanchéité à l'hydrogène à 95°C, sans perte de conductivité ionique.

### Meilleure tolérance aux polluants et aux fautes

A l'échelle du stack et du système, **DURASYS-PAC** et **HYSYSPEM** progressent dans l'étude des dégradations et des fautes. De nouvelles méthodes sont mises en œuvre pour à la fois les éviter, mieux les détecter et les compenser par un pilotage adapté du système. Ainsi, la création d'algorithmes de détection à base de réseaux de neurones fiabilise la détection, tandis que de nouvelles architectures électriques (cf. figure 1) s'avèrent plus flexibles et plus tolérantes. De son côté, **PEMFC95** s'intéresse aux propriétés des catalyseurs en présence de polluants. En combinant des études numériques de dynamique moléculaire (cf. figure 2) avec des expériences en cellule spectroélectrochimique, les résultats permettent de comprendre comment ralentir l'empoisonnement, et quels facteurs favorisent le désempoisonnement, pour obtenir des catalyseurs plus tolérants et moins chargés en platine.

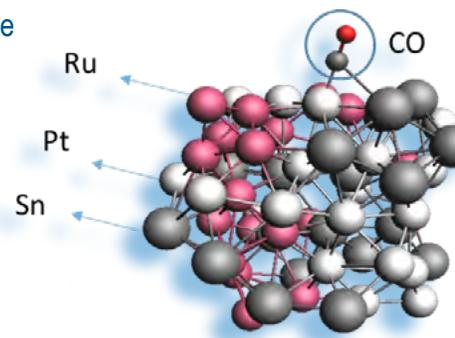


Figure 2 : Simulation d'adsorption d'une molécule de CO sur site catalytique de  $Pt_{0.35}Ru_{0.35}Sn_{0.3}$   
© GREMI (CNRS / Univ Orléans), Amael Caillard

Jean-Philippe Poirot-Crouvezier  
Coordinateur du projet HYSYSPEM

### EN BREF

#### Formation «Sensibilisation à l'innovation»

La matin du 18 mars à Nantes, les doctorants du PEPR-H2 ont suivi une formation qui avait pour objectif de rappeler l'utilisation de l'échelle TRL (Technology Readiness Level) pour le développement d'une technologie et les outils de l'innovation disponibles dans les organismes de recherche. Michael Haddad, directeur «Innovation & Partenariats» à la direction de la stratégie d'Alstom et Issam Kherbouche, responsable valorisation à la mission pour les programmes nationaux (MiPN) du CNRS ont partagé leurs expertises durant leur intervention.



Issam Kherbouche (Responsable valorisation à la mission pour les programmes nationaux du CNRS)  
© PEPR-H2

#### Rencontre entre le GT Recherche et l'Académie des Technologies

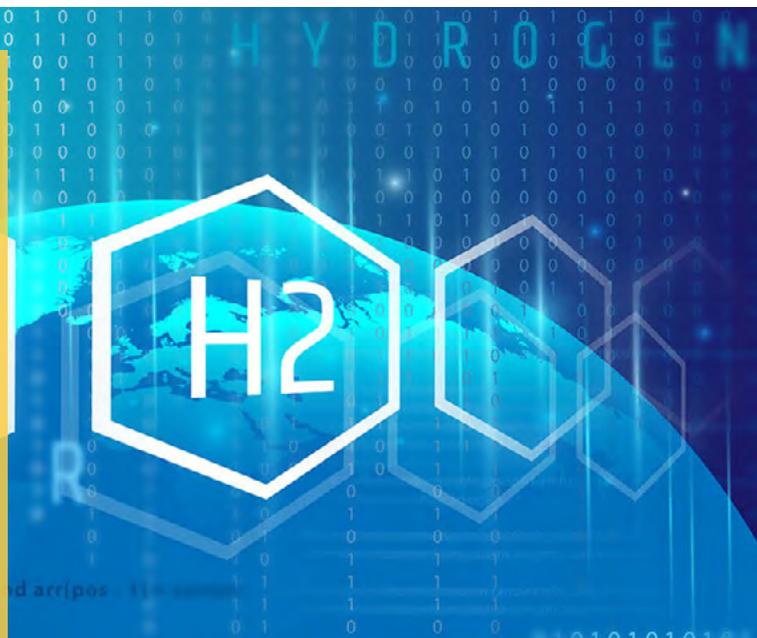
La feuille de route du PEPR-H2 et des résultats marquants sur la filière des électrolyseurs haute température ont été présentés le mardi 14 janvier 2025 lors de la Journée de rencontre entre le GT recherche du CSF NSE et l'Académie des Technologies (AT) organisée au siège du CNRS à Paris.





## LES MATÉRIAUX À HAUTE ENTROPIE : DE NOUVEAUX MATÉRIAUX POUR LA PRODUCTION D'HYDROGÈNE DÉCARBONÉ

Les matériaux à haute entropie suscitent un intérêt croissant pour la production et le stockage de l'hydrogène décarboné. Leur composition multiélémentaire peut induire des propriétés inédites grâce à l'effet cocktail. Un séminaire organisé par le PEPR-H2, le 25 novembre 2024, a permis d'explorer les défis et opportunités liés à ces matériaux émergents. Ce dossier fait le point sur les OHEs développés pour la production d'hydrogène basse température.



### Matériaux à haute entropie, une nouvelle classe de matériaux

Les matériaux à haute entropie (MHEs), et plus particulièrement les oxydes à haute entropie (OHEs), suscitent un intérêt croissant en raison de leurs propriétés physico-chimiques uniques et de la diversité des compositions possibles. Les MHEs sont composés d'au moins cinq éléments présents en proportions proches de l'équimolarité. La haute entropie de configuration contribue significativement à la stabilité de ces matériaux, favorisant ainsi la formation de phases homogènes. Comparés aux autres MHEs, les OHEs présentent des avantages notables : une stabilité thermique accrue grâce à la présence d'un réseau oxygéné et une grande capacité d'adaptation, permettant l'intégration d'éléments issus de structures cristallines variées. Cette richesse de composition offre un contrôle précis des propriétés électroniques et catalytiques, ouvrant ainsi des perspectives inédites pour le stockage et la conversion d'énergie.

Ces matériaux sont exploités dans le cadre du projet **HYDRO** qui a pour but la production d'hydrogène à partir de l'eau et de l'énergie solaire, en exploitant leur capacité à ajuster intrinsèquement leurs propriétés optiques et électrochimiques. Ces matériaux innovants pourraient ainsi constituer une alternative prometteuse aux semi-conducteurs classiques dans le domaine de la photocatalyse et de la photoélectrocatalyse.

### Méthodes de synthèse des oxydes à haute entropie

Les OHEs peuvent être synthétisés par différentes méthodes selon les propriétés recherchées et les applications visées. Ces techniques de synthèses se divisent en deux grandes catégories : les méthodes à haute température, qui assurent une cristallinité élevée et une distribution homogène des éléments, et les méthodes à basse température, permettant de contrôler finement les microstructures tout en réduisant la consommation énergétique.

Les méthodes à haute température incluent le dépôt par laser pulsé et la pulvérisation cathodique magnétron, principalement utilisées pour des films minces aux compositions précises, ainsi que la projection plasma

et la pyrolyse par flamme, adaptées à la production de poudres et revêtements. Ces techniques assurent une qualité optimale mais restent coûteuses et limitées à certaines applications.

Les méthodes à basse température, telle que l'autocombustion sol-gel, ou les synthèses électrochimiques, mécano-chimiques et sono-chimiques, se distinguent par leur simplicité et leur capacité à produire des OHEs ayant des structures variées et des morphologies contrôlées.

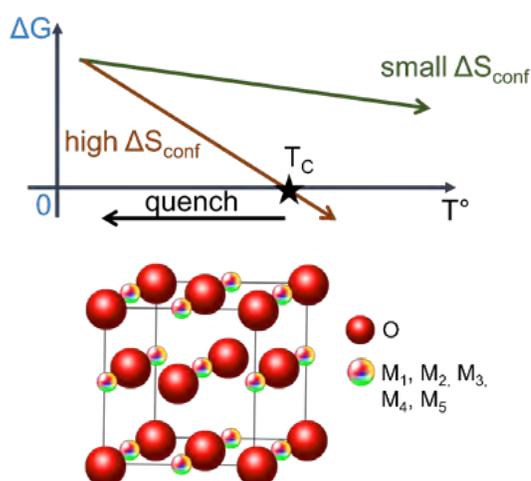


Figure 1 : Enthalpie libre en fonction de la température. Influence de l'entropie de configuration sur la stabilité thermodynamique des matériaux. © Dodzi Zigah

En complément, les techniques de synthèse et de caractérisation à haut débit révolutionnent l'identification de OHEs optimaux en permettant l'exploration accélérée de nombreuses compositions. L'automatisation de la fabrication et des analyses expérimentales permettent de générer rapidement une large gamme d'échantillons et d'en analyser les structures et propriétés par des outils de caractérisation automatisés.

### Modélisation et Intelligence Artificielle

La modélisation des OHEs est complexe, notamment en raison de leur composition et de leur structure variée, qui induisent des effets électroniques et mécaniques nouveaux par rapport aux oxydes classiques. Ces particularités rendent difficiles à la fois leur conception et leur optimisation.



Les méthodes classiques de simulation en chimie quantique, comme la DFT nécessitent un temps de calcul important à cause de la difficulté à choisir la bonne fonctionnelle et à définir un modèle structural précis.

fonctionnelles des matériaux. Cette combinaison permet ainsi d'explorer efficacement de nombreuses combinaisons d'éléments et d'identifier les compositions les plus prometteuses pour des applications spécifiques, telles que la photocatalyse ou la photoélectrocatalyse (cf. figure 2).

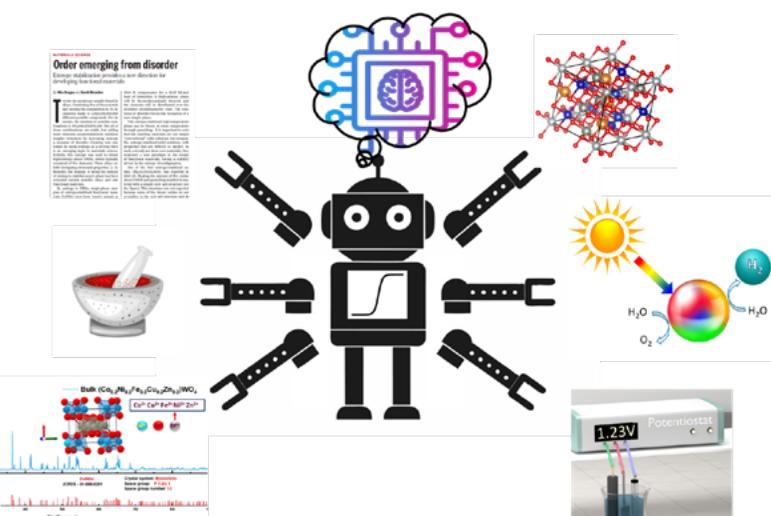


Figure 2 : Image illustrant l'utilisation de l'IA et l'automatisation pour la recherche, la caractérisation et l'analyse de matériaux. © Dodzi Zigah

Pour surmonter ces difficultés, la combinaison de la modélisation DFT avec des approches d'apprentissage automatique (intelligence artificielle) est devenue essentielle. L'apprentissage automatique exploite des bases de données expérimentales et théoriques étendues pour prédire rapidement la formation des phases, la stabilité structurelle et les propriétés

## Oxydes à Haute Entropie pour la Photocatalyse : Une Alternative aux Dopages et Hétérostructures

La conversion de l'énergie solaire en hydrogène repose sur la capacité d'un matériau à absorber la lumière et à catalyser les réactions d'oxydation et de réduction de l'eau. Dans ce contexte, les OHEs émergent comme une alternative innovante aux semi-conducteurs classiques, grâce à leur capacité à moduler à la fois la largeur et la position des bandes électroniques, sans nécessiter de dopage ou de structures complexes. Il est possible de contrôler les niveaux d'énergie, en ajustant la proportion des éléments qui les composent. De plus, leur structure désordonnée et multi-élémentaire favorise naturellement une séparation efficace des charges tout en offrant une grande robustesse. L'absorption lumineuse et les propriétés catalytiques sont ainsi améliorées, rendant ces matériaux particulièrement adaptés aux applications en photocatalyse.

Dodzi Zigah  
Coordinateur du projet HYDRO



## LES ÉVÈNEMENTS À VENIR...

### MAI 2025

- **21 mai - BORDEAUX**  
Séminaire du projet AIDHY « Retour d'expérience des projets d'hydrogène décarboné dans les territoires »  
[contact@pepr-hydrogene.fr](mailto:contact@pepr-hydrogene.fr)
- **20 - 22 mai - ROTTERDAM**  
World Hydrogen2025, summit and exhibition  
<https://www.world-hydrogen-summit.com/world/en-gb.html>

### JUIN 2025

- **18 - 19 juin - MADRID**  
Connecting Hydrogen Europe 2025  
<https://www.connectinghydrogeneurope.com/>

### JUILLET 2025

- **01 - 03 juillet - LYON**  
Journées Hydrogène dans les territoires 2025  
<https://www.jh2t.fr/>



O'Deck à Nantes © PEPR-H2

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	

