



PROGRAMME
DE RECHERCHE
HYDROGÈNE

Newsletter
Septembre 2025



Programme et Équipements Prioritaires
de Recherche Hydrogène décarboné



EDITO

Le Programme et Equipements Prioritaires de Recherche sur l'hydrogène décarboné gagne en maturité avec la production de résultats scientifiques majeurs issus de plusieurs projets. Ainsi, plus de 80 articles sont actuellement publiés dans des revues accessibles en sciences ouvertes avec la signature PEPR-H2. Pour une meilleure connaissance des projets en cours, nous avons par ailleurs réalisé une série de vidéos dont certaines sont déjà disponibles sur la chaîne [YouTube du PEPR](#).

Le dossier de ce numéro est consacré aux risques géopolitiques liés à la chaîne d'approvisionnement de la filière hydrogène avec un regard particulier sur une perspective pour l'Union Européenne. Comme à l'habitude, la lettre fait le focus sur quelques résultats marquants issus de projets. Ainsi, il est question du développement d'une photocathode prometteuse pour la production photoélectrochimique d'hydrogène, de la synthèse de matériaux poreux pour le stockage de l'hydrogène en conditions cryogéniques, de l'effet de l'hydrogène gazeux sur le comportement et sur la durée de vie des composants métalliques et

en polymères, et de chimie virtuelle pour simuler la formation d'oxydes d'azote dans des flammes d'hydrogène.

Dans le cadre des activités transverses du programme, on peut signaler l'organisation du séminaire thématique dédié à « l'IA au service de l'hydrogène ». Ce séminaire se déroulera à Paris les 5 et 6 novembre 2025. La première journée est plus spécialement destinée aux doctorants et chercheurs/ingénieurs des milieux académique ou industriel souhaitant se familiariser avec les outils de l'IA, en particulier dans le domaine de l'hydrogène. La matinée comprendra des exposés généraux sur l'IA, suivi l'après-midi par des ateliers menés en parallèle : l'IA pour la découverte de nouveaux matériaux et l'IA au service de la gestion des systèmes hydrogène. La deuxième journée sera consacrée à la présentation d'exemples d'utilisation de l'IA.

A mettre dans vos agendas la cinquième édition du PEPR-H2 days qui se déroulera les 10-11 mars 2026 à Bordeaux. Le programme sera bientôt disponible. En comptant sur votre participation.

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



ACTUS

LES ACTUALITÉS DES
PROJETS DU PEPR-H2

- # Une photocathode prometteuse pour la production photoélectrochimique d'hydrogène
- # Des améliorations attendues pour le stockage hyperbare
- # Matériaux poreux pour le stockage de l'hydrogène en conditions cryogéniques
- # Une chimie virtuelle pour la modélisation de la combustion de l'hydrogène



DOSSIER

RISQUES
GÉOPOLITQUES
LIÉS À LA CHAÎNE
D'APPROVISIONNEMENT
DE LA FILIÈRE
HYDROGÈNE



AGENDA

LES ÉVÈNEMENTS À VENIR

OCTOBRE
NOVEMBRE
DÉCEMBRE 2025


RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



anr®

cnrs

cea



LES ACTUALITÉS DES PROJETS DU PEPR-H2

Ce numéro s'intéresse aux projets de recherche de production par électrophotocatalyse, au stockage et à la combustion de l'hydrogène.

Une photocathode prometteuse pour la production photoélectrochimique d'hydrogène

Le projet **NAUTILUS** s'intéresse à la production d'hydrogène vert par la technologie photoélectrochimique (PEC) pour la dissociation de l'eau. Les semi-conducteurs III-V, comme l'arséniure de gallium (GaAs), sont reconnus comme des absorbeurs de lumière efficaces pour ce processus, en raison de leur bande interdite directe et de leurs excellentes propriétés de transport de charge. Cependant, l'utilisation de substrats III-V est limitée par leur coût élevé. Une solution attrayante consiste à faire croître des couches minces épitaxiales III-V sur des substrats de silicium, peu coûteux, afin de maintenir une haute efficacité à moindre coût. Dans cette étude, nous avons développé des photocathodes composées de films de GaAs déposés par épitaxie par jets moléculaires (MBE) sur du silicium de type p (GaAs/Si:p), que nous avons modifiés avec un catalyseur à base de nickel (Ni), un métal non noble fonctionnant en milieu alcalin.

Performances et défis

Les photocathodes Ni/GaAs/Si:p ont permis une production stable d'hydrogène sous simulateur solaire, avec une efficacité faradique approchant les 100 %. Ce résultat met en évidence le potentiel du couplage du GaAs avec une méthode de dépôt simple et peu coûteuse pour le nickel, offrant un potentiel de déploiement à grande échelle du catalyseur dans le système PEC. Cependant, l'étude a également révélé un comportement inattendu : l'augmentation de l'épaisseur de la couche épitaxiale de GaAs a conduit à une diminution des densités de photocourant. Les mesures d'efficacité quantique incidente-photoélectron (IPCE) ont montré que le GaAs ne contribuait pas

Des améliorations attendues pour le stockage hyperbare

Le projet **HYPERSTOCK** mène sur deux volets, l'un dédié aux composants métalliques, l'autre aux matériaux non métalliques, une analyse des solutions de stockage et transport de dihydrogène comprimé en termes de choix de matériaux. Les résultats du projet permettront de sélectionner les meilleurs matériaux au regard d'un prisme multi objectifs d'optimisation mécanique, de densité gravimétrique, et de réduction d'impact environnemental.

Recherche sur les composants métalliques

efficacement à la production d'hydrogène, le substrat de silicium étant la couche active principale. Cette limitation est probablement liée à des défauts cristallins au niveau de l'interface GaAs/Si, qui agissent comme des centres de recombinaison pour les charges photo-générées dans la couche de GaAs.

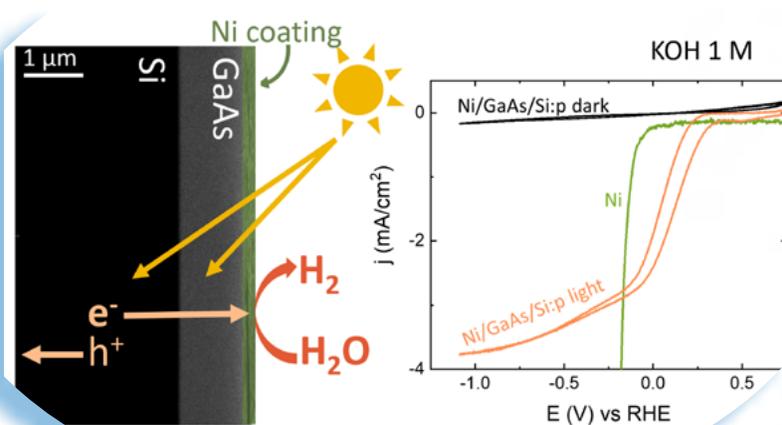


Figure : Principe de fonctionnement de la photocathode
© 2025 The Authors. Published by American Chemical Society.

<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.jpcc.5c01840>

Perspectives et développements futurs

Ce travail constitue la première démonstration de l'utilisation du nickel comme catalyseur sur des photocathodes à base de GaAs pour la production d'hydrogène en milieu alcalin par voie photoélectrochimique (PEC). Les résultats soulignent le potentiel de l'intégration de couches épitaxiales III-V avec des catalyseurs économiques. Cependant, ces matériaux doivent encore être améliorés, notamment en réduisant les pertes liées aux défauts et en optimisant la collecte de la lumière. Les recherches sur l'amélioration et l'ingénierie des interfaces se poursuivent afin de libérer tout le potentiel des photocathodes III-V/Si pour une production d'hydrogène PEC à grande échelle.

Charles Cornet
coordinateur du projet NAUTILUS

L'effet de l'hydrogène gazeux sur le comportement métallique et sur la durée de vie des composants métalliques des réservoirs de stockage et pipelines est l'objet de l'étude. Parmi les travaux multi-échelles engagés, une étude essentielle concerne les équivalences possibles entre essais mécaniques réalisés sous pression d'hydrogène ou sous chargement cathodique. Pouvoir établir une telle équivalence faciliterait grandement (gain de temps et réduction des coûts) la caractérisation des canalisations des réseaux de transport de gaz naturel existants en vue de leur conversion au transport d'hydrogène sous pression. A titre d'exemple, la figure 1 montre que pour un acier martensitique développé pour le stockage de gaz sous pression, il est possible de trouver des domaines de pression d'hydrogène et des domaines de potentiels imposés entraînant des endommagements similaires.



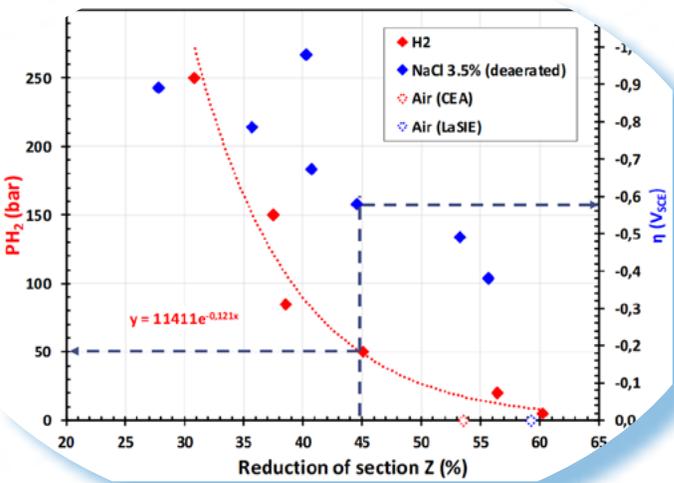


Figure 1 : Comparaison des réductions de section à rupture lors d'essais de traction sur éprouvette entaillée (U5) sous pression d'hydrogène ou sous chargement cathodique (Thèse Coop-Phane – Hyperstock)

© CEA, LASIE (CNRS | La Rochelle Univ)

L'endommagement est mesuré en termes de réduction de section à rupture d'éprouvettes de traction : plus la valeur est faible plus la sensibilité du matériau à la fragilisation par l'hydrogène est grande. Ces résultats vont être confrontés d'une part aux teneurs en hydrogène obtenues sous ces différents chargements, et d'autre part, à l'analyse des faciès de rupture permettant d'identifier les mécanismes probables de dégradation, afin de consolider les domaines d'équivalence de ces deux types de chargement. A ce stade du projet, les données obtenues aux petites échelles permettent d'alimenter les études travaillant à des échelles plus importantes. Les résultats sont présentés aux conférences suivantes : ASTM Conference on Hydrogen in Materials, 4-6 juin 2025 (La Rochelle), 5th International Conference on Metals and Hydrogen, 14-16 octobre 2025 (Gent, Belgique).

Recherche sur les matériaux polymères

Les essais de chargement en hydrogène pour l'étude de la perméation et du cloquage sur des éprouvettes et des membranes en PA11, PA6 et HDPE se poursuivent au sein des équipes du consortium pour évaluer la résistance de ces matériaux dans des conditions de cyclage à haute pression. Plusieurs cycles de compression-décompression jusqu'à 900 bar sont effectués, incluant des décompressions très rapides, à la vitesse de 4000 bar/minute. Les prochaines étapes consistent à caractériser mécaniquement et en diffusion ces éprouvettes puis d'exploiter le banc sous pression pour tester un réservoir entier de 9 litres sous des chargements similaires.

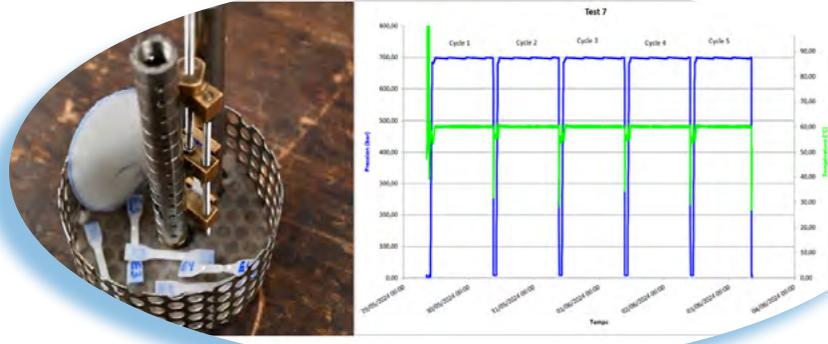


Figure 2 : Chambre de mise sous pression d'éprouvettes en polymère – disques de perméation, éprouvettes traction - et cycles de pressurisation 0-900 bar sur 5 jours © IFPEN

Laurent Briottet, CEA
Marie-Hélène Klopffer, IFPEN

Matériaux poreux pour le stockage de l'hydrogène en conditions cryogéniques

Le stockage de l'hydrogène liquide (LH2) par des matériaux poreux est d'actualité. Dans le cadre du projet **SOLHYD**, des travaux ont été menés sur la synthèse des MOFs (Metal-Organic Frameworks) et sur leurs hybrides associant des matériaux carbonés. Un gain de près de 10 % de la capacité de stockage par cryocompression de ces derniers a été mis en évidence par rapport aux MOFs seuls, tout en réduisant leur affinité pour l'eau. Ces travaux conduits dans le cadre du contrat doctoral de Laura Jiménez-López, ont été valorisés par un projet de prématuration, une contribution à un chapitre d'ouvrage (ISBN: 978-3-0365-1935-7), et la publication de plusieurs articles :

- 10.1039/D4NR03969F
- 10.1016/j.cej.2025.165834
- 10.1016/j.ijhydene.2025.151272
- 10.20517/energymater.2025.101

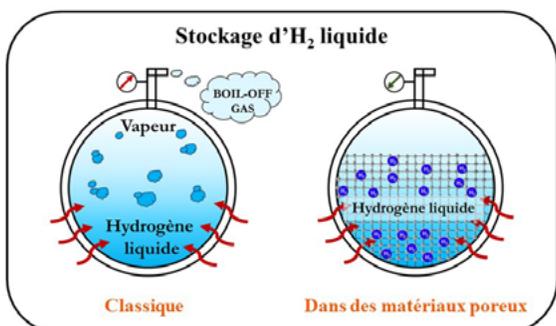


Figure 1 : Représentation schématique de la réduction de l'évaporation de l'hydrogène liquide grâce à l'utilisation de matériaux poreux.

© IJL (CNRS | Univ Lorraine) et UNIST (Corée du Sud)

Comment prolonger la conservation de LH2 grâce aux matériaux poreux?

L'effet de l'adsorption sur la réduction de l'évaporation de l'hydrogène stocké en phase liquide à des températures inférieures à 20 K a été étudié en collaboration avec une équipe Sud-Coréenne. Ce phénomène provoque des pertes importantes, compromettant à la fois l'efficacité et la sécurité des systèmes de stockage. Pour y remédier, le recours à l'utilisation des MOFs et de leurs hybrides, intégrés dans des réservoirs de stockage d'hydrogène liquide (Figure 1) a été investigué.

Ralentir l'évaporation grâce aux MOFs et leurs hybrides

Lors du stockage de LH2, une élévation de la température entraîne une augmentation rapide de la pression dans le réservoir, pouvant provoquer d'importantes pertes par évaporation. En l'absence de matériau poreux, la pression atteint 1 bar dès 21 K, soit la température d'ébullition de l'hydrogène liquide. En revanche, l'introduction de MOFs et de leurs hybrides a permis d'élever la température d'ébullition de 21 K à 64 K, comme l'illustre la Figure 2a. Cette amélioration résulte des interactions entre les molécules d'hydrogène et les parois des pores, qui favorisent une adsorption plus forte et réduisent ainsi les pertes par évaporation.



Par ailleurs, l'étude détaillée de la porosité de ces matériaux révèle que les pores de taille inférieure à 2 nm jouent un rôle crucial dans l'augmentation de la température d'ébullition, une corrélation linéaire nette ayant été mise en évidence (Figure 2b).

L. Jimenez-Lopez¹, J. Park², R. Morales Ospino¹, A. Celzard¹, H. Oh² et V. Fierro¹.

¹ IJL_ Laboratoire du projet SOLHYD

² UNIST_ Laboratoire collaborateur en Corée du Sud

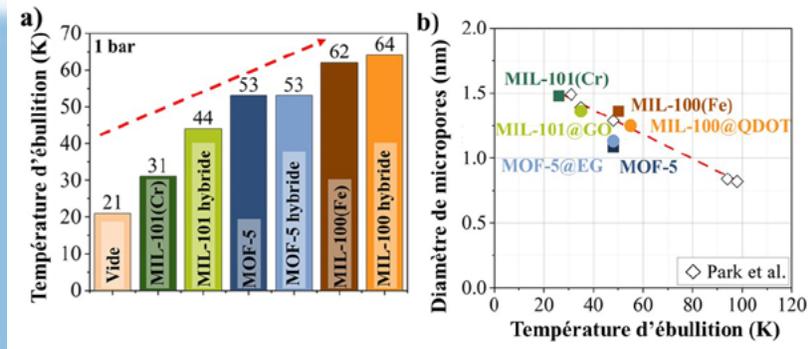


Figure 2 : a) Température à laquelle une pression de 1 bar est atteinte pour les différents matériaux étudiés, comparée à celle d'un réservoir vide b) Diamètre moyen des micropores en fonction de la température d'ébullition. Les symboles vides sont ceux de Park et al (2022, <https://doi.org/10.1021/acsaem.2c01907>)

Une chimie virtuelle pour la modélisation de la combustion de l'hydrogène

La cinétique chimique de la combustion met en jeu des centaines d'espèces réagissant à travers des milliers de réactions élémentaires. Si cette complexité est indispensable pour comprendre la dynamique des flammes et la formation des polluants, elle se révèle trop coûteuse en ressources de calcul pour des simulations appliquées à l'industrie. La réduction des schémas cinétiques est une étape incontournable pour concevoir les systèmes réactifs décarbonés de demain.

La chimie virtuelle : garder l'essentiel, sans perdre la précision

La chimie virtuelle développée au laboratoire EM2C (CNRS, CentraleSupElec, Paris-Saclay), propose de remplacer un schéma cinétique détaillé par un nombre très limité d'espèces et de réactions dites virtuelles. Les propriétés thermodynamiques et cinétiques de ces espèces sont optimisées par des algorithmes d'intelligence artificielle afin de reproduire fidèlement les caractéristiques des flammes de référence

contenues dans une base d'apprentissage.

Dès le lancement du projet MONTHY,

le laboratoire EM2C

avait ainsi développé des

schémas virtuels capables de

prédire la formation de polluants

majeurs tels que le monoxyde de

carbone, les oxydes d'azote et les particules de suie.¹

Mechanism V-0/1-H₂

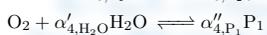
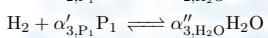
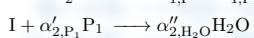
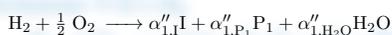


Figure 1. Exemple de schéma virtuel ultra-réduit, optimisé pour l'oxydation de l'hydrogène.

contenues dans une base d'apprentissage.

¹ <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111879>

Matthieu Prétesaille, Nasser Darabiha et Benoît Fiorina
EM2C_ Laboratoire du projet MONTHY

EN BREF

Découvrez les projets du PEPR-H2 en vidéo

La série vidéo «Les projets du PEPR-H2 à la loupe» est en ligne sur la chaîne YouTube du programme @PEPR HYDROGENE.

[En savoir plus](#)

Un nouveau formalisme, compatible avec les standards des logiciels de simulation industrielle

Dans le cadre du projet MONTHY, les fondements théoriques de la chimie virtuelle ont été entièrement repensés afin de s'aligner sur les formalismes thermodynamiques et cinétiques utilisés par la plupart des codes de CFD (Computational Fluid Dynamics) déployés dans l'ingénierie des systèmes réactifs industriels. L'implantation de la chimie virtuelle dans un code de CFD existant est ainsi triviale. Ces nouveaux schémas ultra-réduits (cf Fig. 1) offrent un compromis inédit : une précision comparable à celle de la chimie détaillée, pour un coût de calcul extrêmement faible, jusqu'à 80 000 fois plus rapide dans le cas de cinétiques chimiques complexes impliquant plusieurs centaines d'espèces.

De plus cette approche s'intègre facilement aux outils numériques existants pour simuler la formation des oxydes d'azote dans les flammes d'hydrogène. Elle est directement transposable à l'ensemble des combustibles décarbonés, qu'il s'agisse de biofuels, de e-méthane ou de carburants durables pour l'aviation. La performance de la chimie virtuelle est illustrée Fig. 2 pour la prédiction de vitesses de flamme.

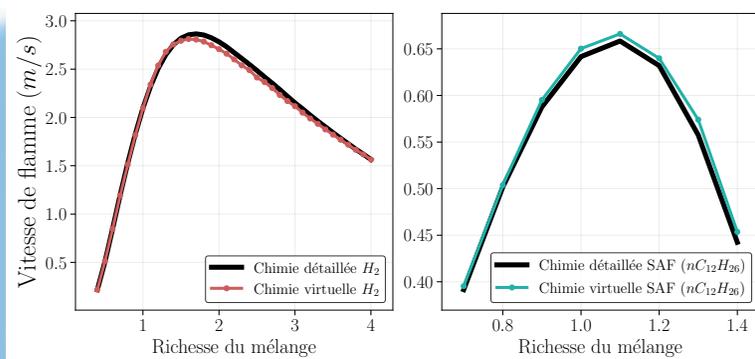
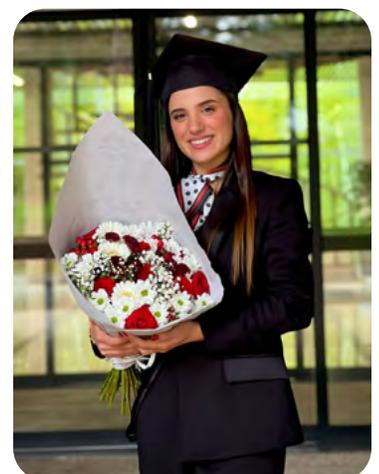


Figure 2 : Comparaison entre la chimie détaillée (courbe noire) et la chimie virtuelle (courbe couleur) pour le calcul de la vitesse de flamme laminaire d'une flamme prémélangée en fonction de la richesse. Gauche : hydrogène / air. Droite : Sustainable Aviation Fuel / Air © EM2C (M. Prétesaille)

1^{ère} thèse du PEPR-H2

Lozane Hamze a soutenu sa thèse intitulée « Synthesis and Characterization of Proton-Conducting Ceramic Electrolyte Materials for Hydrogen Production Devices by Water Electrolysis ». Ses recherches se sont faites dans le cadre du projet PROTEC.

[En savoir plus](#)



© Lozane Hamze





RISQUES GÉOPOLITIQUES LIÉS À LA CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT DE LA FILIÈRE HYDROGÈNE : UNE PERSPECTIVE POUR L'UNION EUROPÉENNE

En réponse aux bouleversements géopolitique et climatique, l'Union Européenne (UE) a accéléré sa transition énergétique, et promeut l'hydrogène propre issu de l'électrolyse de l'eau à partir d'électricité bas carbone. Cependant, les technologies développées dépendent de métaux critiques (Co, Pt, ...) ou de métaux stratégiques (Ni, ...), souvent provenant de quelques pays précis ce qui crée de nouveaux risques géopolitiques d'approvisionnement qui doivent être pris en compte pour une transition résiliente.



Approche méthodologique

Cette analyse utilise la méthode GeoPolRisk dont le résultat est basé sur deux facteurs clés : 1 la concentration de la production mondiale et le risque d'importation, pondéré par la stabilité politique des pays fournisseurs. Allant de 0 (pas de risque) à 1 (risque le plus élevé). Il reflète le degré de concentration, d'instabilité politique ou de restriction commerciale d'approvisionnement. Pour une année, une matière première et une région données, ce score est calculé selon :

$$GeoPolRisk_{Ac} = HHI_A * IR_{Aic} = HHI_A * \sum_i \frac{g_i * f_{Aic}}{P_{Ac} + F_{Ac}}$$

Où HHI_A est l'indice de Herfindahl-Hirschman pour le produit A, g_i est l'(in)stabilité géopolitique du pays i, f_{Aic} est le taux d'importation de A dans le pays c en provenance du pays i, F_{Ac} est le taux d'importation totale de A dans le pays c et P_{Ac} est la production domestique de A dans le pays c.

Les données de production proviennent de la base de données World Mining Data², les données sur le commerce sont tirées de l'ensemble de données BACI³, et l'indicateur de stabilité géopolitique est basé sur l'indice de stabilité politique et d'absence de violence (WGI-PV) fourni par la Banque Mondiale⁴, en utilisant une version transformée telle qu'adoptée dans la littérature antérieure⁵. La liste des matières premières utilisées dans les électrolyseurs est basée sur les travaux de Eikeng et al.⁶.

Nous examinons ci-dessous la transition des matières premières nécessaires aux technologies de production d'hydrogène d'origine fossile vers celles de quatre principaux électrolyseurs : alcalins, à membrane

échangeuse de protons, à oxyde solide, et à membrane échangeuse d'anions. L'évaluation couvre la période 2018-2022 et se concentre sur l'identification des points chauds importants et le suivi de l'évolution des profils de risque associés au fil du temps.

Principales constatations sur les risques géopolitiques liés à l'approvisionnement

La comparaison des risques d'approvisionnement entre les combustibles fossiles et les métaux utilisés dans les électrolyseurs est présentée dans la Figure 1. Les risques géopolitiques d'approvisionnement pour la plupart des métaux sont nettement plus élevés que ceux des combustibles fossiles. Le score du charbon à vapeur est plus élevé, principalement en raison de la concentration de sa production relativement forte par rapport aux autres combustibles fossiles. Plusieurs métaux présentent des profils de risque particulièrement élevés, notamment le cobalt, les terres rares et le niobium.

Environ 70 % de la production mondiale du cobalt provient de la République Démocratique du Congo (RDC). Cependant, en raison de l'instabilité politique persistante et des préoccupations en matière de droits humains, l'UE n'a cessé de réduire ses importations en provenance de la RDC depuis 2019, se tournant vers d'autres sources telles que la Chine, l'Afrique du Sud et la Namibie. Les terres rares posent un défi permanent. Alors que les importations de l'UE en provenance de Russie ont fortement chuté à la suite des sanctions de 2022, la position dominante de la Chine dans l'extraction et le traitement continue d'entraîner un risque d'approvisionnement élevé.

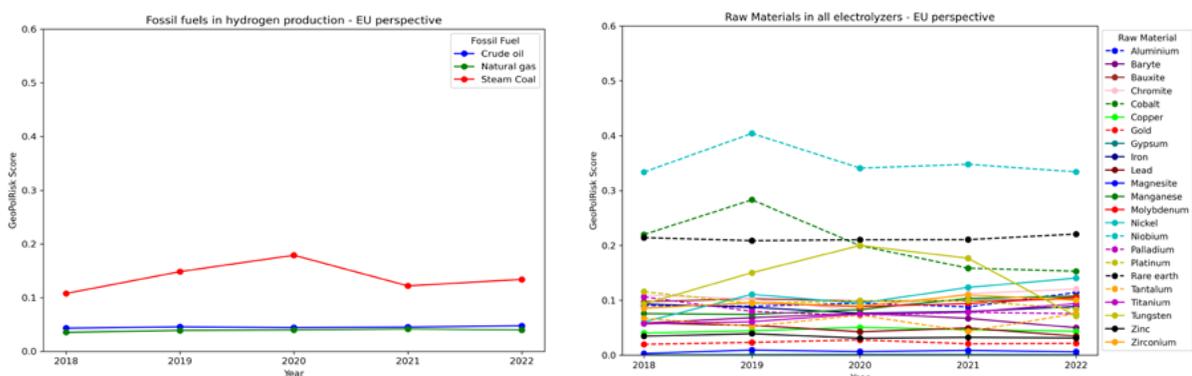


Figure 1 : Comparaison des risques d'approvisionnement entre les combustibles fossiles et les métaux utilisés dans les électrolyseurs © ISM (Bordeaux INP) CNRS | Univ Bordeaux



Le niobium présente le plus haut niveau de concentration de production parmi les métaux analysés, le Brésil étant la source principale. En 2019, son score a atteint un pic en raison des troubles politiques intérieurs combinés à la dépendance croissante de l'UE. Le platine affiche de faibles scores ; sa production est fortement concentrée en Afrique du Sud, mais ce risque est atténué par les efforts de l'UE pour diversifier ses fournisseurs. L'ensemble de ces exemples met en évidence la manière dont la concentration de la production, les facteurs géopolitiques et les choix d'approvisionnement influencent conjointement la vulnérabilité de l'Europe concernant les matières premières.

Conclusions et implications

Les électrolyseurs présentent un risque géopolitique d'approvisionnement plus élevé que les technologies basées sur les combustibles fossiles. L'approvisionnement de l'UE en matières premières critiques et stratégiques pour les chaînes de valeur liées à la fabrication d'électrolyseurs dépend principalement de sources provenant de Chine, d'Afrique du Sud et de Russie. Ce risque, associé à leurs coûts de fabrication ainsi que de production de l'hydrogène (i.e. électricité renouvelable), représente un frein au développement d'une filière souveraine décarbonée. Des réponses stratégiques doivent être apportées quant aux investissements dans le recyclage dès



Exemple d'utilisation de nickel pour la production d'hydrogène : cette photoanode composée de silicium est revêtue d'une couche de nickel.
© Jean-Claude Moschetti / ISCR/ CNRS Images

la conception des appareils, la diversification des stratégies d'approvisionnement et la substitution des matériaux pour renforcer la résilience et réduire la dépendance géopolitique.

Yi Li, Emmanuel Mignard et
Guido Sonnemann
Institut des sciences moléculaires (ISM)

Références :

- [1] <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107801>
- [2] <https://bmf.gv.at/en.html>
- [3] <https://doi.org/10.2139/ssrn.1994500>
- [4] <https://www.worldbank.org/en/publication/worldwide-governance-indicators>
- [5] <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102465>
- [6] <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.05.096>



LES ÉVÈNEMENTS À VENIR...

OCTOBRE 2025

- **1^{er} octobre - GRENOBLE**
Ouverture de l'appel à communication du congrès 2026 de la Fédération Française des Matériaux (jusqu'au 30 avril 2026)
<https://materiaux2026.org/>
- **6 - 10 octobre - FREJUS**
École VALOTHERBIO organisé par le GDR THERMOBIO
<https://thermobio.cnrs.fr/ecole-valotherbio/>
- **15 octobre - PARIS**
Séminaire PEPR-H2 : "Techniques d'infiltration pour matériaux de piles à combustible et électrolyseurs à oxyde solide"
contact@pepr-hydrogene.fr

NOVEMBRE 2025

- **5 - 6 novembre - PARIS**
Séminaire IA pour l'hydrogène du PEPR-H2
contact@pepr-hydrogene.fr
- **17 - 21 novembre - ANNECY**
Plénières de la FRH2 du CNRS
<https://frh2.sciencesconf.org/>

DÉCEMBRE 2025

- **4 décembre - BELFORT**
Forum Hydrogen Business For Climate
<https://hydrogenbusinessforclimate.com/>

THÈSES 2025

contact@pepr-hydrogene.fr

Le calendrier des thèses soutenues dans le cadre du PEPR-H2 est disponible sur le site web du PEPR Hydrogène.

[En savoir plus](#)

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

