



PROGRAMME
DE RECHERCHE
HYDROGÈNE

Newsletter
Mars 2024



Programme et Équipements Prioritaires
de Recherche Hydrogène décarboné



EDITO

Le Programme et Équipements Prioritaires de Recherche sur l'Hydrogène (PEPR-H2) a célébré sa deuxième année de lancement ce 12 Mars 2024 à Grenoble. L'assistance était nombreuse, avec plus de 195 participants provenant de structures étatiques (SGPI, Ministères...), d'organismes de recherche et de la filière (27 représentants).

Cet événement a été l'occasion d'informer sur la révision de la feuille de route nationale de l'hydrogène décarboné, de rappeler les orientations du programme et de mettre en avant les derniers résultats majeurs obtenus dans les différents projets.

Deux tables rondes sur « Les matériaux critiques/stratégiques pour les systèmes hydrogène avec des visions croisées industrie-recherche » et sur « les enjeux de sécurité dans les systèmes hydrogène » ont permis des échanges fructueux. Ce séminaire a été l'occasion pour les doctorant.es et post-doctorant.es du programme de présenter leurs premiers résultats. L'ensemble des présentations sera disponible sur simple demande à l'adresse : contact@pepr-hydrogene.fr.

Le dossier de cette lettre est consacré aux conclusions et orientations de sujets de recherche et développement issues des six ateliers industrie-recherche de la journée de valorisation organisée par la direction du programme le 24 Octobre 2023 à Paris.

Cette lettre met également un focus sur le projet d'électrolyse à membrane anionique DAEMONHYC avec des résultats prometteurs obtenus sur des anodes à base d'acier inoxydable, la formation d'une couche d'oxydes activant le dégagement d'oxygène. Les partenaires du projet NAUTILUS dédié à la production d'hydrogène solaire, démontrent qu'il est possible d'obtenir des photo-électrodes III-V/Si performantes. Le projet HYSYSPEM propose un convertisseur d'électronique de puissance modulaire pour l'intégration de piles PEMFC hybridées dans un véhicule lourd.

Enfin, le projet AIDHY d'aide à la décision, a réalisé une première évaluation d'impact climatique de différents moyens de stockage/transport de l'hydrogène.

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



LES ACTUALITÉS DES PROJETS DU PEPR-H2

Des électrodes à base d'alliage nickel-fer pour l'électrolyse de l'eau

Des photo-électrodes III-V/Si pour une production d'hydrogène solaire efficace à coût réduit

Rendre les systèmes PAC compétitifs pour le transport lourd

Evaluation environnementale de l'hydrogène



LE PEPR-H2 ORGANISE DES ATELIERS INDUSTRIE-RECHERCHE SUR DES AXES DE R&D À EXPLORER



LES ÉVÈNEMENTS À VENIR

MAI
JUIN 2024



LES ACTUALITÉS DES PROJETS DU PEPR-H2

Ce numéro s'intéresse aux projets de recherche de production et de conversion de l'hydrogène et aborde une première étude d'impact environnemental de son transport.

Des électrodes à base d'alliage nickel-fer pour l'électrolyse de l'eau

La production d'hydrogène à grande échelle par électrolyse de l'eau exige une importante disponibilité des matériaux constituant l'anode et la cathode de l'électrolyseur. L'électrolyse alcaline, contrairement aux technologies acides, permet de considérer l'utilisation de catalyseurs dérivés des métaux de transition qui sont relativement accessibles et abondants. Cette thématique est au cœur du projet **DAEMONHYC** qui se concentre sur le développement d'un électrolyseur à membrane anionique performant et durable. Dans ce contexte, il a été proposé d'utiliser en guise d'anode, pour le dégagement d'oxygène, des électrodes à base d'acier inoxydable. En effet, la grande disponibilité des principaux éléments le constituant (le fer, le nickel et le chrome) ainsi que leurs méthodes de production simples et maîtrisées rendent ces matériaux particulièrement attractifs pour une telle application.

Un procédé électrochimique simple en vue d'améliorer les performances des électrodes pour le dégagement d'oxygène

Mais l'intérêt des aciers inoxydables pour réaliser le dégagement d'oxygène réside surtout dans leur capacité à devenir de plus en plus performants au cours de leur utilisation. En effet, si des modulations de potentiel sont appliquées à cette électrode en deçà/au-dessus du potentiel de formation des oxydes, une réorganisation locale et progressive des atomes constituant l'acier va mener à la formation d'une couche catalytique de surface très active et efficace pour l'électrolyse de l'eau. Pour comprendre ce phénomène, une vaste étude présentée dans la revue *Nature Materials*^[1] s'intéresse plus largement à l'utilisation de différents alliages à

base de nickel et de fer pour le dégagement d'oxygène. Pour tous les alliages considérés, la couche catalytique formée suite aux variations initiales de potentiel en électrolyte alcalin était principalement constituée d'oxydes de nickel et de fer, avec un ratio directement corrélé à la composition initiale de l'alliage.

Des alliages initialement différents pour des performances finales similaires

Le point crucial de l'étude est qu'une utilisation prolongée de tels alliages pour le dégagement de l'oxygène en milieu alcalin va engendrer une modification conséquente de la composition de la couche d'oxydes formés. En particulier, tous les alliages vont tendre vers une même composition de surface en fer et en nickel (cf figure). C'est

par ailleurs pour ce ratio entre les atomes de fer et de nickel que des performances maximales pour le dégagement d'oxygène sont atteintes. Il apparaît alors que la composition initiale de l'alliage (et les modes de préparation des matériaux) ont peu d'influence sur les performances finales de l'électrode et, par conséquent, qu'une vaste gamme d'alliages nickel-fer peut être utilisée en tant qu'anode durable et efficace pour l'électrolyse alcaline

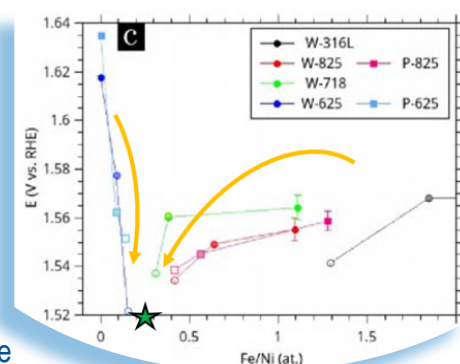


Figure 1 : évolution de l'activité pour le dégagement d'oxygène en fonction de la composition en surface de différents alliages – symboles pleins : état initial ; symboles creux : état vieilli (W : wires, P : plates) © LPMI

[1] <https://doi.org/10.1038/s41563-023-01744-5>

Garance Cossard (LEPMI) / Doctorante
Gwenaëlle Kéranguéven (ICPEES),
Eric Sibert, Marian Chatenet (LEPMI) /
Encadrants

Des photo-électrodes III-V/Si pour une production d'hydrogène solaire efficace à coût réduit

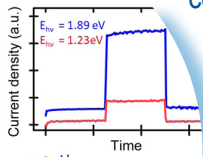
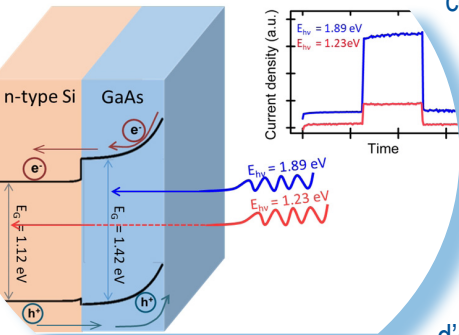
L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique constitue une réponse partielle aux enjeux de réchauffement climatique et de développement durable, à condition que l'hydrogène soit produit de manière décarbonée. L'énergie solaire, disponible en quantité à la surface du globe, peut être utilisée directement pour réaliser l'électrolyse de l'eau, sans apport d'énergie

extérieure, au sein de cellules photo-électrochimiques. Les semi-conducteurs III-V, qui sont réputés pour leurs très bonnes propriétés optiques dans le domaine de la photonique ou du photovoltaïque, restent des matériaux onéreux. Leur dépôt en couches très minces sur substrat de silicium, matériau très abondant sur terre, permet d'abaisser considérablement leur coût de production. Les partenaires du projet **NAUTILUS** ont pu démontrer cette année que non seulement il était possible d'obtenir des photo-électrodes III-V/Si avec le même niveau de performance que celles fabriquées à partir de semi-conducteurs III-V uniquement, mais qu'en plus, il était possible de contrôler avec une grande précision les niveaux d'énergie dans le matériau pour optimiser la circulation des charges dans les cellules photo-électrochimiques.



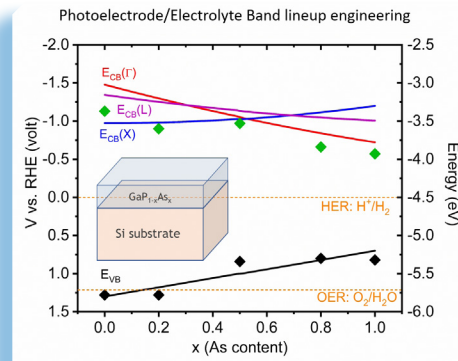
Extension du spectre solaire absorbé grâce aux photoélectrodes III-V/Si

Des photo-électrodes constituées de GaAs ($1\mu\text{m}$) déposé sur silicium ont d'abord été réalisées et étudiées en régime anodique par les partenaires du projet NAUTILUS, et leurs performances comparées à des photo-électrodes fabriquées à partir de substrats GaAs ($300\mu\text{m}$) commerciaux. Il a ainsi été démontré que les photo-électrodes GaAs/Si permettent d'obtenir un photo-courant aussi bon (et même légèrement meilleur) que celles réalisées à partir de substrats commerciaux nettement plus chers. Une analyse détaillée [1] révèle que cela est rendu possible d'une part par la photo-activité des deux semi-conducteurs GaAs et Si au sein de l'électrode, permettant d'étendre la partie du rayonnement solaire absorbé, et d'autre part par les bonnes propriétés de transport du courant électrique au sein du matériau III-V, en dépit des défauts cristallins présents.



Contrôle de l'injection des charges dans l'électrolyte

En utilisant des techniques d'épitaxie des matériaux, les partenaires du projet NAUTILUS ont ensuite pu démontrer que des alliages $\text{GaAs}_x\text{P}(1-x)$ déposés sur silicium pouvaient également être utilisés pour la photo-électrochimie [2]. Plus précisément, il a été démontré qu'il était possible, grâce au contrôle précis de la composition de l'alliage, d'aligner sur mesure les niveaux d'énergie du matériau sur ceux de l'électrolyte, permettant ainsi d'optimiser l'injection des charges électriques de la photo-électrode vers l'électrolyte. De manière générale, ces résultats démontrent le potentiel de développement de photo-électrodes III-V/Si efficaces et à un coût abordable pour la production d'hydrogène solaire.



- [1] <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.112138>
 [2] <https://doi.org/10.1039/d3tc02556j>

Charles Cornet
 Coordinateur du projet NAUTILUS

Rendre les systèmes PAC compétitifs pour le transport lourd

Dans l'objectif d'électrifier et de décarboner le transport lourd de type fluvial et terrestre, l'utilisation de piles à combustible (PAC) alimentées en hydrogène est une solution grandement étudiée. Les véhicules thermiques actuels répondent à de nombreuses contraintes industrielles, économiques et normatives, et ont depuis longtemps été optimisés pour leur application. L'objectif du projet **HYSysPEM** est de proposer une nouvelle architecture d'alimentation électrique pour des véhicules roulants ou navals avec les mêmes performances que les véhicules thermiques d'aujourd'hui. Les objectifs prépondérants du projet portent sur le développement de structures modulaires hybridées, adaptables en fonction du cahier des charges et des conditions de fonctionnement de chaque PAC.

Hybrider pour lisser la puissance des PACs

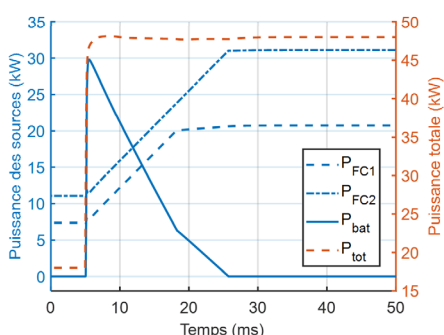


Figure 1 : Exemple de réponse d'un système hybride composé de deux PAC limitées en gradient de puissance. © LEMTA / IREENA

La dynamique lente de variation des débits de fluides

fait que la puissance d'une PAC ne peut varier instantanément. L'hybridation avec d'autres organes de puissance permet de lisser cette contrainte durant les phases d'accélération et de décélération du véhicule (figure 1). Les batteries sont souvent utilisées comme source d'hybridation pour fournir ou absorber l'énergie des transitoires rapides du moteur. Pour gérer les flux de puissance échangés entre les batteries, les PAC, le système de propulsion et les auxiliaires, il est nécessaire d'utiliser un convertisseur d'électronique de puissance.

L'électronique de puissance au service de la modularité

Associer l'électronique de puissance avec une logique de modularité permet une optimisation globale du système pour réduire la consommation d'hydrogène sur un profil de mission (figure 2). La modularité permet d'adapter le dimensionnement à n'importe quel cas d'application et facilite la maintenance. De plus, les caractéristiques électriques de chaque PAC sont uniques et l'électronique développée permet de s'adapter à ces différences pour optimiser le rendement et la durée de vie des PAC. Enfin, un fonctionnement en mode dégradé est toujours possible en cas de perte d'un sous-système augmentant ainsi la fiabilité globale.

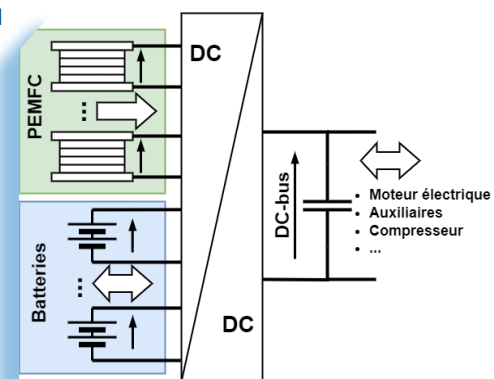


Figure 2 : Schéma de principe d'électronique de puissance modulaire hybridée qui alimente le bus continu d'un véhicule de transport lourd. © LEMTA / IREENA

Emeric Vuillemin¹, Jean-Philippe Martin¹, Mohamed Machmoum²,
 Farid Meibody-Tabar¹, Serge Pierfederici¹
¹LEMTA – Nancy, ²IREENA – Saint-Nazaire



Evaluation environnementale de l'hydrogène

Le projet **AIDHY** vise à mieux caractériser et comprendre les enjeux, les opportunités et les risques autour des projets d'hydrogène décarboné et de juger du niveau de soutenabilité et de responsabilité sociétale de ces derniers. Dans ce but et parmi les différentes méthodologies d'évaluation utilisées dans le projet, l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) établit l'évaluation environnementale des systèmes liés à la filière hydrogène. C'est une méthode normée (ISO 14040/44) qui détermine les émissions du système sur l'ensemble de son cycle de vie, i.e. fabrication, transport, usage et fin de vie. De nombreuses études se sont concentrées sur les impacts environnementaux de différentes solutions de production ou d'usage de l'hydrogène, mais peu ont été réalisées sur la chaîne d'approvisionnement, du site de production à la station de ravitaillement (HRS), en intégrant le stockage et le transport.

L'exemple de son stockage

Ainsi, l'évaluation environnementale de quatre options de stockage et de distribution de l'hydrogène pour une distance de transport de 500 km, a été effectuée. Elle comprend le transport par camion (A) ou par pipeline (B) sous forme de gaz comprimé ; le transport sous forme de liquide cryogénique (C) ; et le transport chimique dans un liquide organique porteur d'hydrogène ou LOHC de type dibenzyltoluène (D).

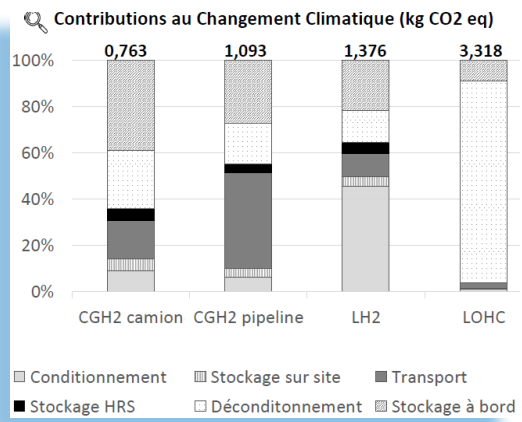


Figure2 © ISM

L'unité fonctionnelle est 1 kg d'hydrogène stocké, transporté et distribué sur site. En modélisant avec OpenLCA et en utilisant la base de données Ecoinvent 3.5 avec la méthode de caractérisation ReCiPe 2016, stocker et transporter l'hydrogène sous forme de gaz comprimé est l'option qui génère le moins d'impacts environnementaux. L'option A présente de meilleurs résultats que la B alors que le stockage par LOHC (D) montre les moins bonnes performances environnementales. Par exemple, l'impact sur le changement climatique est de 0,76 ; 1,09 ; 1,38 et 3,32 kg eq CO₂/kg H₂ pour les options A, B, C et D respectivement (figure 1). L'étape de déshydrogénation du LOHC contribue à environ 90% de son impact (figure 2). Son optimisation permettrait de réduire l'impact de cette option.

Accompagnée des analyses du cycle de vie sociale et de coût sur un même système, une évaluation de la durabilité peut être formulée, et en parallèle d'évaluations du risque et du cadre juridique une évaluation multicritère pourrait être effectuée.

Salma SERGHINI (ISM), Doctorante
Emmanuel MIGNARD (ISM), Encadrant

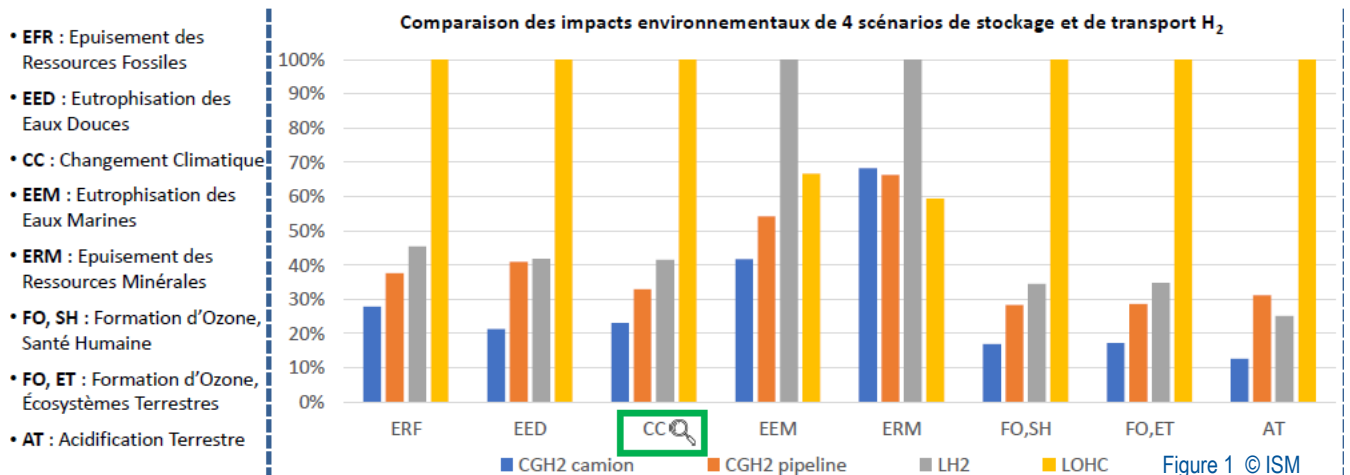


Figure 1 © ISM

EN BREF

Publication d'un appel à projets franco-allemand

En accord avec les stratégies nationales respectives de l'Allemagne et de la France pour accélérer le développement et le déploiement des technologies propres de l'hydrogène, le BMBF et le MESR (via l'ANR) lancent un appel à projets sur « le développement de la filière hydrogène pour le futur mix énergétique ». Date limite de dépôt 6 Mai 2024 <https://anr.fr/fileadmin/aap/2024/aap-dvh2-2024.pdf>

Colloque PFAS du CNRS

Le colloque « PFAS : enjeux et alternatives », co-organisé par la Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires (MITI) et la Direction des relations avec les entreprises (DRE) du CNRS, a réuni les 27/28 mars à Paris plus de 200 personnes d'horizons divers. Il a pour objectif de servir de point de départ à de nouveaux projets de recherche couvrant la détection, la remédiation et les alternatives aux PFAS, en associant les entreprises, dans le cadre d'un appel à projets qui sera lancé par le CNRS courant 2024. <https://miti.cnrs.fr/evenement-scientifique/colloque-pfas-enjeux-et-alternatives/>

Le PEPR-H2 présent à Hyvolution

Le totem du PEPR exposé sur le stand du CEA a attiré l'attention de nombreux visiteurs qui se sont renseignés sur les travaux de recherche menés dans le cadre du programme. Le PEPR a également été évoqué lors du lancement officiel du projet de prématuration/maturation H2DEC en présence du coordinateur de la stratégie nationale de l'hydrogène décarboné.

<https://www.sayens.fr/actualites/sayens/retour-hyvolution-2024/>





LE PEPR-H2 ORGANISE DES ATELIERS INDUSTRIE-RECHERCHE SUR DES AXES DE R&D À EXPLORER

A l'occasion de sa journée de valorisation, le PEPR-H2 a organisé six ateliers dont les thèmes avaient été préalablement choisis à l'issue d'une enquête menée auprès des acteurs de la filière, avec pour objectif d'identifier des sujets de R&D à amplifier ou à initier en croisant les besoins de la filière et l'expertise des chercheurs.



Accelerated Stress Tests (D. Hissel CNRS – FEMTO-ST)

Pour garantir des durées de vie de systèmes hydrogène reposant sur des technologies PEM, alcalines, ou hautes températures, il est indispensable de disposer de protocoles de tests de vieillissement accéléré représentatifs et corrélés sur l'usage.

Ces protocoles seront développés en s'appuyant sur la compréhension des mécanismes de vieillissement mis en jeu, les enjeux scientifiques étant d'accélérer les phénomènes sans en changer la nature. La combinaison de modélisation et d'analyses post-mortem des composants « vieillis » permettra de valider les modèles et in fine de proposer des protocoles par type d'usage envisagé. L'accélération recherchée se fera en lien avec les contraintes et le contexte de l'exploitation. Elle permettra de réduire les coûts des tests, d'accélérer le temps de mise sur le marché des produits et d'estimer la garantie à proposer au client final.

Remplacement des PFAS (S. Rosini CEA - LITEN)

Les matériaux présents dans les technologies H₂ et concernés par la réglementation sur la restriction d'usage des PFAS sont utilisés pour les étanchéités, comme revêtement anticorrosion ou antiabrasif, comme membrane de séparation/purification et comme conducteur ionique dans les composants électrochimiques.

Les discussions ont porté sur la possibilité de trouver des matériaux alternatifs et sur les moyens de diminuer leur empreinte environnementale tout au long de leur cycle de vie.

Alors que des solutions alternatives semblent accessibles pour l'étanchéité, leur remplacement dans les électrolytes/électrodes est beaucoup plus complexe et nécessitera d'importants efforts de recherche.

Sur l'aspect environnemental, il faudrait initier des études pour déterminer la nature exacte des produits de décomposition, leurs concentrations dans les effluents

en cours de fabrication et d'usage, et développer des procédés de traitement en fin de vie permettant leur recyclage.

Couplage électrolyseur-source de production (R. Roche CNRS – FEMTO-ST)

L'étude de ce couplage qui a pour objectif la baisse du coût de l'hydrogène produit, se décompose en deux domaines :

- ▶ augmenter les performances et la durabilité des électrolyseurs en tenant compte des variations de puissance liées au fonctionnement de la source, des contraintes systèmes et des possibilités de lissage des fluctuations par des convertisseurs de puissance ou en incluant un stockage.
- ▶ anticiper les problèmes liés au passage à l'échelle (>1 MW) en développant des systèmes de contrôle et de supervision des installations de production capables de gérer des variations de production et de consommation, avec leurs incertitudes, des incidents potentiels, et de multiples sources de revenus (vente H₂, services système, etc.). Parmi les solutions à étudier: une architecture hybride avec stockage, ou une forte modularité impliquant plusieurs possibilités de pilotage et des stratégies de compromis entre performances et vieillissement.



Daniel Hissel (CNRS - Femto-ST) anime l'atelier «Accelerated Stress Tests» lors de la journée de valorisation du PEPR-H2



Électrolyse en milieu salin (JP Poirot CEA - LITEN)

La technologie d'électrolyse saline fait l'objet de travaux de recherche avec deux approches : injection directe d'eau de mer dans l'électrolyseur, ou désalinisation avant injection.

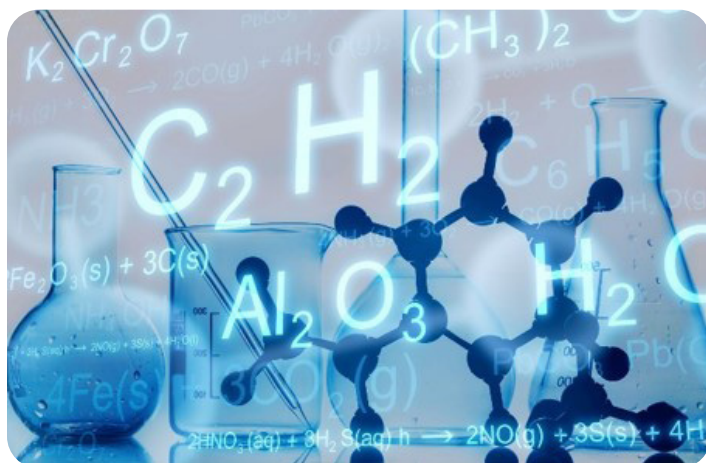
Le coût énergétique et les coûts CAPEX et OPEX de la désalinisation apparaissant faibles par rapport à ceux de l'électrolyse elle-même, la question du besoin de développer une technologie d'électrolyse directe en milieu salin se pose.

En conséquence, les participants de l'atelier proposent d'orienter la R&D sur la marinisation des électrolyseurs et des piles à combustible en étudiant plus particulièrement les effets de chargements mécaniques propres à l'embarqué, et de pollution par environnement salin.

Ammoniac (C. Coutanceau CNRS - IC2MP)

Pour la fabrication d'ammoniac, des procédés électrochimiques, assistés par les photons ou la température, sont généralement proposés comme alternatives au procédé Haber-Bosch réputé énergivore et polluant. Les industriels penchent pour un process conservant Haber-Bosch tout en décarbonant l'hydrogène en amont via des (co)-électrolyseurs HT. Ils recommandent d'utiliser directement l'ammoniac dans des moteurs à combustion ou des SOFC. L'ammoniac liquide a été jugé important pour la logistique de l'hydrogène dans les derniers kilomètres.

Il faut également prendre en compte les aspects risques de pollution, de sécurité, de corrosion, de toxicité et celui de l'acceptation de l'ammoniac à grande échelle par les industriels et les citoyens.



Sécurité hydrogène (N. Chaumeix CNRS - ICARE)

Les caractéristiques propres à l'hydrogène, gaz léger à diffusivité élevée, faible énergie d'inflammation et grande vitesse de flamme, doivent être intégrées dans l'évaluation et la gestion de risques aussi variés que les fuites, la dispersion qui en découle à l'air libre ou en milieu confiné, le risque d'inflammation (allumage immédiat ou retardé), et la perte d'intégrité suivi d'un éclatement en cas de suppression.

Les discussions ont fait ressortir la nécessité de disposer de normes spécifiques à l'hydrogène (définition de distances de sécurité, de zones de danger, ...), de détecteurs adaptés, d'outils de dimensionnement des composants en fonctionnement normal et en situation accidentelle et de méthodes de mitigation associées aux différents risques.

Hélène Burlet, directrice scientifique CEA du PEPR-H2
Abdelilah Slaoui, directeur scientifique CNRS du PEPR-H2



LES ÉVÈNEMENTS À VENIR...

MAI 2024

- **26 - 31 mai - SAINT-MALO**
18th International Symposium on Metal-hydrogen systems
<https://mh2024.org/>
- **27 - 31 mai - STRASBOURG**
EMRS Spring Meeting Strasbourg
<https://www.european-mrs.com/meetings/2024-spring-meeting>

Calendrier de H2 Today :

<https://hydrogentoday.info/calendrier-des-evenements-hydrogene/>

Directeurs de la rédaction	Hélène Burlet et Abdelilah Slaoui
Comité éditorial	Hélène Burlet, Abdelilah 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, adobestock, PEPR-H2, CEA	

JUIN 2024

- **16 - 21 juin - PRAGUE**
23rd International Conference on Solid Compounds of Transition Elements
<https://www.scte2024.org/>
- **18 - 21 juin - DIJON**
7th international workshop «Prospects on protonic ceramic cells» - PPCC24
<https://www.ispc2.org/prospects-on-protonic-ceramic-cells/>
- **22 - 24 juin - NUREMBERG**
Electrocatalysis in Complex Structures 2024
<https://www.hi-ern.de/en/events/electrocatalysis-conference-2024>
- **25 juin - DIJON**
Remise des Prix France Hydrogène
<https://www.france-hydrogene.org/event/77401/>
- **24 - 26 juin - GRENOBLE**
GDR Solar fuels
<https://solar-fuels-pes.sciencesconf.org/>

