

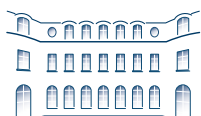
Jeudi 13 Juin 2019



**HYDROGÈNE  
DÉCARBONÉ**

*Enjeux et solutions ?*

**Recueil des résumés**







En dépit d'annonces récurrentes quant à son utilisation comme vecteur énergétique universel, l'hydrogène est resté cantonné, jusqu'à une date récente, à des applications certes importantes en tonnage, mais restreintes : raffinage du pétrole, synthèse de l'ammoniac et du méthanol.

Le caractère prématuré de ces annonces résultait d'un développement insuffisant des technologies requises pour que l'hydrogène joue un rôle majeur dans la transition énergétique, en s'appuyant sur sa qualité essentielle : sa « combustion » qui ne produit que de l'eau.

Le plan National Hydrogène, publié le 1er Juin dernier, a donné une impulsion majeure au développement de l'hydrogène en France. Le but du présent colloque est de présenter l'état de l'art des technologies industrielles proposées ou en développement pour, d'une part la production d'hydrogène décarboné, d'autre part, l'utilisation de cet hydrogène propre en substitution partielle ou totale des énergies fossiles dans leurs divers domaines d'intervention.

## PROGRAMME

09h30 - 09h35 **Introduction** : Fondation internationale de la Maison de la Chimie (FMdC).

09h35 - 10h05 Le rôle de l'hydrogène dans la transition énergétique.  
**Philippe BOUCLY**, Président • AFHYPAC

### Session 1 : Production.

10h05 - 10h20 H2 bas carbone, captage et séquestration du CO2.  
**Bruno SEILHAN**, Vice-Président CO2 • TOTAL S.A.

#### 10h20 - 11h05 **Électrolyseurs**

Les grosses plateformes d'Électrolyse Alcaline sont désormais capables de concurrencer le reformage à la vapeur de Gaz Naturel pour produire de l'hydrogène propre au service de la transition écologique.

**Pascal MAUBERGER**, Président Directeur Général • McPhy Energy

L'électrolyse PEM, une brique stratégique au cœur de la transition énergétique. **Pascal PEWINSKI**, Directeur Général • AREVA H2gen

Électrolyse de la vapeur d'eau à haute température.

**Julie MOUGIN**, Chef du Laboratoire des Technologies Hydrogène • CEA/LITEN

11h05 - 11h25 Pause-café

11h25 - 11h40 Pyrogazéification et Thermolyse/Vapocraquage de la biomasse.  
**Philippe HAFFNER**, Président • HAFFNER ENERGY

#### 11h40 - 12h25 **Les voies en développement**

La production d'hydrogène par voie photo(electro)catalytique solaire : enjeux et verrous.

**Valérie KELLER**, Directrice de Recherche CNRS • ICPEES, CNRS Strasbourg

Décarbonation Directe du méthane par plasma thermique.

**Laurent FULCHERI**, PERSEE, Centre Procédés, Énergies Renouvelables et Systèmes Énergétiques • MINES ParisTech

Hydrogénases et catalyseurs bioinspirés.

**Marc FONTECAVE**, Professeur au Collège de France  
Membre de l'Académie des Sciences

12h25 - 13h00 Débat animé par **Dr. Marc J. LEDOUX**, Directeur de Recherche, CE Em du CNRS, Université de Strasbourg • FMdC

13h00 - 14h00 Déjeuner



Session 2 : Utilisation de l'Hydrogène décarboné.

14h15 - 15h45

Quelle Supply Chain pour l'hydrogène mobilité ?

**Cecilia FOUVRY RENZI**, Directeur Supply Chain • AIR Liquide

L'hydrogène et les piles à combustible PEM :

Une solution pour relever les défis de la transition énergétique.

**Serge BESSE**, Responsable Service Recherche & Technologie • AREVA SE

Hydrogène et cogénération :

pour réussir la transition énergétique dans le secteur résidentiel-tertiaire.

**Nicolas BARDI**, Président • Sylfen

Pile à hydrogène et mobilité : où en est-on ? Où va-t-on ?

**Julien BRUNET**, Project Manager • Symbio

Injection d'hydrogène dans les réseaux de transport de gaz naturel :

Quelles possibilités ? Quelles conditions ?

**Anthony MAZZENGA**, Directeur Gaz Renouvelables • GRTgaz

Déploiement des carburants alternatifs renouvelables :

critères économiques et environnementaux.

**François KALAYDJIAN**, Economics & Technology Intelligence • IFP  
Énergies Nouvelles

15h45 - 16h15

Débat animé par **Dr. Marc J. LEDOUX**, Directeur de Recherche,  
CE Em du CNRS, Université de Strasbourg • FMdC

COMITÉ DE PILOTAGE

Philippe **BOUCLY** • Président AFHYPAC - GRTgaz

Pascale **BRIDOU BUFFET** • Fondation internationale de la Maison de la Chimie

Édouard **FREUND** • Fondation internationale de la Maison de la Chimie

François **Le NAOUR** • Renewable Energy Program Manager - CEA Grenoble

Marc J. **LEDoux** • Fondation internationale de la Maison de la Chimie

Patrice **MEHEUX** • Société Française de Génie des Procédés (SFGP)

Margaret **VARKADOS-LEMARECHAL** • Fondation internationale Maison de la Chimie







## Hydrogène et cogénération : pour réussir la transition énergétique dans le secteur résidentiel-tertiaire.

Nicolas BARDI

*Président Sylfen - Grenoble*

Le secteur résidentiel et tertiaire représente généralement un gros tiers de la consommation énergétique des pays développés, et des émissions de gaz à effet de serre associées, devant les secteurs des transports, de l'industrie et de l'agriculture. Les bâtiments sont consommateurs d'énergie électrique, d'autant plus que les usages des technologies de l'information se développent, mais également d'énergie thermique que ce soit pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire, ou inversement pour la climatisation.

Sauf dans les centres-villes historiques ultra-denses, où l'intensité de la consommation énergétique rend illusoire les stratégies de territoires à énergie positive, le développement des énergies renouvelables et notamment le solaire, l'éolien, parfois la petite hydroélectricité et la production de biogaz offrent un potentiel local de production d'énergie largement suffisant pour couvrir les besoins. Ces logiques d'autoproduction, de l'échelle du bâtiment collectif à celle de l'écoquartier, du campus, de la zone d'activité ou de l'agglomération, se développent rapidement à l'échelle mondiale, en conjonction avec les smart-grids électriques.

Associer les batteries, dont le coût baisse rapidement, pour un stockage électrique de court terme, et l'hydrogène pour stocker de grandes quantités d'énergie sur plusieurs semaines, est une solution aujourd'hui viable pour capter localement les surplus d'énergie électrique. Valoriser en cogénération (électricité et chaleur), au plus proche du besoin, cet hydrogène renouvelable associé au gaz naturel ou au biogaz issu de la méthanisation, permet d'accroître de façon spectaculaire la capacité des écosystèmes énergétiques locaux à autoproduire leur énergie.

Quelle que soit l'échelle considérée, une stratégie de production et consommation locale d'énergie incite aux économies d'énergie et l'optimisation de la demande. Le reste à acheter, auprès de moyens centralisés de production d'électricité ou de chaleur, diminue de façon drastique, de même que les émissions de CO<sub>2</sub> associées.

À coût équivalent voire inférieur aux solutions traditionnelles, les solutions hybrides associant hydrogène et pile à combustible, gaz naturel et batteries offrent un chemin pour réussir la transition énergétique dans le secteur des bâtiments.

**Mots Clés :** Pile à combustible réversible rSOC, Hydrogène, Méthane, Cogénération, Bâtiment.



## L'hydrogène et les piles à combustible PEM : Une solution pour relever les défis de la transition énergétique.

Serge BESSE<sup>a\*</sup>, André RAKOTONDRAINIBE<sup>b</sup>, Franck VERBECKE<sup>c</sup>

<sup>a\*</sup> Responsable Service Recherche & Technologie, AREVA Stockage Énergie

<sup>b, c</sup> AREVA Stockage Énergie - Aix en Provence

Dans un contexte où le paysage énergétique est en pleine mutation et où les mix énergétiques se transforment en profondeur intégrant des parts croissantes de sources d'énergies renouvelables intermittentes, le stockage de l'énergie et les solutions de production d'électricité renouvelable pourraient contribuer à faire face à cette transition énergétique et à la demande croissante de flexibilité.

La pile à combustible est, depuis de longues années, identifiée comme une des solutions qui permettrait de participer à cette révolution énergétique. À son intérêt environnemental, à condition que les combustibles qu'elle utilise ne soient pas issus de ressources fossiles, s'ajoute l'absence d'émission de polluants et un rendement théorique élevé (supérieur à celui du moteur thermique).

Même s'il existe encore un frein économique au déploiement industriel de la pile à combustible, cette technologie commence à atteindre une certaine rentabilité sur plusieurs marchés et la mise en place de mécanismes d'aides à l'investissement pourrait en accélérer le développement rapide comme cela a été le cas pour les industries de l'éolien et du solaire PV. Il faut rappeler que cette technologie est ancienne dans sa démonstration mais elle reste très jeune dans son développement industriel. Ainsi un certain nombre de verrous technologiques ont été bien identifiés et leur levée a permis d'accéder à un domaine de performance plus important et d'accélérer ainsi la phase d'industrialisation.

Il faut ajouter par ailleurs la levée de verrous sociétaux à travers l'évolution de la réglementation et des normes, une action sur l'acceptation sociétale et enfin la disponibilité d'une infrastructure de distribution d'hydrogène.

AREVA SE est engagé depuis plusieurs années dans une phase d'industrialisation de ses produits et les efforts principaux portent maintenant sur la réduction des coûts des composants des systèmes pile à combustible. Plus généralement les travaux menés visent au dimensionnement optimal de la chaîne énergétique hydrogène-pile à combustible, répondant aux différents cahiers des charges des utilisateurs avec des coûts de réalisation comparables aux technologies concurrentes.

La réduction des coûts exige le développement de nouveaux matériaux, la mise en place de procédés de fabrication optimisés et enfin des études de conception qui permettent de diminuer les coûts de réalisation. Pour favoriser l'efficacité de la filière d'approvisionnement, les entreprises spécialisées dans la conception de piles à combustible et l'intégration de systèmes doivent donc normaliser les spécifications des composants. Une véritable compétition internationale est engagée dans ce domaine, avec des enjeux énergétiques, environnementaux et économiques importants.

Lors de ce colloque nous présenterons les derniers résultats obtenus avec les nouvelles générations de pile à combustible PEM développées chez ASE pour plusieurs types d'applications.

**Mots Clés :** Hydrogène, Pile à combustible, Système énergétique, Production électrique.



## L'hydrogène, un atout majeur pour réussir la transition énergétique.

Philippe BOUCLY

Président, AFHYPAC - Paris

L'étude prospective menée en début 2018 par l'AFHYPAC et un groupement de dix industriels avec l'aide analytique du cabinet McKinsey a montré le rôle que pouvait jouer l'hydrogène dans la transition énergétique pour contribuer à développer et intégrer dans les systèmes énergétiques les énergies renouvelables (par essence variables) ainsi que pour décarboner des différents secteurs de l'économie : les transports, l'industrie et les bâtiments.

L'année 2018 a constitué un jalon majeur pour la filière française de l'hydrogène : le 1er juin 2018, le Ministre d'État Nicolas Hulot a en effet présenté un Plan National Hydrogène avec des objectifs chiffrés sur trois axes :

- Dans l'**industrie**, 10 % d'hydrogène décarboné dans l'hydrogène industriel d'ici à 2023, entre **20 à 40 %** d'ici 2028.
- Pour les **transports**, **5 000** véhicules utilitaires légers et **200** véhicules lourds (bus, camions, trains, bateaux) et construction de **100** stations à l'horizon 2023 et **20 000 à 50 000** véhicules utilitaires légers, **800 à 2 000** véhicules lourds et de **400 à 1 000** stations à l'horizon 2028
- le **stockage** des énergies renouvelables, notamment dans les Zones Non Interconnectées.

Dès le deuxième semestre 2018, la mise en œuvre a démarré au travers de trois composantes : des engagements pour la croissance verte (ECV), le Comité Stratégique de filière « Industries des Nouveaux Systèmes Energétiques » et le lancement d'appels à projets par l'ADEME selon les trois axes du Plan.

En outre, les objectifs du Plan National Hydrogène ont été repris dans la présentation de la Programmation Pluriannuelle de l'Energie.

L'objectif est de créer une filière française de l'hydrogène compétitive. Pour ce faire, il est impératif de réunir les conditions d'amorçage des marchés. Cela nécessite en particulier de faire baisser les coûts de technologies certes matures mais encore chères. Cette baisse des coûts ne peut être atteinte que par la massification qui permettra l'industrialisation à l'instar de ce qui a été réalisé dans d'autres technologies émergentes. En parallèle, de nouveaux modèles de véhicules devront être produits et des efforts de recherche et développement devront être poursuivis dans des domaines tels que les piles à combustible, l'électrolyse à haute température, de nouveaux modes de production de l'hydrogène décarboné ou les procédés de décarbonation de l'industrie, sidérurgie ou cimenterie par exemple.

Il est également nécessaire d'améliorer le cadre législatif, réglementaire et régulateur sur des sujets tels que par exemple la production d'hydrogène par électrolyse, le coût de l'électricité, l'injection dans les réseaux de gaz naturel, la transposition de la directive RED2 (relative aux énergies renouvelables) ainsi que l'établissement d'un cadre de garanties d'origine ou la révision de la directive sur les infrastructures de combustibles alternatifs.

Enfin, pour que les projets se développent, il est fondamental de **sécuriser les financements**, ce qui implique notamment de rechercher des schémas de couverture de risques dans le cadre de partenariats public-privé.



**Références :**

*Etude « Développons l'hydrogène pour l'économie française » réalisée avec le concours analytique de McKinsey pour l'AFHYPC, Air Liquide S.A., Alstom, le CEA, EDF, Engie S.A., Faurecia, Groupe Michelin, Hyundai Motor Company France, Plastic Omnium, SNCF, Total S.A., Toyota Motor Europe, France , 4 avril 2018*

[http://www.afhypac.org/documents/actualites/pdf/Afhypac\\_Etude%20H2%20Fce\\_VDEF.pdf](http://www.afhypac.org/documents/actualites/pdf/Afhypac_Etude%20H2%20Fce_VDEF.pdf)

*Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique, Ministère de la Transition écologique et solidaire, 1<sup>er</sup> juin 2018*

[https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Plan\\_deploiement\\_hydrogene.pdf](https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Plan_deploiement_hydrogene.pdf)

*Projet phare du CSF Nouveaux systèmes énergétiques « Le développement d'une industrie de production d'hydrogène décarboné », Conseil National de l'Industrie, 22 novembre 2018*

<https://www.economie.gouv.fr/files/files/PDF/2018/dp-cni-221118.pdf>

**Mots Clés :** Hydrogène, Transition énergétique, Énergies renouvelables, Décarbonation, Industrie.



## Pile à hydrogène et mobilité : où en est-on ? Où va-t-on ?

Julien BRUNET

*Project Manager, Symbio - Paris*

Renault Kangoo ZE H2, Hyundai Nexo, Toyota Mirai, bus Safra et Van Hool... quelques centaines de véhicules électriques hydrogène circulent aujourd'hui en France. Ils devraient être quelques milliers dès 2023 et quelques dizaines de milliers en 2028, selon le Plan National Hydrogène annoncé par le gouvernement en juin 2018. Dans le monde, des pays comme le Japon, la Corée, la Chine, ainsi que l'État de Californie mettent en place des politiques encore plus ambitieuses en matière de mobilité hydrogène.

Trois facteurs majeurs expliquent cette accélération, qui peut paraître soudaine - la technologie de la pile à hydrogène est en effet simple (un empilement de cellules électrochimiques) et les premiers prototypes de véhicules à hydrogène datent de 1966 ! Premier facteur : les cadres législatifs et réglementaires, au niveau national, européen et mondial, ont évolué pour lutter contre le réchauffement climatique, la pollution, et pour favoriser le développement des énergies renouvelables. Le second facteur est une compréhension de plus en plus partagée de la complémentarité entre mobilité électrique à batterie seule et mobilité hydrogène pour répondre à un plus grand nombre d'usages (le prix du stockage d'hydrogène dans les véhicules est compétitif pour les gros consommateurs d'énergie). Troisième facteur enfin : la mise en place des indispensables règles de sécurité autour des stations-service et des véhicules, définies au niveau international.

Aujourd'hui, le principal défi de la mobilité électrique hydrogène n'est pas technologique - même si l'amélioration des réservoirs et la réduction des quantités de platine permettra de réduire les coûts. Il est économique : quels sont les modèles d'affaires qui permettent de multiplier les stations sur le territoire, de réduire le prix de l'hydrogène (décarboné, puis « vert ») et des véhicules, tout en attirant les investisseurs privés - bref, de franchir un cap en termes de volumes ? Quels financements mettre en place ? Pouvoirs publics et acteurs de la mobilité hydrogène avancent de concert sur ces questions.

**Mots clés :** Pile à hydrogène, Mobilité.



## Hydrogénases et catalyseurs bioinspirés.

Marc FONTECAVE

Laboratoire de Chimie des Processus Biologiques, UMR CNRS 8229  
Collège de France, Paris Sorbonne Université



La réduction de l'eau en hydrogène et l'oxydation de l'hydrogène sont des processus impliquant plusieurs électrons et plusieurs protons, avec pour conséquence de fortes barrières cinétiques. Pour lever ces dernières des catalyseurs doivent être mis en œuvre dans les électrolyseurs et les piles à hydrogène. La recherche de catalyseurs efficaces et peu coûteux peut s'appuyer sur la connaissance de plus en plus profonde de systèmes enzymatiques naturels, les hydrogénases, présents dans une grande variété de microorganismes. En effet les hydrogénases utilisent exclusivement des métaux non nobles, comme le nickel et le fer, pour catalyser ces réactions avec des efficacités remarquables. Malheureusement il s'agit de systèmes complexes et d'une grande fragilité. Grâce à une démarche de chimie bioinspirée il est possible de développer des alternatives, des complexes bioinspirés (1,2), qui peuvent être déployés dans des dispositifs technologiques, électrolyseurs ou piles (3,4). Ces stratégies seront illustrées par l'un des succès les plus significatifs en matière de catalyseurs bioinspirés.

### Références :

1. A Le Goff, V Artero, B Jusselme, N Guillet, R Métayé, A Fihri, S Palacin, M Fontecave, *From Hydrogenase Mimics to Noble-Metal Free Hydrogen-Evolving Electrocatalytic Nanomaterials*, *Science* **326**, 1384, 2009
2. P D Tran, A Le Goff, J Heidkamp, B Jusselme, N Guillet, S Palacin, H Dau, M Fontecave, V Artero, *Noncovalent Modification of Carbon Nanotubes with Pyrene-functionalized Ni complexes: Carbon Monoxide Tolerant Catalysts for H<sub>2</sub> Evolution and Uptake*, *Angew. Chem.* **50**, 1371, 2011
3. S Gentil, N Laloui, A Dutta, Y Nedellec, S Cosnier, WJ Shaw, V Artero, A Le Goff, *Carbon-nanotube-supported bioinspired nickel catalyst and its integration in hybrid hydrogen/air fuel cells*, *Angew. Chem.* **56**, 1845, 2017
4. Tran N. Huan, R T Jane, A Benayad, L Guetaz, Phong D. Tran, V Artero, *Bio-inspired noble metal-free nanomaterials approaching platinum performances for H<sub>2</sub> evolution and uptake*, *En. Env. Sci.* **9**, 940, 2016

**Mots Clés :** Hydrogénase, Nickel, Catalyse bioinspirée, Pile, Électrolyseur.





## Quelle Supply Chain pour l'hydrogène mobilité ?

Cecilia FOUVRY RENZI<sup>a</sup>, Arnaud ROUSSEL<sup>b,\*</sup>, Gilles GAUBERT<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Air Liquide, Supply Chain Director South West Europe

<sup>b</sup> Air Liquide France Industrie, Responsable Flottes et Transport,

<sup>c</sup> Air Liquide, Bulk Connected Assets Program Manager & International Expert

L'hydrogène va très certainement être un acteur majeur dans la transition énergétique, en particulier pour le transport décarboné.

Cependant, un enjeu essentiel est son acheminement entre les sites de production et les sites d'utilisation.

L'hydrogène étant très léger et très inflammable, cela nécessite des technologies spécifiques pour permettre son transport en toute sécurité. Depuis plusieurs années, Air liquide effectue des recherches dans ce domaine en ayant comme objectif de réduire l'impact environnemental de la masse transportée (critère suivi = émission CO<sub>2</sub>/km/kg). Cette stratégie consiste à augmenter la pression interne de stockage et parallèlement à réduire le poids des réservoirs. Augmenter la pression permet d'emporter plus d'hydrogène et donc de réduire le nombre de kilomètres nécessaires.

Ainsi, pour le transport en état gazeux, on est passé en quelques années de réservoirs en acier (type I), lourds et utilisés à 200 bars, à des réservoirs à structure composite carbone tissé et liner interne en aluminium (type III) ou en polymère HDPE (type IV). Beaucoup plus légers, ces réservoirs permettent de travailler à 450 bars et bientôt à 700 bars ce qui a permis de réduire d'un facteur 3 l'impact environnemental (émission/km/kg). D'autre part, afin de maîtriser la sécurité du transport, des tests et des études ont été effectuées pour s'assurer qu'en cas de fuite d'un stockage, la concentration dans l'enceinte de transport reste en deçà du seuil de sécurité. Ces études ont induit des recommandations de conception des véhicules de transport de façon à optimiser la ventilation naturelle.

Une alternative intéressante est le développement du transport liquide d'hydrogène qui réduirait d'un facteur 3 supplémentaire la pollution par rapport à l'hydrogène gazeux.

**Mots Clés :** Hydrogène mobilité, Transport, Logistique, Sécurité.





## Décarbonation Directe du méthane par plasma thermique.

Laurent FULCHERI

MINES-ParisTech, PSL - Research University  
PERSEE (Centre Procédés, Énergies Renouvelables et Systèmes Énergétiques)  
Sophia Antipolis



Dans cet article nous présentons l'état de l'art relatif à des recherches, initiées il y a environ 25 ans au Centre PERSEE de MINES-ParisTech, portant sur la Décarbonation Directe de Méthane (DMD) par voie plasma [1].

Ces recherches visent à craquer du méthane à très haute température dans un réacteur à flux entraîné en réalisant la co-synthèse de noirs de carbone et d'hydrogène de grande pureté.

Un procédé issu de ces recherches est actuellement en phase de développement aux USA par la société MONOLITH Materials. Après avoir mis au point avec succès un premier pilote de démonstration à *Mountain View* au cœur de la *Silicon Valley*, une première unité industrielle (Olive Creek one) est en cours de construction dans le Nebraska [2].

Si la viabilité économique du procédé repose aujourd'hui sur la co-valorisation du noir de carbone et de l'hydrogène [3], les choses pourraient évoluer significativement dans les prochaines années en fonction des décisions politiques qui seront prises, notamment en ce qui concerne la taxation sur le CO<sub>2</sub>.

En effet, pour la seule production d'hydrogène, le procédé DMD nécessite entre 1 et 1.8 kWh d'électricité par Nm<sup>3</sup> d'hydrogène (en fonction de la qualité du noir de carbone produit) ce qui demeure très en-deçà de l'électrolyse de l'eau qui nécessite entre 4 et 6 kWh par Nm<sup>3</sup>. Cette approche pourrait avantageusement remplacer le *Steam Reforming* (SR) puisqu'elle ne s'accompagne d'aucune émission directe de CO<sub>2</sub>, le SR en générant pour sa part en moyenne 9.5 tonnes par tonne d'hydrogène produit. À moyen terme, cette voie représente l'une des alternatives les plus crédibles pour la production d'hydrogène faiblement carboné compatible avec l'objectif de \$2/kgH<sub>2</sub> fixé par le DOE.

[1] FULCHERI, Laurent, and SCHWOB, Yvan. From methane to hydrogen, carbon black and water. *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 20, n° 3, 1995, p. 197-202.

[2] <http://www.monolithmaterials.com/>

[3] GAUTIER Maxime, ROHANI Vandad, FULCHERI Laurent, Direct decarbonization of methane by thermal plasma for the production of hydrogen and high value-added carbon black, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 42, Issue 47, 23 November 2017, Pages 28140-28156.

**Mots Clés :** Plasma, Noir de Carbone, Hydrogène, Méthane.

## Pyrogazéification et Thermolyse/Vapocraquage de la biomasse.

Philippe HAFFNER

Président HAFFNER ENERGY - Vitry le François

Les procédés de production d'hydrogène par pyrogazéification, de thermolyse et vapocraquage et enfin de vaporeformage appartiennent à une même famille. Il s'agit toujours dans un premier temps de provoquer une lyse à haute température (plus de 800°C) d'un entrant organique, afin de produire un mélange d'hydrogène et de monoxyde de carbone mélangé à de la vapeur d'eau et à du dioxyde. Dans un second temps, le monoxyde de carbone réagit avec de la vapeur d'eau afin de produire un mélange d'hydrogène et de CO<sub>2</sub>, avec la présence éventuelle d'autres gaz inertes. On termine alors par une phase de purification qui permet d'aboutir à de l'hydrogène pur.

La pyrogazéification et la thermolyse/vapocraquage mettent en œuvre de la biomasse énergie. Celle-ci regroupe toute matière organique d'origine végétale ou animale, directement prélevée ou recyclée (déchets), et utilisable comme source d'énergie.

La différence fondamentale entre la pyrogazéification et la thermolyse vapocraquage, est que cette dernière évite de gazéifier le carbone fixe (C), qui est alors sorti du procédé sous forme de biochar, entraînant avec lui la grande majorité des éléments inorganiques.

Dans un procédé de pyrogazéification, la biomasse est d'abord intégralement convertie en syngaz, et le procédé cible la production de cendres sans carbone. Les réactions de gazéification étant fortement endothermiques, sont presque exclusivement autothermiques, et imposent soit l'introduction d'air, soit d'oxygène.

Non associées au carbone, les cendres deviennent bien plus volatiles, ce qui impose une filtration des gaz élaborée et souvent onéreuse.

Dans un procédé de thermolyse et vapocraquage, l'endothermie de thermolyse est faible, et il devient alors possible, tel que cela est le cas pour le procédé HYNOCA développé par HAFFNER ENERGY, de récupérer la chaleur sensible des gaz chauds à la sortie du vapocraqueur afin d'alimenter en énergie la thermolyse.

L'intérêt de la production d'Hydrogène par thermolyse-vapocraquage est d'une part économique, avec un objectif annoncé d'atteindre 3 €/par kg d'hydrogène à la pompe en 2025. D'autre part, le syndrome de l'œuf et la poule est résolu : les stations n'ont pas besoin de garantir l'usage hydrogène pour être amorties. Un précurseur de l'hydrogène, le syngaz est en effet produit, et peut être partiellement ou intégralement dérivé afin de remplacer de manière compétitive le gaz naturel pour de nombreuses applications.

Plusieurs unités industrielles sont en cours de réalisation, pour une mise en service en 2020, et une capacité proche d'une tonne par jour. Les procédés de production d'hydrogène à partir de biomasse par voie thermique ont atteint un degré de maturité technologique qui en font une technologie désormais disponible pour le marché.

## Déploiement des carburants alternatifs renouvelables : critères économiques et environnementaux.

François KALAYDJIAN, Jean-Christophe VIGUIÉ,  
Daphné LORNE, Pierre MARION

*IFP Énergies Nouvelles - Rueil Malmaison*

La parution récente de la Directive européenne RED II, fixant pour 2030 une cible de 14% d'énergies renouvelables dans le secteur du transport, a réaffirmé la nécessité d'accélérer la décarbonation de ce secteur, responsable en France de près du tiers des émissions de CO<sub>2</sub>. Au sein de ces énergies renouvelables, la Directive a identifié les biocarburants et notamment les biocarburants avancés qui ont un rôle tout particulier à jouer. Issues de la conversion de biomasse lignocellulosique, et notamment de divers types de résidus (agricoles, forestiers, industriels...), ils permettent des réductions d'émissions de CO<sub>2</sub> élevées.

À côté de ces biocarburants avancés, la Directive mentionne également d'autres carburants alternatifs renouvelables, liquides ou gazeux. Parmi ceux-ci, on compte les carburants, qu'on classe comme e-fuel, c'est-à-dire formulés à partir d'hydrogène électrolytique issu de l'utilisation d'une électricité renouvelable et de CO<sub>2</sub> capté. Ce type de procédé est en mesure de produire des carburants de natures diverses comme de l'essence, du gazole, du kérosène mais aussi du méthane de synthèse.

Nous nous proposons d'étudier leur compétitivité, que ce soit en termes économiques ou du point de vue de leur potentiel de réduction d'émissions de CO<sub>2</sub>. Pour ce faire, nous identifions un certain nombre de critères tels que le rendement énergétique global des procédés de conversion à considérer, la densité énergétique du produit considéré, sa toxicité éventuelle, son degré de substitution vis-à-vis des carburants classiques. Puis nous qualifions les performances de ces différents e-fuels selon les critères identifiés ce qui permet alors de caractériser les conditions nécessaires à remplir, s'agissant des coûts d'accès à l'électricité, de production de l'hydrogène, de captage de CO<sub>2</sub> et ainsi d'en évaluer le déploiement.

## La production d'hydrogène par voie photo(electro)catalytique solaire : enjeux et verrous.

Valérie KELLER<sup>a,\*</sup>, Clément MARCHAL, Pablo JIMENEZ,  
Valérie CAPS, Thomas COTTINEAU

<sup>a,\*</sup> Institut de Chimie et des Procédés pour l'Energie, l'Environnement et la Santé (ICPEES)  
UMR 7515, CNRS/Université de Strasbourg

Le rayonnement solaire constitue sans nul doute la source d'énergie renouvelable la plus abondante sur Terre. La conversion de l'énergie solaire en vecteur d'énergie comme l'H<sub>2</sub>, que l'on pourrait stocker et utiliser sur demande représente un enjeu considérable et compatible avec les contraintes environnementales. La photocatalyse hétérogène apparaît comme une voie prometteuse pour produire de l'H<sub>2</sub> à partir de sources d'énergies propres et renouvelables. Ainsi, depuis les travaux pionniers réalisés par Fujishima et *al.*,<sup>1</sup> la photodissociation de l'eau n'a cessé de susciter un intérêt grandissant dans la communauté scientifique. Néanmoins, pour arriver à des rendements acceptables pour les systèmes photo(électro)catalytiques, il est nécessaire de surmonter certains points durs. L'une des principales limitations réside dans la mise en œuvre de matériaux photocatalytiques performants. Pour ce faire, le challenge consiste à élaborer des semi-conducteurs à coût modéré, stables, éventuellement recyclables, capables d'allier de très bonnes capacités d'absorption de la lumière visible, d'utiliser de manière efficace les charges photogénérées, tout en maintenant de très bonnes performances sous irradiation UV. L'immobilisation de ces nanomatériaux photocatalytiques doit également être considérée avec intérêt.

Plusieurs stratégies peuvent être envisagées : la synthèse de photocatalyseurs à bande interdite faible, le dopage chimique de semi-conducteur, la formation d'hétérojonctions, le couplage avec des métaux à propriétés plasmoniques, la mise en œuvre de morphologies spécifiques, ...

Parmi les différentes approches viables à plus grande échelle, certaines stratégies seront présentées et discutées.

<sup>1</sup> A. Fujishima, K. Honda, *Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode*, Nature **1972**, 238, 37

**Mots Clés :** Carburants solaires, H<sub>2</sub> décarboné, Énergies renouvelables, Photodissociation solaire de l'eau.



## Les grosses plateformes d'Électrolyse Alcaline sont désormais capables de concurrencer le reformage à la vapeur de Gaz Naturel pour produire de l'hydrogène propre au service de la transition écologique.

Pascal MAUBERGER

*Président Directeur Général, McPhy Energy - La Motte Fanjas*

La transition écologique est irréversible. Nous n'avons pas d'autre issue que de sortir de l'économie du carbone. Ceci va avoir un impact phénoménal sur la façon dont on produit et distribue l'énergie, et va générer un énorme besoin de flexibilité dans les réseaux énergétiques.

L'hydrogène, parce qu'il peut être produit par électrolyse de l'eau, permet d'accélérer la pénétration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques, en effaçant l'intermittence du solaire ou de l'éolien. Elle permet de stocker l'électricité, et de décarboner les usages que ce soit dans l'industrie, le transport et le bâtiment<sup>1</sup>.

Mon intervention illustrera concrètement les dernières avancées de l'électrolyse alcaline sous pression à haute densité de courant.

L'architecture modulaire développée par McPhy permet de proposer aux clients industriels des plateformes de 100 MW et plus, sous forme de clusters de 20 MW. Les principales caractéristiques techniques de ces plateformes seront détaillées dans la présentation.

Avec une efficacité énergétique inégalée, une réponse dynamique très rapide, et un investissement en capital en constante diminution ces plateformes permettent de concurrencer le reformage à la vapeur de gaz naturel pour produire sur site les quantités industrielles nécessaires pour la grande industrie et le transport lourd.

Certains grands industriels parlent de plateformes de 1 GW voire plus à un horizon de 3 à 5 ans.

J'illustrerai mon propos avec les coûts actuels et projetés des technologies et de l'hydrogène produit en intégrant la rentabilité du capital investi et le coût de l'exploitation avec différents scénarii de coûts d'électricité.

**Mots Clés :** Hydrogène, Électrolyse Alcaline, Roadmap, Coûts de l'hydrogène électrolytique.

---

<sup>1</sup> Étude McKinsey, Hydrogen Scaling Up, publiée par le Hydrogen Council, Novembre 2017



## Injection d'hydrogène dans les réseaux de transport de gaz naturel : Quelles possibilités ? Quelles conditions ?

Anthony MAZZENGA, Laurent CLISSON

*Directeur Gaz Renouvelables, GRTgaz - Bois-Colombes*

Les opérateurs d'infrastructures de gaz naturel envisagent deux grandes options pour intégrer l'hydrogène dans leurs ouvrages :

- L'injection d'hydrogène dans les réseaux, en mélange avec le gaz naturel ou pur, envisageable après adaptation des infrastructures gazières ;
- La combinaison de l'hydrogène avec du CO<sub>2</sub> pour produire du méthane de synthèse, permettant d'utiliser telle quelle les infrastructures existantes à la condition d'un investissement amont supplémentaire et une gestion de CO<sub>2</sub> ;

La solution optimale d'intégration de l'hydrogène dans les infrastructures gazières sera probablement une combinaison des différentes solutions à l'étude, en fonction des typologies d'unité de production et d'injection d'hydrogène (électrolyse, reformage de gaz naturel avec stockage de CO<sub>2</sub>, reformage à sec du méthane...), de leur positionnement dans la chaîne gazière (unités centralisées en amont, unités décentralisées en aval) et des conditions techniques d'injection dans les infrastructures de gaz et en particulier le réseau de transport.

L'injection directe d'hydrogène dans les réseaux de transport nécessite en effet de répondre à trois enjeux techniques majeurs :

- Sécurité des ouvrages : intégrité des ouvrages et procédures de maintenance associées (fréquences d'inspections, procédures d'intervention et appareils de détection).
- Pilotage du réseau : adaptation des technologies d'injection, adaptation des équipements d'analyse du gaz et de compression en vue de la conduite de réseau et du pilotage d'une qualité gaz adaptée aux usages.
- Compatibilité des usages : performance et intégrité des installations et équipements avals compteurs (équipements industriels, gaz naturel véhicule, appareils domestiques).

Pour y répondre, GRTgaz :

- Pilote des projets tels que Jupiter 1000, première expérience de couplage sectoriel à l'échelle du mégawatt en France qui démarrera son injection en 2019 dans une antenne transport ;
- Finance des travaux de R&D sur les matériels de détection performant pour les mélanges hydrogène/gaz naturel, sur le comptage des gaz renouvelables, sur l'intégrité des réseaux, sur la séparation de l'hydrogène et du gaz naturel, etc. ;
- Monte des plateformes collaboratives de test sur les équipements et matériels réseaux (comme le projet FenHYx) ;
- Anime la filière pour mettre en place les prestations et les règles de fonctionnement nécessaires au raccordement et à l'injection des futures unités d'hydrogène.

**Mots Clés :** Gaz naturel, Hydrogène, Méthanation, Transport, Injection.

## Électrolyse de la vapeur d'eau à haute température.

Julie MOUGIN

Chef du Laboratoire des Technologies Hydrogène, CEA/LITEN - Grenoble

La technologie d'électrolyse, couplée à une énergie électrique décarbonée, permet de produire de l'hydrogène sans émissions de CO<sub>2</sub>, et dès lors qu'il s'agit d'énergie électrique renouvelable, constitue une solution de stockage et de valorisation de cette énergie, ainsi qu'un soutien au réseau électrique.

L'électrolyse de l'eau peut se faire à basse température à partir d'eau liquide, il s'agit des électrolyses alcalines ou PEM (membrane échangeuse de protons), ou à haute température, à partir d'eau vapeur.

L'électrolyse de la vapeur d'eau à haute température (EHT) se caractérise par la possibilité de substituer une partie de l'énergie électrique nécessaire à la dissociation de la molécule d'eau par de l'énergie thermique. Ceci permet un gain en rendement par rapport aux autres technologies d'électrolyse. Elle fonctionne à une température de 700-900°C, et met en œuvre une cellule céramique pour la réaction électrochimique de production d'hydrogène (et d'oxygène), de technologie à oxydes solides (SOEC, solid oxide electrolysis cell).

Les caractéristiques de cette technologie seront présentées (conception, matériaux, performances, stratégie de fonctionnement notamment par rapport au volet thermique, rendement...) [1,2], ainsi que des éléments d'évaluation technico-économique, en particulier le LCOH (levelized cost of hydrogen), le coût de l'hydrogène produit par cette technologie, en fonction de différents paramètres, en particulier le coût de l'électricité et la taille de l'installation [3].

Cette technologie présente également la spécificité de fonctionner en mode réversible, à savoir en mode électrolyseur (SOEC) ou en mode pile à combustible selon les besoins, ce qui est particulièrement pertinent pour l'application stockage des énergies renouvelables [4]. Enfin, elle permet d'électrolyser du CO<sub>2</sub>, pour produire du CO, et donc de co-électrolyser simultanément du CO<sub>2</sub> et de la vapeur d'eau pour produire du syngas (H<sub>2</sub>+CO), un composant important pour les réactions de synthèse chimiques ou Fischer-Tropsch (production de méthane, méthanol, DME...) [3].

Ces spécificités seront illustrées par des résultats de fonctionnement dans ces modes, et des exemples de réalisation.

### Références :

1. J. Mougin, "Hydrogen production by high temperature steam electrolysis", Chapter 8 in *Compendium of Hydrogen Energy, Volume 1: Hydrogen production and purification*, edited by V. Subramani, A. Basile and T.N. Veziroglu, Woodhead publishing series in Energy, Elsevier, 2015
2. J. Mougin, S. Di Iorio, A. Chatroux, T. Donnier-Maréchal, G. Palcoux, M. Petitjean, G. Roux, « Development of a Solid Oxide Electrolysis Stack Able to Operate at High Steam Conversion Rate and Integration into a SOE System », *ECS Transactions*, 78 (1) (2017) 3065-3075
3. M. Reytier, S. Di Iorio, A. Chatroux, M. Petitjean, J. Cren, M. De Saint Jean, J. Aicart, J. Mougin, « Stack performances in high temperature steam electrolysis and co-electrolysis », *Int. Journal Hydrogen Energy* 40/35 (2015) 11370–11377



4. J. Aicart, S. di Iorio, M. Petitjean, P. Giroud, G. Palcoux, J. Mougín "Transition Cycles during Operation of a reversible Solid Oxide Electrolyzer/Fuel Cell (rSOC) system", 13th European SOFC&SOE Forum 3-6 July 2018, Luzern, A1103 (2018).

**Mots Clés :** Électrolyse haute température, EHT, SOEC, performance, rendement.



## Hydrogène et cogénération : pour réussir la transition énergétique dans le secteur résidentiel-tertiaire.

Pascal PEWINSKI

Directeur Général, AREVA H2Gen



La transition énergétique consiste à déployer des énergies renouvelables dans notre bouquet énergétique, afin d'en réduire les émissions de CO<sub>2</sub>.

L'intermittence des énergies renouvelables nécessite aussi de déployer des solutions de stockage de l'énergie. L'électricité peut être stockée sous forme d'hydrogène, par électrolyse de l'eau.

L'hydrogène ainsi produit est totalement décarboné et renouvelable.

Il peut ainsi être utilisé dans des applications industrielles traditionnelles consommatrices d'hydrogène, ainsi que comme carburant de véhicules électriques.

L'hydrogène est ainsi de par ses commodités d'usage la clé du déploiement de la mobilité électrique de masse.

L'enjeu de la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau est donc celui de sa compétitivité face au prix de référence de celui produit par vapo-reformage de gaz Naturel.

Le premier objectif est de ramener le prix de l'hydrogène produit par électrolyse dans une tolérance de prix qui le rendent « marketable ».

- Pour se faire il est d'abord nécessaire de construire de grandes unités de production (x10 MW) afin d'avoir le rapport Capex / kW le plus faible possible. Le potentiel de baisses des coûts des électrolyseurs étant limité de par les faibles quantités (équipements d'infrastructures), je développerai l'état de l'art de l'électrolyse PEM sur ce point ainsi que les avancées de développement et les challenges restants à relever.
- Il est ensuite nécessaire d'accéder à un prix de l'électricité à faible coût. Plusieurs scénarii sont possibles, mais les voies à privilégier sont celles associées à un taux élevé de production des équipements. La production couplée à des renouvelables semble donc la voie à privilégier mais crée une nouvelle difficulté dans la chaîne de valeur, celui du coût logistique.

Le deuxième objectif, une fois le premier atteint, consiste à améliorer l'équation économique de la production d'hydrogène vert en agissant sur deux leviers :

- Le levier fiscal qu'est la taxe carbone.
- Le levier des services aux réseaux apporté par les électrolyseurs. J'exposerai ici les atouts uniques qu'offre l'électrolyse PEM.

Les enjeux de la production d'hydrogène décarboné sont donc essentiellement liés au prix de l'électricité

Créer les conditions d'un développement économique de la filière, c'est en démontrant la rentabilité afin d'y attirer les projets des investisseurs.



## H2 bas carbone, captage et séquestration du CO<sub>2</sub>.

**Bruno SEILHAN**

*Vice-Président CO<sub>2</sub> Total S.A.*

Total est déjà un acteur important de l'hydrogène comme producteur et utilisateur dans ses installations industrielles en France et en Europe notamment. Le problème majeur à résoudre aujourd'hui est l'absence d'économie de l'hydrogène bas carbone. Il faut agir à la fois sur la création de valeur ajoutée pour les produits bas carbone et sur la baisse des coûts de cette décarbonation.

Plusieurs options existent pour produire de l'hydrogène bas carbone. Elles sont potentiellement complémentaires dans différents contextes de dimensionnement des besoins mais doivent être améliorées :

- Le défi de l'hydrogène issu de l'électrolyse de l'eau utilisant de l'électricité renouvelable ou bas carbone est une structure de coût très élevée, fortement dépendante de la consommation et du coût de l'électricité, d'une part, et du rendement et des capex de l'électrolyseur, d'autre part. L'amélioration des performances et la baisse des coûts passent par le déploiement industriel pour des débouchés qui valorisent l'évitement d'émissions de gaz à effet de serre, sous réserve que cette option apparaisse comme plus compétitive que les alternatives existantes pour satisfaire le même besoin. La possibilité de valoriser des services aux réseaux électriques pourrait contribuer à abaisser le coût de la fourniture d'électricité. Il faut démontrer à échelle industrielle et commerciale que le modèle économique correspondant est bien attractif pour tous les acteurs concernés.
- Associer des vaporeformeurs de méthane avec du Captage, Usage et Stockage de CO<sub>2</sub> apparaît aujourd'hui comme la manière la moins coûteuse pour la production de masse. Combinée avec du biométhane, cela pourrait même créer des émissions négatives de CO<sub>2</sub>.

Parmi les projets auxquels nous participons, Northern Lights est un projet norvégien de transport maritime et stockage de CO<sub>2</sub> ciblant le CO<sub>2</sub> résiduel après diminution des émissions (efficacité énergétique, renouvelables, remplacement du charbon par le gaz). C'est particulièrement le cas pour les émissions de CO<sub>2</sub> rémanentes de l'industrie (ciment, sidérurgie, fabrication d'hydrogène, etc). Il permettrait de décarboner à bas coût l'H<sub>2</sub>. Le soutien des autorités à la construction de ce type de chaîne (usage de produits décarbonés, captage du CO<sub>2</sub>, transport maritime, études techniques, contractuelles et économiques, etc.) permettrait de lancer une initiative européenne englobant non seulement les acteurs de l'hydrogène bas carbone mais aussi les autres émetteurs de CO<sub>2</sub>.

**Mots Clés :** Climat, Décarbonation, Total, CCUS, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>.



Maison de la Chimie  
28 rue Saint Dominique 75007 PARIS