

N° 466 - OCTOBRE 2021

# **l'actualité chimique**

LE JOURNAL DE LA SOCIÉTÉ CHIMIQUE DE FRANCE

**HYDROGÈNE  
DÉCARBONÉ**

**LE MICROBIOTE  
POUR SOIGNER ?**

**DURABILITÉ ET  
CRÉATION DE VALEUR**

15 **P**lace

aux

16 **S**ciences **Ce**s 58

DU 02  
AU 04  
NOVEMBRE  
2021



68<sup>e</sup>

Congrès  
des professeurs  
de physique  
et de chimie

## l'actualité chimique

Édité par la Société Chimique de France  
250 rue Saint-Jacques, 75005 Paris  
Tél. 01 40 46 71 60 – scf@societechimiquedefrance.fr  
www.societechimiquedefrance.fr  
**Directeur de la publication** : Marc Taillefer  
**Partenariats** : CNRS, Fondation de la Maison de la Chimie

### RÉDACTION

SCF, 28 rue Saint-Dominique, 75007 Paris  
Tél. : 01 40 46 71 64 – redaction@lactualitechimique.org  
www.lactualitechimique.org

**Rédactrice en chef** : Patricia Pineau  
**Rédactrice en chef adjointe** : Roselyne Messal  
**Responsable de L'Actualité Chimique Découverte** :  
Minh-Thu Dinh-Audouin

### COMITÉ DE RÉDACTION

J. Barrault, X. Bataille, C. Bresson, J.-M. Campagne, P. Colombar, P. Dauban, C. de Novion, K. Fajerwerg, D. Fauque, J.-P. Foulon, J. Fournier, N. Griffete, T. Hamaide, C. Houée-Levin, F. Launay, J. Livage, E. Marceau, V. Marvaud, M.-T. Ménager, C. Monneret, N. Moreau, J.-M. Paris, P. Pichat, A. Picot, A.-V. Ruzette, S. Tencé, H. This, H. Toulhoat, L. Valade, P. Walter, S. Younes

Publication analysée ou indexée par :  
Chemical Abstracts, base de données PASCAL

### ABONNEMENT

SCF, Martine Maman  
250 rue Saint-Jacques, 75005 Paris  
Tél. : 01 40 46 71 60/66  
abonnement@lactualitechimique.org

### FABRICATION

**MAQUETTE** : Redouane Sahih, sahih.redouane@gmail.com  
Mag Design, www.magdesign.fr, mag.design@me.com  
**IMPRESSION, ROUTAGE** : N. Fortin & ses fils imprimeurs  
94800 Villejuif, fortimprimerie@wanadoo.fr

### PUBLICITÉ

FFE, 15 rue des Sablons, 75116 Paris  
Tél. : 01 53 36 20 40 – www.ffe.fr  
aurelie.vuillemin@ffe.fr

ISSN version papier 0151 9093  
ISSN version électronique 2105 2409

© SCF 2021 – Tous droits de reproduction réservés

Dépôt légal : octobre 2021

Toute représentation ou reproduction, intégrale ou partielle, fait sans le consentement de l'auteur, ou des ayants droits, ou ayant cause, est illicite (loi du 11 mars 1957, alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal. La loi du 11 mars 1957 n'autorise, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, que les copies et les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective d'une part, et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans le but d'exemple ou d'illustration.



## La chimie aux multiples facettes

L'équipe de *L'Actualité Chimique* espère que vous aurez plaisir à découvrir ce numéro original et enchanteur. Il illustre la diversité et la beauté des travaux réalisés hier et aujourd'hui par des chimistes. La rubrique « Étymologie » passe en revue un dictionnaire des substances chimiques en suivant la logique d'un alphabet avec des noms qui sont propres aux chimistes et reflètent leur créativité. Saviez-vous que grâce à Pierre Avenas, nous avons déjà fait trois tours de l'alphabet, de A à Z avec des noms qui nous sont familiers ? Dans ce numéro, la zéine en surprendra plus d'un.

### Hydrogène, je vous aime

Le premier élément du tableau périodique, le plus petit, le plus répandu, indispensable à la vie, est au cœur de travaux fondamentaux, d'installations gigantesques et de collaborations internationales visant des applications indispensables et révolutionnaires. Nous ne pouvons vivre sans, et les chercheurs nous ouvrent une voie nouvelle, l'hydrogène décarboné.

Ne ratez pas toutes ses facettes car elles sont réparties dans plusieurs rubriques de ce numéro.

### Microbiote, une chimie pas comme les autres

Microbiome ou microbiote ont déclenché depuis peu une avalanche de travaux, de publications, de brevets, de créations de startups, mais aussi et surtout d'espoirs, pour mettre au point et proposer une autre famille de médicaments. L'interview de Hervé Blottière, réalisé par un stagiaire de Sorbonne Université, reflète l'émerveillement de cette alliance entre biologie et chimie.

### Chimiste et artiste

Dernière touche enchanteresse de ce numéro : l'admirable histoire de Charles Gaudion. La découvrir, c'est étonnant ; la relire, c'est un plaisir !

Merci à nos auteurs et fidèles lecteurs,

**Patricia Pineau**  
Rédactrice en chef

# sommaire

N° 466- OCTOBRE 2021

<b>ÉDITORIAL</b>	<b>1</b>
La chimie aux multiples facettes, par <b>P. Pineau</b>	1
<b>CLIN D'ŒIL ÉTYMOLOGIQUE</b>	<b>3</b>
À propos de la zéine, par <b>P. Avenas</b>	3
<b>À PROPOS DE</b>	<b>4</b>
Le microbiote : une source de médicaments ?, par <b>M. Soussi-Therond</b>	4
Vous pouvez le dire en français... : le vocabulaire de l'hydrogène, par <b>C. Andrieux</b>	7
<b>LA PRODUCTION D'HYDROGÈNE DÉCARBONÉ</b>	<b>11</b>
<i>Coordinateurs : J.-P. Foulon et H. Toulhoat</i>	
La production d'hydrogène décarbonée et compétitive : un défi technologique à relever, par <b>J.-P. Foulon, H. Toulhoat et E. Freund</b>	11
Production d'hydrogène par électrolyse de la vapeur d'eau à haute température, par <b>J. Mougin</b>	12
Les systèmes d'électrolyse de l'eau à membrane échangeuse de protons, par <b>S. Germe, F. Fouda-Onana et S. Rosini</b>	20
La pyrolyse du méthane : de l'hydrogène « gris » à l'hydrogène « turquoise », par <b>L. Fulcheri</b>	28
L'hydrogène naturel, une nouvelle source d'énergie renouvelable, par <b>V. Zgonnik</b>	35
<b>RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT</b>	<b>38</b>
<i>Principes et substances actifs</i>	
Nouveaux principes actifs pharmaceutiques et nouvelles substances actives phytopharmaceutiques, par <b>J. Fournier et J.-M. Paris</b>	38
<b>INDUSTRIE</b>	<b>40</b>
Concilier durabilité et création de valeur : la méthodologie SeeVal™ de Solvay, par <b>G.-N. Sauvion</b>	40
<b>HISTOIRE DE LA CHIMIE</b>	<b>47</b>
Georges Gaudion (1885-1942), chimiste, musicien, poète, peintre et illustrateur français, par <b>A. De Pérignon et A. Lattes</b>	47
<b>EN BREF</b>	<b>53</b>
<b>LIVRES ET MÉDIAS</b>	<b>55</b>
<b>AGENDA</b>	<b>57</b>
<b>ACTUALITÉS DE LA SCF</b>	<b>58</b>
<b>UN POINT SUR</b>	<b>63</b>
Fiche n° 88 : Des matériaux qui stockent de l'hydrogène sans effort, par <b>F. Cuevas et M. Latroche</b>	63



## Couverture :

La plateforme MYRTE : issue de l'engagement de quatre partenaires – l'Université de Corse Pasquale Paoli, le CNRS, AREVA Stockage d'Énergie, le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) – elle met en œuvre le couplage de l'énergie solaire avec une chaîne hydrogène comme vecteur énergétique pour le stockage des énergies renouvelables. © Université de Corse/CNRS.

Conception graphique : magdesign.fr

## À propos de la zéine



Wikipédia, licence cc-by-sa-3.0, Gonioul.

La définition de *zéine* dans le *Petit Larousse* est : « protéine extraite du maïs », et l'on sait que le maïs fait partie des plantes que les Européens ont découvertes en Amérique. En l'occurrence, *maïs* vient, par l'espagnol *maíz*, du nom de la plante en taino, langue d'Haïti, nom écrit *mahiz* au XVI<sup>e</sup> siècle. L'amidon de maïs est largement utilisé dans le monde, notamment sous la célèbre marque *Maizena*<sup>®</sup>, déposée au XIX<sup>e</sup> siècle. Quant à la zéine, elle est extraite de la partie protéinique du grain de maïs, c'est-à-dire de son gluten (cf. *L'Act. Chim.* sept. 2019).

### La zéine vient du maïs, mais zéine ne vient pas de maïs



Le botaniste français Tournefort, s'inspirant du nom autochtone de la plante, la nommait *Mays* en latin scientifique. Cependant, dans son *Hortus cliffortianus* de 1737, Linné a préféré la nommer *Zea*, à partir du grec *zeia* ou *zea*, « sorte de blé, épeautre »,

en expliquant (en latin) : « *Zea est le nom jusqu'ici incertain donné par les Anciens à une variété de blé, nous l'avons repris pour désigner ce nouveau genre à la place du mot barbare Mays* ». Linné employait ainsi le latin *barbarus*, au sens du grec ancien *barbaros*, signifiant « étranger, qui ne parle pas le grec », et il donnait le nom grec d'un blé au maïs, considéré en effet comme l'équivalent en Amérique du blé en Europe. De là vient aussi, à côté de *maize*, le nom le plus courant du maïs en anglais d'Amérique, *corn*, qui est le nom anglais du blé en Europe. Enfin en français du Canada, le maïs se nomme couramment *blé d'Inde*, en référence aux *Indes occidentales*, l'ancien nom des Amériques.

Finalement en 1753, dans son *Species Plantarum* qui instaurait la classification binominale des végétaux, Linné a tout de même adopté le nom « barbare » en nommant la plante de maïs *Zea mays*, son nom scientifique toujours actuel. Le mot *zéine* apparaît en 1822 par l'anglais, *zein*, donc formé sur *Zea*, le nom de genre du maïs.

### La zéine est une prolamine, parmi d'autres

Les prolamines sont des protéines du gluten de grains de céréales qui possèdent une teneur élevée en deux acides aminés, la proline et la glutamine. Le mot *prolamine* apparaît en 1908, formé de *proline*, ammoniac et *-ine*.

La zéine est donc la prolamine du maïs, alors que celle du blé est la gliadine, celle de l'orge l'hordéine, celle du seigle la sécaline, celle du sorgho la kafirine, celle du riz l'orzénine ou celle de l'avoine l'avénine.

C'est l'occasion de s'intéresser aux *céréales*, qui doivent ce nom à *Cérès*, la déesse romaine des moissons, également à l'origine du nom du *cérium*.

### Le nom latin de la céréale se retrouve dans celui de sa prolamine...



Ainsi, le nom de l'orge vient de son nom latin, *hordeum*, d'où chez Linné le genre *Hordeum*. Le chimiste français Proust a découvert la prolamine de l'orge, qu'il a nommée *hordéine* en 1817. De même, *seigle* vient, peut-être par l'ancien provençal

*segle*, du mot latin de cette plante, *secale*, d'où le genre *Secale* et la *sécaline*, et le nom de l'avoine vient du latin *avena*, d'où le genre *Avena* et l'*avénine*.

Enfin *riz* vient, par l'italien *riso*, du grec byzantin *ruzi*, du grec *oruza*, latinisé par Linné en nom de genre *Oryza* du riz, d'où le nom de sa prolamine, *oryzénine*, ou *orzéine*.

### ... mais pas pour le sorgho, ni le blé

Le nom du *sorgho* vient, par l'italien *sorgo*, du latin médiéval *surico*, issu du latin *Syricus*, variante de l'adjectif géographique *Syriacus*, « de Syrie », mais le nom de sa prolamine, *kafirine*, par l'anglais *kafirin* attesté en 1916, vient d'une ancienne appellation du sorgho en anglais, *Kaffir corn*, où *Kaffir* renvoie à l'Afrique du Sud, région jusqu'où la culture du sorgho s'est développée à partir du nord-est du continent.

Enfin, le nom du *blé* vient de l'ancien francique *\*blād*, « produit de la terre », sans rapport avec son nom latin usuel, *triticum*, lié au verbe *terere*, « frotter, battre le grain », et retenu par Linné comme nom de genre, *Triticum*. Cependant le nom de sa prolamine, *gliadine*, vient par l'italien, *gliadina*, du grec tardif *glia*, « glu », lié au nom même du gluten. Cette origine est cohérente avec le fait que les blés sont des céréales dans lesquelles les proportions de gluten et donc de prolamines sont les plus importantes.

### Épilogue

Même si l'on ne trouve que *zéine* dans le *Petit Larousse*, toutes les prolamines sont importantes car elles sont les principales responsables des allergies ou intolérances que peuvent provoquer les céréales. C'est la proportion de prolamines dans le grain de la céréale qui compte : elle est très élevée dans le blé, comme on vient de le voir, et à l'autre extrême, très faible dans le riz, qui, de ce fait, peut être considéré comme un aliment sans gluten.

Pierre AVENAS,  
ex directeur de la R & D dans l'industrie chimique.  
pier.avenas@orange.fr

### Le microbiote : une source de médicaments ?

Dans le cadre de mon stage au sein de *L'Actualité Chimique*, j'ai eu l'opportunité d'écouter une conférence sur un monde fantastique, celui du microbiome, donnée par Hervé Blottière, directeur de recherche à l'INRAE, responsable d'une équipe au sein de l'Institut Micalis<sup>(1)</sup>, et directeur scientifique de la plateforme MetaFun à MetaGenoPolis<sup>(2)</sup>. Étant fasciné par ses travaux, il m'a accordé une interview sur les découvertes récentes qui conduiront à soigner des maladies avec des micro-organismes.

#### **Comment définissez-vous le microbiote, et quelle est la différence entre microbiote et microbiome ?**

Le microbiote correspond à un ensemble de micro-organismes qui peuplent un écosystème. En l'occurrence, le microbiote humain correspond aux virus, bactéries, champignons, levures, qui peuplent notre corps. Le microbiome, lui, correspond aux micro-organismes dans leur environnement.

#### **Comment faire un lien entre microbiome et chimie ?**

Les micro-organismes sont des petites usines chimiques qui vont dans notre organisme consommer des nutriments, des molécules chimiques, et faire des réactions chimiques, mais au lieu que cela se passe dans un tube à essai, les réactions se font à l'intérieur ou au contact de la bactérie. La différence avec la chimie est le fait d'avoir des réactions successives, alors que le microbiome s'apparente à une usine qui réalise des réactions chimiques codées par des enzymes, elles-mêmes codées par les génomes de ces micro-organismes.

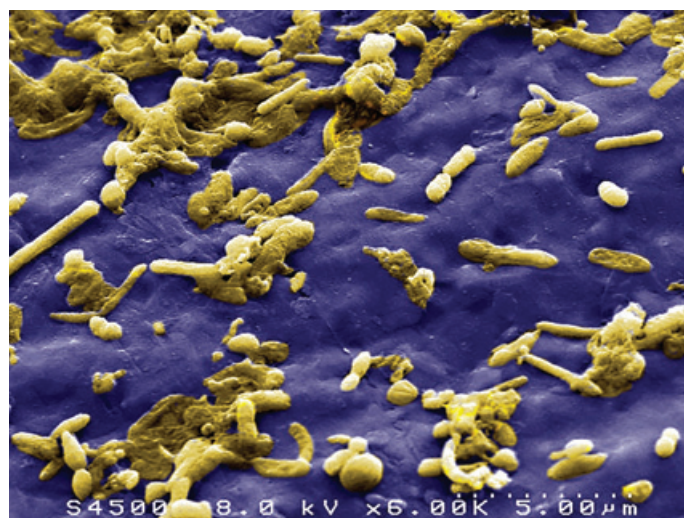
#### **Lors de la conférence, vous avez dit que la dépression serait liée à une instabilité du microbiote ; comment est-ce possible ?**

En prenant des individus dépressifs et en analysant leur microbiote, les chercheurs ont observé que celui-ci diffère des microbiotes issus d'individus non dépressifs. De plus, il a été montré dans un même temps que le transfert du microbiote d'une personne dépressive dans un modèle de souris rendait la souris plus dépressive. On arrive ainsi à l'idée qu'il existe un lien entre le microbiote intestinal et la dépression, mais il ne s'agit pas d'un fait exclusif, il y a beaucoup d'autres critères à prendre en compte.

#### **Mais comment ça marche ?**

Plusieurs mécanismes ont été décrits :

- Les micro-organismes présents à travers des réactions chimiques peuvent produire des molécules qui ressemblent à certains de nos neuromédiateurs. Donc une fois produites, elles passent dans le sang et circulent jusque dans le cerveau où elles peuvent agir.
- Ces micro-organismes, par leur activité métabolique, stimulent des cellules entéro-endocrines dans l'intestin qui fabriquent des hormones. Ces hormones passent dans le sang puis peuvent aller jusqu'au cerveau, se fixer sur leurs récepteurs et impacter son fonctionnement.



Vue en microscope électronique à balayage d'un échantillon de matière fécale humaine montrant la diversité et l'abondance de la population bactérienne. ©MEYLHEUC Thierry/INRAE.

- Le nerf vague (système nerveux intestinal) permet de conduire une signalisation neuronale.

- À travers l'activation du système immunitaire de l'intestin, ce dernier secrète des molécules de signalisation (cytokines) qui peuvent atteindre le cerveau.

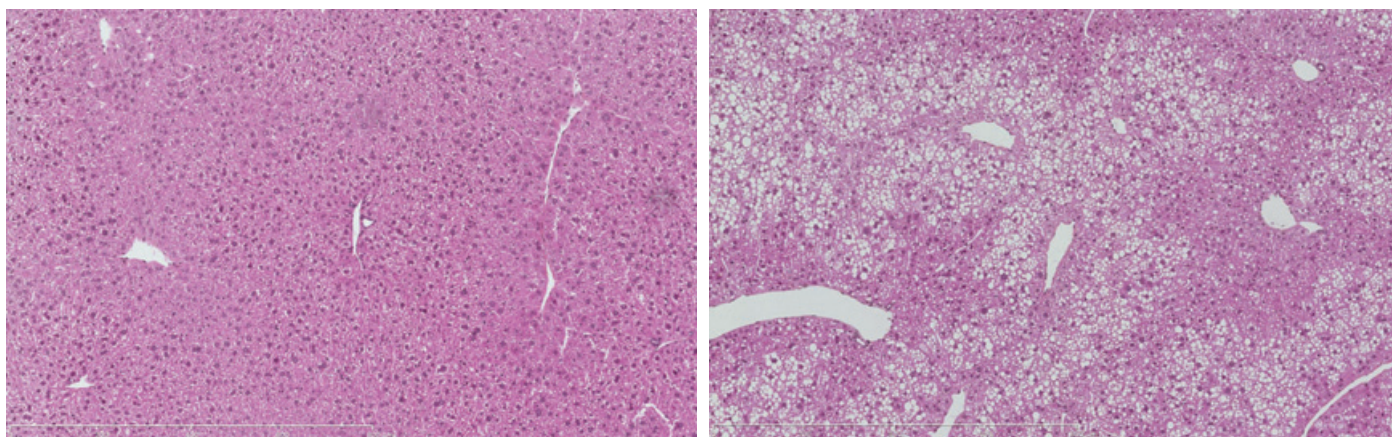
Au début des recherches, ces mécanismes tenaient d'une simple constatation, mais aujourd'hui nous parvenons à mieux les comprendre.

#### **Au-delà de la dépression, est-ce que le microbiome est impliqué dans d'autres pathologies ?**

Les premières pathologies bien documentées datent de la fin des années 1990 ; il s'agissait de maladies inflammatoires chroniques intestinales comme la maladie de Crohn, la rectocolite hémorragique. C'est peut-être la toute première pathologie pour laquelle le rôle du microbiote intestinal a été vraiment démontré. Dans une suite assez logique, nous avons étudié le syndrome de l'intestin irritable qui correspond à un mal de ventre et à des ballonnements, puis au tout début des années 2000, de nombreux travaux ont commencé à émerger autour de l'obésité, du diabète, et actuellement nous connaissons bien le rôle contributeur du microbiote intestinal dans ces maladies.

Parmi les maladies du foie, nous avons travaillé sur la NASH, la stéatose hépatique non alcoolique, parfois appelée « maladie du sucre » car elle ne concerne pas les individus qui consomment trop d'alcool mais plutôt les gros consommateurs de sucre et de sodas.

Nous avons participé à un important projet européen centré sur les maladies cardio-métaboliques, et plus récemment nous avons initié des travaux qui visent à comprendre le rôle du microbiote dans des maladies neurodégénératives comme la maladie de Parkinson. Pour cette pathologie, la Fondation Michael J. Fox nous a accordé un financement important en vue d'élucider le lien avec le microbiote.



Coupes de foie de souris associées au microbiote de la souris, sans désordre métabolique (à gauche) et présentant des désordres métaboliques (à droite). Seules les souris au « mauvais » microbiote développent une stéatose hépatique massive en réponse à un régime hyperlipidique. On distingue nettement les gouttelettes de lipides (en blanc). © BOUET Stephan/INRAE.

Des équipes ont aussi mis en évidence le lien entre microbiote intestinal et la maladie d'Alzheimer, ou encore l'autisme. Cette pathologie reste encore un mystère concernant un rôle contributeur du microbiote.

Plus récemment, dans les maladies osseuses, les maladies du rein, la sclérose en plaques, plus nous avançons dans la connaissance, plus nous constatons que le microbiote joue un rôle sans en être la cause ; il semblerait néanmoins qu'il contribue à la maladie.

Encore plus récemment, en collaboration avec des collègues de Villejuif, notre laboratoire MetaGenoPolis à Jouy-en-Josas a pu établir que le microbiote intestinal pouvait déterminer la réponse à un traitement antitumoral, en particulier dans les immunothérapies anticancéreuses. Ce sont des traitements très novateurs qui donnent des résultats encourageants chez 25 à 30 % des malades atteints de cancers (répondeurs). Certains patients ne « répondent » pas, mais ces travaux ont montré que le microbiote pouvait expliquer la non-réponse chez certains malades. Les chercheurs sont même allés plus loin puisqu'ils commencent à envisager de prélever le microbiote d'un répondeur pour le transférer à un patient ne répondant pas, et parvenir ainsi à faire en sorte qu'il réponde au traitement. C'est un modèle qui désormais fonctionne très bien chez les souris et les essais chez l'homme sont en cours.

#### **Comment analysez-vous le microbiote ?**

Nous pouvons le cultiver et observer quelques-uns des métabolites que les micro-organismes sont capables de fabriquer. Mais la méthode la plus performante actuellement est le séquençage, qui consiste à extraire l'ADN du microbiote intestinal prélevé à partir des selles. Ce mode opératoire, appelé « shotgun sequencing », permet non seulement d'identifier les micro-organismes présents mais aussi de connaître les fonctions des bactéries grâce à leurs gènes.

#### **Vous avez parlé du diabète de type 1 et de type 2 ; quelle serait la distinction à faire entre les deux types de microbiotes ?**

Le diabète de type 1 correspond à une maladie auto-immune qui apparaît très tôt dans l'enfance et qui a comme effet une destruction des îlots de Langerhans. Nous pensons que le microbiote contribue à l'activation du système immunitaire et renforce la destruction. Si c'est le cas, ne pourrait-on pas, en jouant sur le microbiote, empêcher cette activation du système immunitaire ? À suivre !

Le diabète de type 2 correspond au contexte fortement associé à l'obésité et au métabolisme et lié à une résistance de l'organisme à l'insuline. Le microbiote des diabétiques de type 2 est très différent de celui des individus sains. Dans le cas d'un diabète de type 2, certains métabolites qui ne seraient pas ou peu fabriqués seraient alors protecteurs.

#### **Avez-vous constaté une différence du microbiote chez des personnes atteintes de troubles d'anorexie ? Auriez-vous un conseil à donner aux personnes cherchant des informations sur la nutrition ? Il est souvent compliqué d'avoir des informations fiables ; est ce que l'INRAE pourrait les orienter vers des sites pertinents ?**

Il est difficile de répondre. Concernant l'anorexie mentale, nous avons à l'heure actuelle des travaux en cours sur des patients anorexiques et nous essayons vraiment de comprendre quel est le rôle du microbiote dans ce cas. Il s'avère que chez les anorexiques, le microbiote est différent, mais ce n'est pas étonnant vu qu'ils mangent très différemment. Est-ce que le microbiote pourrait être un des facteurs qui contribuent à l'anorexie ? Actuellement, nous n'avons pas encore la réponse, mais tous ces aspects sont investigués à la fois chez l'animal et chez l'homme.

Concernant les sources d'information, il est très difficile d'en trouver. En « surfant sur le net », vous pouvez trouver aussi bien des sites qui publient des mauvaises informations (« fake news ») que des sites fiables. Pour nous, scientifiques,



Intervention sur un appareil dans la plateforme de séquençage haut-débit (Metaquant) de l'unité MetaGenoPolis à Jouy-en-Josas. © INRAE/NICOLAS Bertrand.

il est facile de consulter les journaux à comité de lecture pour lesquels les résultats sont validés par les pairs.

Sur le site de l'INRAE<sup>(3)</sup>, nous partageons des informations sur nos travaux. Vous trouverez aussi des informations fiables sur les sites de l'Inserm<sup>(4)</sup> et certaines Fondations. Pour conclure sur ce sujet, notre monde actuel est basé sur l'ultra communication et il n'est pas toujours évident de déceler le bon du mauvais pour ainsi contrer les « fakes news » et faire émerger la vérité scientifique.

### **Comment interagir au quotidien avec autant de chercheurs provenant d'horizons totalement différents ?**

Dans mon laboratoire, nous avons un large panel de chercheurs : biologistes, microbiologistes, chimistes, informaticiens, bio-informaticiens, mathématiciens, statisticiens. Au début, il a fallu trouver un langage commun. Sur un sujet précis de biologie par exemple, un mathématicien ne va pas forcément comprendre, mais à force de discuter ensemble et d'échanger, nous apprenons le langage de chacun. J'apprends le langage des mathématiciens, des bio-informaticiens et eux apprennent la microbiologie, la physiologie, c'est ce qui fait notre atout. Pour y parvenir, un seul objectif nous anime : chercher et comprendre sans transiger, mais avec l'exigence scientifique, la véracité de nos hypothèses et la compréhension des mécanismes sous-jacents.

### **Pour les personnes qui ont une maladie liée à un déséquilibre du microbiote, peut-on ou pourra-t-on les guérir en le modifiant simplement, sans prendre forcément des médicaments ?**

C'est une bonne question et une stratégie qui a été adoptée. Dans certains cas, nous avons montré que la transplantation ou le transfert fécal peut arriver à guérir des patients : par exemple les personnes atteintes d'une infection récidivante à *Clostridium difficile* résistante aux antibiotiques. Dans ce cas, le transfert fécal s'assimile à un médicament.

À Lyon, il existe une petite entreprise (startup), fondée notamment par Joël Doré, qui s'appelle MAAT Pharma<sup>(5)</sup> et essaye d'utiliser le microbiote intestinal de personnes en bonne santé comme un médicament dans certaines maladies. Ils ont obtenu des résultats assez fantastiques dans une maladie : la réaction du greffon contre l'hôte (GVHD). Autrement dit, pour certaines maladies (cancer) où les patients doivent subir une

greffe de moelle, il arrive qu'après cette greffe les cellules du donneur attaquent l'hôte, et dans un certain nombre de cas, les corticoïdes n'ayant aucun effet, le patient va finir par décéder. Une étude clinique récente a permis de sauver des patients atteints de la réaction du greffon contre l'hôte à l'aide de la transplantation de microbiote. C'est extraordinaire, mais il y a d'autres pathologies pour lesquelles, pour l'instant, il n'y a pas de résultats incroyables. Dans certaines maladies comme l'encéphalopathie hépatique, maladie associée à un dysfonctionnement du foie, des effets absolument spectaculaires, voire miraculeux, ont été décrits. Des essais sont aussi en cours concernant l'autisme dans le monde.

Une autre piste serait d'identifier les micro-organismes qui sont bénéfiques et de les utiliser comme médicaments. En France, une dizaine d'entreprises testent et travaillent sur une bactérie particulière, qui pourrait être un médicament dans certaines maladies. La « pharma » est fortement intéressée par ces projets.

La Covid est aussi concernée ; nous avons décrit des modifications appelées dysbiose du microbiote intestinal chez les obèses et les diabétiques qui peuvent expliquer leurs facteurs de risque.

L'histoire du microbiote continue et modifie déjà la vision des médicaments associée à des molécules. À suivre, il y aura le « avant » et le « après » microbiote.

(1) L'Institut Micalis est une unité mixte de recherche (UMR) associant l'INRA et AgroParisTech et faisant partie de l'Université Paris-Saclay. Sa mission est le développement de recherches novatrices dans le champ de la « microbiologie de l'alimentation au service de la santé » ([www.micalis.fr](http://www.micalis.fr)).

(2) <http://mgps.eu/?lang=fr>

(3) [www.inrae.fr](http://www.inrae.fr)

(4) [www.inserm.fr](http://www.inserm.fr)

(5) [www.maatpharma.com](http://www.maatpharma.com)

**Mehdi SOUSSI-THEROND,**

Étudiant en Master 2 de Chimie et science du vivant, Université PSL, Paris.

\* [mehdi.southe@gmail.com](mailto:mehdi.southe@gmail.com)

45 Sc 21 Culture sciences Chimie

ENS

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE, DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

Mis à disposition CAPES et AGRÉGATION aux épreuves orales

Site de ressources en Chimie pour les enseignants

Thèmes en lien avec les PROGRAMMES D'ENSEIGNEMENT

Contenu validé par des CHERCHEURS

Articles, Vidéos, Diaporamas AGENDA, ACTUALITÉS événements, conférences, parutions scientifiques...

<http://culturesciences.chimie.ens.fr>



## Vous pouvez le dire en français...

### Le vocabulaire de l'hydrogène

L'hydrogène comme source d'énergie à faible empreinte carbone est aujourd'hui un sujet particulièrement étudié, tant pour ses aspects fondamentaux que pour ses applications industrielles.

Dans le cadre de la Commission d'enrichissement de la langue française du Ministère de la Culture, plusieurs collèges d'experts de terminologie et de néologie se sont réunis pour définir ensemble le vocabulaire qui doit être utilisé dans les domaines aussi divers que la chimie, l'énergie, l'environnement, le pétrole et gaz, le transport et la mobilité.

Cette liste a été publiée au *Journal officiel* le 30 janvier 2021 [1] et chacun des 28 termes est consultable sur FranceTerme [2].

**Claude Andrieux\***,

Président du Collège d'experts de terminologie et de néologie de la chimie et des matériaux

\*[claud.andrieux@univ-paris-diderot.fr](mailto:claud.andrieux@univ-paris-diderot.fr)

[1] [www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043080893](http://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043080893)

[2] [www.culture.fr/franceterme](http://www.culture.fr/franceterme)

### Vocabulaire de l'hydrogène : liste de termes, expressions et définitions adoptés (NOR : CTNR2102455K)

#### Termes et définitions

##### - décomposition de l'eau

*Domaine* : Chimie.

*Définition* : Dissociation de l'eau en hydrogène et en oxygène, qui peut être obtenue par thermolyse, électrolyse, photolyse, photoélectrolyse ou radiolyse.

*Note* :

1. On trouve aussi les termes « scission de l'eau » et « craquage de l'eau », qui ne sont pas recommandés.

2. On emploie couramment les termes « hydrogène » et « oxygène » au lieu des dénominations scientifiques « dihydrogène » et « dioxygène ».

*Voir aussi* : photoélectrolyse de l'eau, photolyse, thermolyse.

*Équivalent étranger* : water splitting.

##### - décomposition thermique de la biomasse

*Domaine* : Chimie-Énergie.

*Définition* : Thermolyse anaérobie de la biomasse à haute température.

*Note* :

1. La décomposition thermique de la biomasse lignocellulosique peut être suivie d'une réaction à la vapeur d'eau, ce qui permet de produire de l'hydrogène d'origine renouvelable.

2. On trouve aussi le terme « conversion thermo-chimique de la biomasse ».

*Voir aussi* : décomposition de l'eau, hydrogène d'origine renouvelable, thermolyse.

*Équivalent étranger* : -

##### - électrolyse alcaline de l'eau

*Domaine* : Chimie-Énergie.

*Définition* : Décomposition de l'eau obtenue par électrolyse d'une solution aqueuse alcaline.

*Note* : L'électrolyse alcaline de l'eau s'effectue généralement avec une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium.

*Voir aussi* : cellule d'électrolyse, décomposition de l'eau.

*Équivalent étranger* : alkaline electrolysis.

##### - électrolyse de la vapeur d'eau à haute température

*Forme abrégée* : électrolyse à haute température.

*Domaine* : Chimie-Énergie.

*Définition* : Décomposition de la vapeur d'eau par électrolyse, effectuée à haute température dans une cellule dont les deux compartiments sont séparés par une membrane en oxyde céramique conductrice d'anions oxydes.

*Note* :

1. Les anions oxydes assurant la conductivité des membranes en oxyde céramique sont des atomes d'oxygène ayant capté deux électrons  $O^{2-}$ .

2. L'électrolyse de la vapeur d'eau à haute température s'effectue généralement avec une membrane d'oxyde de zirconium dopée à l'yttrium, qui, portée à une température de l'ordre de 800 °C, devient conductrice d'anions oxydes.

*Voir aussi* : cellule d'électrolyse, décomposition de l'eau.

*Équivalent étranger* : high temperature electrolysis, solid oxide electrolysis (SOE).

##### - électrolyse de l'eau à membrane échangeuse de protons

*Forme abrégée* : électrolyse à MEP.

*Domaine* : Chimie-Énergie.

*Définition* : Décomposition de l'eau par électrolyse en milieu acide, effectuée dans une cellule dont les deux compartiments sont séparés par une membrane polymère conductrice de protons.

*Voir aussi* : cellule d'électrolyse, décomposition de l'eau.

*Équivalent étranger* : PEM electrolysis, polymer electrolyte membrane electrolysis, proton exchange membrane electrolysis.

##### - hydrogène à faible empreinte carbone

*Forme développée* : hydrogène à faible empreinte en dioxyde de carbone.

*Domaine* : Énergie-Environnement.

*Définition* : Hydrogène dont le processus de production entraîne de faibles émissions de dioxyde de carbone ou, dans le cas d'émissions plus importantes, s'accompagne d'un captage qui les compense en grande partie.

*Note* :

1. On trouve aussi le terme « hydrogène décarboné », qui est ambigu, l'adjectif « décarboné » ne s'appliquant pas

à l'hydrogène mais faisant référence à son processus de production, ainsi que le terme « hydrogène bleu », qui est déconseillé.

2. On emploie couramment le terme « hydrogène » au lieu de la dénomination scientifique « dihydrogène ».

*Voir aussi :* captage et stockage du CO<sub>2</sub>, décarbonation, empreinte en gaz à effet de serre, faible émission de gaz à effet de serre (à), hydrogène d'origine biologique, hydrogène d'origine fossile, hydrogène d'origine renouvelable.

*Équivalent étranger :* blue hydrogen, decarbonated hydrogen.

#### - hydrogène d'origine biologique

*Domaine :* Énergie-Environnement.

*Synonyme :* biohydrogène, n.m.

*Définition :* Hydrogène d'origine renouvelable produit à partir de biomasse, par méthanisation et reformage ou par décomposition thermique.

*Note :* L'hydrogène d'origine biologique peut être de l'hydrogène à faible empreinte carbone.

*Voir aussi :* décomposition thermique de la biomasse, hydrogène à faible empreinte carbone, hydrogène d'origine renouvelable, méthanisation, reformage.

*Équivalent étranger :* biohydrogen.

#### - hydrogène d'origine fossile

*Domaine :* Énergie-Pétrole et Gaz.

*Définition :* Hydrogène produit par reformage d'hydrocarbures fossiles.

*Note :*

1. L'hydrogène d'origine fossile peut être de l'hydrogène à faible empreinte carbone.

2. On trouve aussi le terme « hydrogène gris », qui est déconseillé.

3. On emploie couramment le terme « hydrogène » au lieu de la dénomination scientifique « dihydrogène ».

*Voir aussi :* hydrogène à faible empreinte carbone, reformage.

*Équivalent étranger :* grey hydrogen.

#### - hydrogène d'origine renouvelable

*Domaine :* Énergie-Environnement.

*Définition :* Hydrogène produit à partir de sources d'énergie renouvelables.

*Note :*

1. L'hydrogène d'origine renouvelable peut être de l'hydrogène à faible empreinte carbone.

2. On trouve aussi les termes « hydrogène vert » et « hydrogène renouvelable », qui sont déconseillés.

3. On emploie couramment le terme « hydrogène » au lieu de la dénomination scientifique « dihydrogène ».

*Voir aussi :* hydrogène à faible empreinte carbone, hydrogène d'origine biologique.

*Équivalent étranger :* green hydrogen, renewable hydrogen.

#### - hydrogène sous-produit

*Domaine :* Énergie-Chimie.

*Définition :* Hydrogène produit lors d'un processus industriel dont la fonction principale n'est pas d'obtenir cet hydrogène.

*Note :*

1. L'hydrogène sous-produit peut être valorisé ; on parle alors d'« hydrogène de récupération ».

2. On trouve aussi, dans le langage professionnel, le terme « hydrogène coproduit », ainsi que le terme « hydrogène fatal », qui n'est pas recommandé.

3. On emploie couramment le terme « hydrogène » au lieu de la dénomination scientifique « dihydrogène ».

*Équivalent étranger :* by-product hydrogen, hydrogen by-product.

#### - injection d'hydrogène

*Forme développée :* injection d'hydrogène dans un réseau de distribution de gaz.

*Domaine :* Énergie-Pétrole et Gaz.

*Définition :* Introduction d'une faible quantité d'hydrogène dans un réseau de distribution de gaz naturel.

*Note :*

1. La quantité d'hydrogène injectée dans un réseau de distribution de gaz naturel peut varier de 6 à 20 %.

2. L'injection d'hydrogène permet, pour la production d'une quantité de chaleur donnée, de diminuer le rejet de dioxyde de carbone lors de la combustion du mélange.

3. On emploie couramment le terme « hydrogène » au lieu de la dénomination scientifique « dihydrogène ».

*Équivalent étranger :* -

#### - photoélectrolyse de l'eau

*Domaine :* Chimie-Énergie.

*Définition :* Décomposition de l'eau par électrolyse, dans laquelle l'énergie est fournie par les photons absorbés par l'anode semiconductrice immergée dans l'électrolyte, l'hydrogène étant produit à la cathode.

*Note :*

1. Dans la photoélectrolyse de l'eau, l'anode semiconductrice est généralement à base de dioxyde de titane.

2. On emploie couramment le terme « hydrogène » au lieu de la dénomination scientifique « dihydrogène ».

*Voir aussi :* décomposition de l'eau.

*Équivalent étranger :* water photoelectrolysis.

#### - pile à combustible à hydrogène

*Forme abrégée :* PAC à hydrogène, pile à hydrogène.

*Domaine :* Chimie-Énergie.

*Définition :* Cellule électrochimique qui produit de l'électricité par oxydation de l'hydrogène à l'anode et par réduction de l'oxygène à la cathode.

*Note :*

1. La pile à combustible à hydrogène fonctionne selon un processus inverse de la décomposition de l'eau par électrolyse.

2. La pile à combustible à hydrogène est principalement utilisée pour alimenter un moteur électrique en remplacement d'accumulateurs.

3. On emploie couramment les termes « hydrogène » et « oxygène » au lieu des dénominations scientifiques « dihydrogène » et « dioxygène ».

*Voir aussi :* cellule électrochimique, décomposition de l'eau.

*Équivalent étranger :* hydrogen fuel cell.

#### - pile à combustible à hydrogène alcaline

*Forme abrégée :* PAC alcaline, pile à hydrogène alcaline.

*Domaine :* Chimie-Énergie.

*Définition :* Pile à combustible à hydrogène dont l'électrolyte est une solution aqueuse alcaline.

*Note :*

1. La pile à combustible à hydrogène alcaline utilise généralement une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium.

2. La pile à combustible à hydrogène alcaline est principalement utilisée dans le domaine spatial.

*Voir aussi :* pile à combustible à hydrogène, pile à combustible à hydrogène à membrane échangeuse d'anions, pile à combustible à hydrogène à membrane échangeuse de protons, pile à combustible à hydrogène à oxyde céramique.

*Équivalent étranger :* alkaline fuel cell (AFC).

#### - pile à combustible à hydrogène à membrane échangeuse d'anions

*Forme abrégée* : PAC à membrane échangeuse d'anions, pile à hydrogène à membrane échangeuse d'anions.

*Domaine* : Chimie-Énergie.

*Définition* : Pile à combustible à hydrogène dont les deux compartiments sont séparés par une membrane polymère conductrice d'anions hydroxydes.

*Voir aussi* : pile à combustible à hydrogène, pile à combustible à hydrogène alcaline, pile à combustible à hydrogène à membrane échangeuse de protons, pile à combustible à hydrogène à oxyde céramique.

*Équivalent étranger* : alkaline anion exchange membrane fuel cell (AAEMFC), alkaline polymer electrolyte fuel cell (APEFC), anion exchange membrane fuel cell (AEMFC).

#### **- pile à combustible à hydrogène à membrane échangeuse de protons**

*Forme abrégée* : PAC à membrane échangeuse de protons, pile à hydrogène à membrane échangeuse de protons, pile à MEP.

*Domaine* : Chimie-Énergie.

*Définition* : Pile à combustible à hydrogène dont les deux compartiments sont séparés par une membrane polymère conductrice de protons.

*Voir aussi* : pile à combustible à hydrogène, pile à combustible à hydrogène alcaline, pile à combustible à hydrogène à membrane échangeuse d'anions, pile à combustible à hydrogène à oxyde céramique.

*Équivalent étranger* : proton exchange membrane fuel cell (PEMFC).

#### **- pile à combustible à hydrogène à oxyde céramique**

*Forme abrégée* : PAC à oxyde céramique, pile à hydrogène à oxyde céramique.

*Domaine* : Chimie-Énergie.

*Définition* : Pile à combustible à hydrogène fonctionnant à haute température, dont les deux compartiments sont séparés par une membrane en oxyde céramique conductrice d'anions oxydes.

*Note* :

1. Les anions oxydes assurant la conductivité des membranes en oxyde céramique sont des atomes d'oxygène ayant capté deux électrons  $O^{2-}$ .

2. Certains types de pile à combustible à hydrogène à oxyde céramique utilisent du gaz naturel qui, introduit à l'anode, subit un reformage produisant localement de l'hydrogène.

3. On trouve aussi le terme « pile à combustible à oxyde solide ».

4. On emploie couramment le terme « hydrogène » au lieu de la dénomination scientifique « dihydrogène ».

*Voir aussi* : pile à combustible à hydrogène, pile à combustible à hydrogène alcaline, pile à combustible à hydrogène à membrane échangeuse d'anions, pile à combustible à hydrogène à membrane échangeuse de protons, reformage.

*Équivalent étranger* : solid oxide fuel cell (SOFC).

#### **- production d'hydrogène par électrolyse de l'eau**

*Domaine* : Chimie-Énergie.

*Synonyme* : conversion de l'électricité en hydrogène.

*Définition* : Conversion, par électrolyse de l'eau, d'une énergie électrique en une énergie chimique sous forme d'hydrogène.

*Note* :

1. L'hydrogène ainsi obtenu peut être utilisé en l'état, stocké, ou combiné avec du dioxyde de carbone pour produire du méthane par méthanation.

2. On emploie couramment le terme « hydrogène » au lieu de la dénomination scientifique « dihydrogène ».

*Voir aussi* : décomposition de l'eau, injection d'hydrogène, méthanation, stockage souterrain de l'hydrogène.

*Équivalent étranger* : power-to-gas (P2G, PTG), power-to-hydrogen (P2H, P2H<sub>2</sub>).

*Attention* : Cette publication annule et remplace celle du terme « transformation de l'électricité en gaz » au *Journal officiel* du 19 septembre 2018.

#### **- reformage, n.m.**

*Domaine* : Pétrole et Gaz-Chimie.

*Définition* : Procédé catalytique qui permet, à partir de composés hydrocarbonés mélangés à de l'air ou à de la vapeur d'eau, de produire un gaz riche en hydrogène.

*Note* :

1. Le reformage est utilisé en raffinage en vue d'obtenir une essence ayant une teneur en hydrocarbures aromatiques supérieure, et ainsi un indice d'octane plus élevé.

2. On emploie couramment le terme « hydrogène » au lieu de la dénomination scientifique « dihydrogène ».

*Voir aussi* : reformeur, vaporeformage.

*Équivalent étranger* : catalytic reforming, reforming.

*Attention* : Cette publication annule et remplace celles du *Journal officiel* du 22 septembre 2000 et du 24 avril 2010.

#### **- reformeur, n.m.**

*Domaine* : Pétrole et Gaz-Chimie.

*Synonyme* : unité de reformage.

*Définition* : Installation dans laquelle on procède au reformage.

*Voir aussi* : reformage, vaporeformeur.

*Équivalent étranger* : reformer.

*Attention* : Cette publication annule et remplace celles des termes « reformeur » et « unité de reformage » au *Journal officiel* du 22 septembre 2000 et du 24 avril 2010.

#### **- réservoir d'hydrogène gazeux**

*Domaine* : Énergie-Transports et Mobilité.

*Définition* : Réservoir qui permet de stocker de l'hydrogène à l'état gazeux à haute pression et à température ambiante.

*Note* :

1. Un réservoir d'hydrogène gazeux est généralement constitué d'une enveloppe étanche autour de laquelle sont enroulées des fibres de carbone assurant la résistance à la pression.

2. Un réservoir d'hydrogène gazeux peut être embarqué dans un véhicule.

3. On emploie couramment le terme « hydrogène » au lieu de la dénomination scientifique « dihydrogène ».

*Voir aussi* : réservoir d'hydrogène liquéfié, station de distribution d'hydrogène, véhicule à hydrogène.

*Équivalent étranger* : hydrogen high pressure tank, hydrogen high pressure vessel.

#### **- réservoir d'hydrogène liquéfié**

*Domaine* : Énergie-Pétrole et Gaz.

*Définition* : Réservoir cryostatique qui permet de stocker de l'hydrogène à l'état liquide refroidi et maintenu à la température de  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

*Note* :

1. Le stockage de l'hydrogène à l'état liquide est notamment employé dans des applications industrielles comme la propulsion spatiale.

2. On emploie couramment le terme « hydrogène » au lieu de la dénomination scientifique « dihydrogène ».

*Voir aussi* : réservoir d'hydrogène gazeux.

*Équivalent étranger* : cryogenic hydrogen fuel tank.

#### **- station de distribution d'hydrogène**

*Forme abrégée* : station hydrogène.

*Domaine* : Énergie-Transports et Mobilité.

*Définition* : Station-service permettant d'effectuer le ravitaillement des véhicules à hydrogène.

*Note* :

1. L'hydrogène est soit acheminé jusqu'à la station, soit produit localement par électrolyse.

2. On trouve aussi, dans l'usage, le terme « station de recharge d'hydrogène », qui est déconseillé.

3. On emploie couramment le terme « hydrogène » au lieu de la dénomination scientifique « dihydrogène ».

*Voir aussi* : véhicule à hydrogène.

*Équivalent étranger* : hydrogen filling station, hydrogen fueling station, hydrogen refilling station (HRS), hydrogen refueling station (HRS), hydrogen station.

#### - stockage de l'hydrogène dans un solide

*Domaine* : Énergie-Chimie.

*Définition* : Stockage réversible de l'hydrogène, qui est incorporé dans un matériau solide poreux par réaction chimique, notamment par formation d'un hydrure, ou par sorption.

*Note* :

1. On trouve aussi les termes « stockage de l'hydrogène solide » et « stockage solide de l'hydrogène », qui sont déconseillés.

2. On emploie couramment le terme « hydrogène » au lieu de la dénomination scientifique « dihydrogène ».

*Voir aussi* : réservoir d'hydrogène gazeux, réservoir d'hydrogène liquéfié, sorption, stockage souterrain de l'hydrogène.

*Équivalent étranger* : solid hydrogen storage.

#### - stockage souterrain de l'hydrogène

*Domaine* : Énergie-Pétrole et Gaz.

*Définition* : Stockage, en grande quantité et sous une forme comprimée, d'hydrogène à l'état gazeux dans des cavités souterraines naturelles ou artificielles.

*Note* :

1. Le stockage souterrain de l'hydrogène permet d'ajuster dans le temps la production d'énergie à sa consommation, notamment lorsque l'énergie est produite à partir d'une source d'énergie renouvelable intermittente.

2. On emploie couramment le terme « hydrogène » au lieu de la dénomination scientifique « dihydrogène ».

*Voir aussi* : production d'hydrogène par électrolyse de l'eau, stockage de l'hydrogène dans un solide.

*Équivalent étranger* : hydrogen mass storage.

#### - vaporeformage, n.m.

*Domaine* : Pétrole et Gaz-Chimie.

*Synonyme* : reformage à la vapeur.

*Définition* : Reformage qui s'effectue à haute température et en présence de vapeur d'eau.

*Voir aussi* : reformage, vaporeformeur.

*Équivalent étranger* : steam reforming.

*Attention* : Cette publication annule et remplace celle du terme « reformage à la vapeur » au *Journal officiel* du 12 janvier 1999.

#### - vaporeformeur, n.m.

*Domaine* : Pétrole et Gaz-Chimie.

*Synonyme* : reformeur à la vapeur.

*Définition* : Installation dans laquelle on procède au vaporeformage.

*Voir aussi* : reformeur, vaporeformage.

*Équivalent étranger* : steam reformer.

*Attention* : Cette publication annule et remplace celle du terme « reformeur à vapeur » au *Journal officiel* du 12 janvier 1999.

#### - véhicule à hydrogène

*Forme développée* : véhicule électrique à hydrogène.

*Domaine* : Transports et Mobilité-Énergie.

*Définition* : Véhicule électrique dont l'énergie est produite par une pile à combustible embarquée alimentée par un réservoir d'hydrogène.

*Voir aussi* : pile à combustible à hydrogène, réservoir d'hydrogène gazeux, réservoir d'hydrogène liquéfié.

*Équivalent étranger* : fuel cell electric vehicle (FCEV), hydrogen vehicle.

*La table d'équivalence des termes français et étrangers est publiée en annexe sur [www.lactualitechimique.org](http://www.lactualitechimique.org) (page liée à cet article, téléchargeable librement).*



Hype, la première flotte de taxis hydrogène au monde, a été lancée le 7 décembre 2015 pendant la COP 21, par la Société du Taxi Électrique Parisien (STEP), avec cinq premiers véhicules. La flotte en compte aujourd'hui plus de 600 ; l'objectif est de faire circuler 10 000 véhicules en 2024, à l'occasion de l'année olympique. Ces taxis, alimentés par une pile à hydrogène, disposent d'une autonomie de plus de 500 km et se rechargent en 3 à 5 minutes, sans émettre de polluants locaux (NO<sub>x</sub>...), ni CO<sub>2</sub>, ni bruit ; seule de la vapeur d'eau est rejetée. © Air Liquide.

### La production d'hydrogène décarbonée et compétitive : un défi technologique à relever

L'hydrogène est appelé à jouer un rôle important dans la transition énergétique vers un monde décarboné, sous une condition impérative : sa production doit être à la fois décarbonée et compétitive par rapport au procédé actuel – le vaporeformage de gaz naturel – dans un contexte où une taxe carbone de niveau approprié serait mise en place.

L'outil de base proposé par l'Union européenne [1] est l'électrolyse de l'eau associée à la production d'électricité décarbonée, issue d'énergies renouvelables ou d'énergie nucléaire. À côté de l'électrolyse alcaline, largement répandue et récemment améliorée en termes de performances et de souplesse d'emploi, se sont développées de nouvelles technologies concurrentes : l'électrolyse PEM (« proton exchange membrane »), utilisant les importants développements associés à la pile à combustible PEMFC, d'ores et déjà à un stade industriel, et l'électrolyse haute température, à un stade de développement avancé.

La technologie actuelle, basée sur le vaporeformage de gaz naturel, pourrait rester partiellement en service, moyennant son association avec les technologies de captage et stockage de CO<sub>2</sub>, voire être à la source d'hydrogène exporté par les producteurs actuels de gaz naturel. Une variante originale pour la production décarbonée d'hydrogène à partir de gaz naturel est la pyrolyse haute température. Moins gourmande en énergie (électrique) que l'électrolyse, elle conduit d'une part au produit recherché, l'hydrogène, et d'autre part à du noir de carbone.

Connues depuis longtemps, les sources d'hydrogène naturel ont longtemps été considérées comme marginales. Une exploration systématique a conduit à une réévaluation des ressources, sans que l'on puisse pour l'instant les considérer comme susceptibles de déboucher à court terme sur une production industrielle.

Le présent dossier tente donc une mise au point à date sur les bases scientifiques et techniques de la production d'H<sub>2</sub> décarboné. Il comporte quatre articles détaillant plus avant les voies d'accès à de l'hydrogène décarboné évoquées plus haut. Les deux premiers concernent les procédés d'électrolyse de l'eau en développement (électrolyses à haute température d'une part, et à membrane échangeuse de proton d'autre part). Les performances de ces voies sont discutées en référence à la voie électrolyse alcaline.

Le troisième présente un procédé de pyrolyse plasma du méthane à haute température. Les procédés actuels sont axés sur la production de noir de carbone, dont les applications industrielles concernent des tonnages limités. Pour la production massive d'hydrogène, il faudra traiter le problème du stockage long terme du carbone produit dont les spécifications pourront être relâchées. Toutefois, ce carbone très divisé produit en masse présentera un risque d'auto-inflammation



La célèbre nébuleuse de la Tête de Cheval dans la constellation d'Orion. © ESO

important en présence d'air, à l'instar de certains charbons ou encore des catalyseurs hétérogènes « cokés » (pyrophoricité). Les procédés existants de passivation par oxydation ménagée devront donc être adaptés.

Le dernier article fait le point sur un sujet émergent, l'hydrogène naturel, qui pourrait s'avérer une nouvelle ressource géologique d'énergie renouvelable inattendue jusqu'alors. Ce dernier sujet a fait l'objet début juin 2021 à Paris d'un colloque qui a réuni (virtuellement) plus de 500 participants, acteurs de la recherche, de l'industrie et de la finance [2].

Enfin, « Un point sur... » le stockage solide de l'hydrogène vient compléter dans ce numéro l'information offerte à nos lecteurs.

Dans le cadre de l'Union européenne, la production d'hydrogène décarboné semble donc s'orienter à court terme vers l'électrolyse, en attendant la création au niveau international d'un marché d'hydrogène décarboné alimenté par des pays disposant à la fois d'importantes ressources de gaz naturel et de capacités de stockage de CO<sub>2</sub>, ou de ressources abondantes d'énergies renouvelables.

[1] Parlement européen, Rapport sur une stratégie européenne pour l'hydrogène, [www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2021-0116\\_FR.html](http://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2021-0116_FR.html)

[2] H-NAT 2021, [www.hnatsummit.com](http://www.hnatsummit.com)

**Jean-Pierre Foulon** et **Hervé Toulhoat**, membres du Comité de rédaction de *L'Actualité Chimique*, et **Edouard Freund**, chef de projet, Fondation de la Maison de la Chimie.

\* Courriels : [jpfoulon@wanadoo.fr](mailto:jpfoulon@wanadoo.fr) ; [herve.toulhoat@orange.fr](mailto:herve.toulhoat@orange.fr) ; [edouard.freund@gmail.com](mailto:edouard.freund@gmail.com)

### Production d'hydrogène par électrolyse de la vapeur d'eau à haute température

**Résumé** La technologie d'électrolyse de la vapeur d'eau à haute température (EHT) est une technologie à haut rendement ayant le potentiel de produire de l'hydrogène décarboné à environ 2 €/kg<sub>H<sub>2</sub></sub>. Cette technologie présente en outre des spécificités telles que l'aptitude à la co-électrolyse (vapeur d'eau et CO<sub>2</sub>) et le fonctionnement réversible électrolyse/pile à combustible, ouvrant des perspectives additionnelles telles que la production de produits de synthèse à haute valeur ajoutée (power-to-X) et le stockage des énergies renouvelables.

**Mots-clés** **Électrolyse, hydrogène, cellule à oxyde solide, haut rendement, co-électrolyse, réversibilité.**

**Abstract** **Production of hydrogen by high temperature steam electrolysis**

High temperature steam electrolysis technology (HTE) is a high efficiency technology with the potential to produce carbon-free hydrogen at around 2 €/kg<sub>H<sub>2</sub></sub>. This technology also has specific features, such as ability to co-electrolysis (steam and CO<sub>2</sub>) and reversible operation (electrolysis/fuel cell), opening up additional perspectives such as the production of high added value synthetic products (power-to-X) and the storage of renewable energies.

**Keywords** **Electrolysis, hydrogen, solid oxide cell, high efficiency, co-electrolysis, reversibility.**

#### Le rôle de l'hydrogène dans la transition énergétique

La Commission européenne a présenté sa feuille de route pour aller vers une économie compétitive à faibles émissions de carbone en 2050. Pour réaliser ce « Green Deal » européen, il est nécessaire de repenser les politiques d'approvisionnement en énergie propre dans l'ensemble des secteurs économiques [1]. L'hydrogène et l'électricité sont tous deux des vecteurs d'énergie décarbonés pouvant être produits à partir de ressources renouvelables. Ils s'avèrent tous deux nécessaires dans un système énergétique durable et complémentaires l'un de l'autre [2]. L'hydrogène peut en effet jouer un rôle clé, en tant que ressource pour les procédés industriels, combustible pour le transport et le bâtiment, et vecteur de stockage de l'électricité de forte capacité et/ou à grande distance [3]. Une forte augmentation de la part de l'hydrogène dans le mix énergétique global européen est pressentie, avec une valeur atteignant 13-14 % en 2050 contre moins de 2 % actuellement [3].

#### Les enjeux

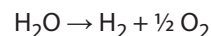
Dans ce contexte, il apparaît donc nécessaire de structurer et coordonner le marché de l'hydrogène, son infrastructure de production, transport et stockage, ainsi que ses modèles économiques entre les États membres. Il faudra notamment augmenter la capacité de production d'hydrogène décarboné, en premier lieu via l'électrolyse de l'eau. Au niveau européen, un plan de déploiement de 40 GW d'électrolyse est ainsi proposé d'ici 2030, permettant lors de son exploitation de produire 4,4 millions de tonnes d'hydrogène par an, auxquels s'ajoutent 40 GW additionnels en Afrique du Nord et Ukraine, l'ensemble permettant d'éviter l'émission de 82 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par an [2]. Cela nécessite également de développer le tissu industriel de production de ces électrolyseurs, sur toute la chaîne de la valeur requise. En outre, la production d'hydrogène décarboné n'est actuellement pas compétitive par rapport à la production

conventionnelle à partir d'énergie fossile (vaporeformage du gaz naturel en particulier). Le déploiement d'électrolyseurs de forte puissance et de l'infrastructure susmentionnée est de nature à baisser fortement le coût de l'hydrogène décarboné produit. En outre, l'électrolyse présente encore un potentiel d'innovations important, permettant de gagner en performance, en durée de vie et en rendement, ces trois paramètres jouant un rôle primordial sur le coût de l'hydrogène.

Les enjeux sont donc de différents ordres : politiques et stratégiques d'une part, industriels, techniques et scientifiques d'autre part.

#### La place de l'électrolyse de la vapeur d'eau à haute température (EHT)

L'électrolyse de l'eau pour produire de l'hydrogène et de l'oxygène peut être effectuée soit à basse température à partir d'eau liquide, soit à haute température à partir de vapeur d'eau. La réaction globale reste la même :



Par contre, la dissociation de la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O (g)) nécessite moins d'énergie par rapport à celle de l'eau liquide (H<sub>2</sub>O (l)) (figure 1) ; la différence correspondant à l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau, qui se traduit par la discontinuité de la courbe de ΔH.

De plus, lorsque la température augmente, une partie de l'énergie électrique nécessaire pour dissocier la molécule d'eau en phase gazeuse peut être remplacée par de la chaleur. Une telle situation existe concrètement lorsqu'il y a localement une source de chaleur à bas coût, voire fatale, ce qui peut être le cas sur de nombreux sites, notamment industriels. De ce fait, il semblerait intéressant de travailler à une température la plus haute possible. La gamme de fonctionnement considérée comme la plus pertinente aujourd'hui se situe entre 700 et 850 °C, suffisamment élevée pour que la conductivité de l'électrolyte et les performances soient élevées, mais pas trop du fait de limitations liées à la tenue des matériaux à haute température (tenue mécanique et physico-chimique).

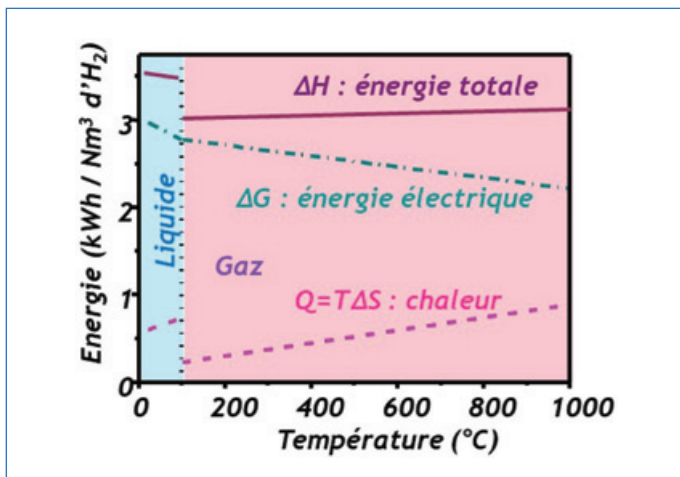


Figure 1 - Besoin énergétique pour la réaction d'électrolyse en fonction de la température; enthalpie ( $\Delta H$ ), enthalpie de Gibbs ( $\Delta G$ ), entropie ( $T\Delta S$ ). D'après [5].

Ainsi, si l'on compare la part électricité/chaleur pour les technologies d'électrolyse, un ratio électricité/chaleur de 85/15 est obtenu pour les technologies d'électrolyse de l'eau liquide à basse température, alors qu'il peut atteindre 70/30 pour l'électrolyse de la vapeur d'eau à haute température [4]. La substitution d'une partie de l'énergie électrique par de la chaleur donne lieu à des rendements électriques élevés et contribue à diminuer le coût de l'hydrogène produit. En effet, le rendement électrique se définit par :

$$\eta_{el} = PCI_{H_2 \text{ produit}} / P_{\text{élec consommée}}$$

$PCI$  étant le pouvoir calorifique inférieur<sup>(1)</sup> de l'hydrogène, soit 242 kJ/mol, et  $P_{\text{élec consommée}}$  la puissance électrique utilisée pour produire une mole d' $H_2$ . Ainsi, plus la puissance électrique consommée est faible pour une même quantité d'hydrogène produite, plus le rendement est élevé.

Les consommations électriques des systèmes électrolyseurs actuels (reportées dans [6]) sont de l'ordre de 50 kWh/kg $H_2$  pour l'électrolyse alcaline (mettant en œuvre un électrolyte liquide alcalin), 55 pour l'électrolyse PEM (mettant en œuvre un électrolyte solide sous forme de membrane PEM, membrane polymère échangeuse de protons), et 40 pour l'EHT. Bien que les tailles d'électrolyseurs et leurs conditions de fonctionnement, notamment la pression de fonctionnement, différent d'un électrolyseur à l'autre, ces valeurs permettent de comparer qualitativement les technologies et confirment l'avantage de l'EHT sur ce point. Les perspectives visées à l'horizon 2030 sont respectivement de 48, 48 et 37 kWh/kg $H_2$ , soit 70 % de rendement PCI pour les électrolyses alcalines et PEM et 91 % pour l'EHT.

Le débit d'hydrogène produit est directement lié au courant électrique par la loi de Faraday :

$$Q_{H_2} = I/2F$$

$Q_{H_2}$  étant le débit d'hydrogène produit (en mol/s) sous l'effet du courant  $I$  (en A), et  $F$  la constante de Faraday (96 500 C/mol).

Pour un même courant, et donc une même production d'hydrogène, une consommation électrique plus faible est le résultat d'une tension plus faible. Ainsi l'électrolyse de la vapeur d'eau à haute température, qui présente une consommation électrique plus faible que les autres technologies d'électrolyse, présente une tension de fonctionnement également plus faible. De manière schématique, la figure 2 compare les performances des trois technologies d'électrolyse : électrolyse de l'eau basse température PEM et alcaline, et électrolyse

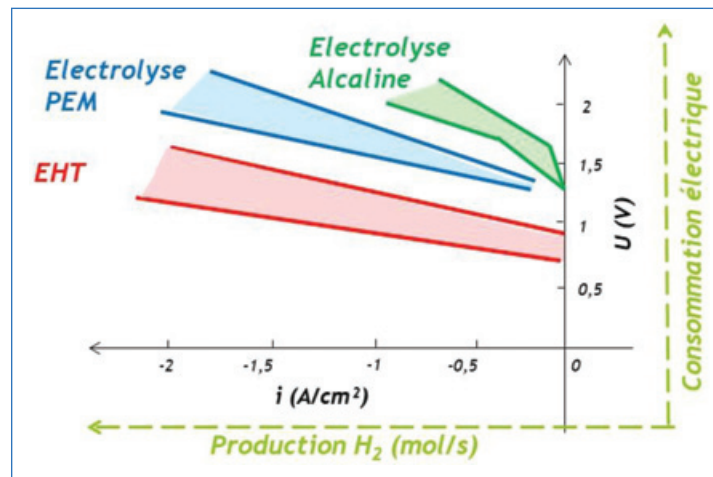


Figure 2 - Courbe de performance intensité-potential (i-V) comparée des trois technologies d'électrolyse : électrolyses de l'eau à basse température alcaline et PEM et électrolyse de la vapeur d'eau à haute température (EHT). Les axes secondaires (en vert) présentent les grandeurs auxquelles les densités de courant (ou courant) et tensions sont corrélées ; par convention les courants et densités de courant en mode électrolyse sont exprimés en négatif, par opposition au mode pile à combustible. D'après [7].

de la vapeur d'eau à haute température (EHT). En abscisse figure la densité de courant – unité permettant de comparer les technologies entre elles, même quand les surfaces des cellules d'électrolyse sont différentes – qui est corrélée au débit d'hydrogène produit. D'un point de vue investissement, il est préférable de produire le maximum d'hydrogène pour une même taille d'électrolyseur, et donc de pouvoir appliquer des densités de courant élevées. L'EHT, comme l'électrolyse PEM, permettent de fonctionner à des densités de courant élevées. En ordonnée figure la tension, corrélée à la consommation électrique. L'EHT permet la tension de fonctionnement la plus faible à densité de courant donnée, à l'origine du rendement électrique amélioré.

La technologie d'électrolyse alcaline, la plus mature, est actuellement la technologie présentant le coût d'investissement (CAPEX, « capital expenditure ») le plus faible, avec une valeur de 1 250 €/ (kg/j d' $H_2$  produit)<sup>(2)</sup>, soit 600 €/kW compte tenu du rendement associé. Les optimisations envisagées d'ici 2030 permettent d'anticiper un gain jusqu'à 800 €/ (kg/j d' $H_2$  produit), soit 400 €/kW [6].

La technologie d'électrolyse PEM présente un coût actuel plus élevé : 2 100 €/ (kg/j d' $H_2$  produit), soit 900 €/kW. En 2030, est visée une valeur de 1 000 €/ (kg/j d' $H_2$  produit), soit 500 €/kW. Enfin la technologie EHT, la moins mature à ce jour, présente actuellement un coût bien plus élevé : 3 550 €/ (kg/j d' $H_2$  produit), soit 2 130 €/kW. D'ici 2030, le gain en maturité de la technologie, associé à l'accroissement des capacités de production, permettent d'espérer un gain en termes de coût considérable et de viser une valeur de 800 €/ (kg/j d' $H_2$  produit), comme la technologie alcaline, soit 520 €/kW compte tenu du rendement associé [6].

La technologie EHT présente donc une perspective de baisse du CAPEX importante d'ici 2030. Compte tenu de son haut rendement, un gain sur le coût de fonctionnement (OPEX, « operational expenditure ») est également anticipé, conduisant à un LCOH (« levelized cost of hydrogen ») pouvant atteindre 2 €/kg, pour des unités de forte puissance (100 MW), avec un coût de l'électricité à 40 €/MWh. Cette valeur est inférieure aux cibles de l'Union européenne, qui visent moins de 3 €/kg d'ici 2030 pour la molécule d'hydrogène, quelle que

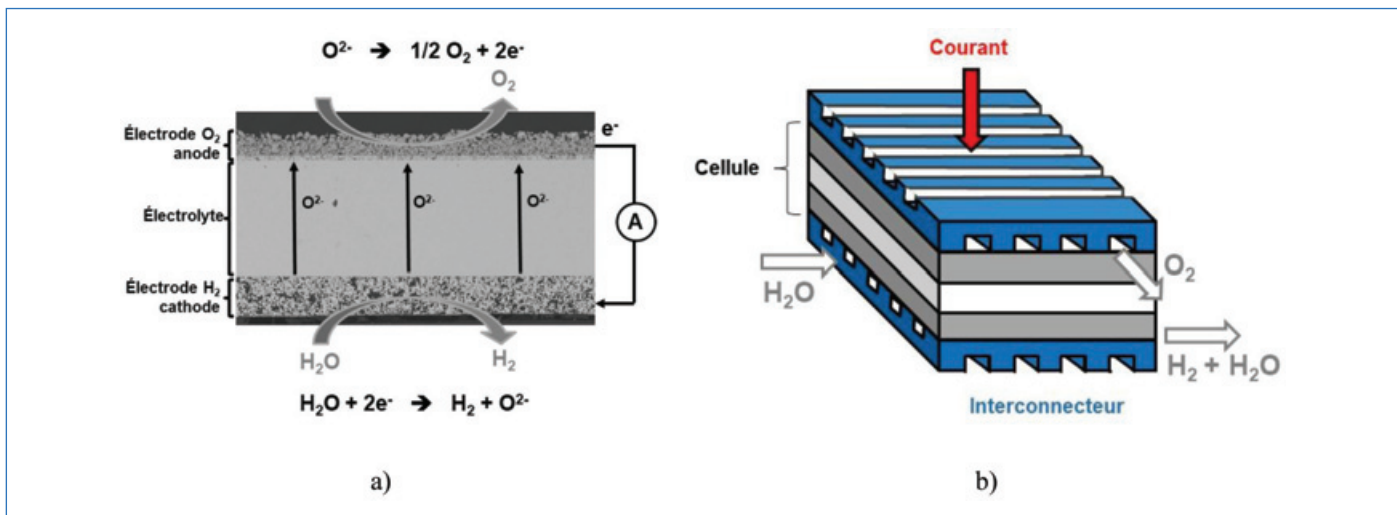


Figure 3 - a) Coupe d'une cellule et représentation schématique des demi-réactions aux électrodes. b) Représentation schématique d'un motif élémentaire, constitué d'une cellule et de deux demi-interconnecteurs.

soit la technologie retenue pour sa fabrication [6]. La technologie EHT présente donc un fort potentiel disruptif pour produire massivement de l'hydrogène à haut rendement et à bas coût.

### La technologie EHT

Du fait de sa température de fonctionnement, comprise entre 700 et 850 °C, la cellule, cœur de la réaction électrochimique de production d'hydrogène, est en céramique. Elle n'inclut aucun catalyseur en métaux nobles et sa structure comme ses matériaux constitutifs sont actuellement identiques à ceux des cellules pour piles à combustible à oxyde solide (SOFC, « solid oxide fuel cell ») [8]. Elle est ainsi constituée d'un électrolyte dense étanche aux gaz, en oxyde de zirconium stabilisé à l'oxyde d'yttrium (YSZ), conducteur ionique (ions O<sup>2-</sup>), et de deux électrodes, poreuses, conducteurs électroniques et ioniques, pour l'apport en réactifs et l'évacuation des produits.

L'électrode à hydrogène – la cathode – est un cermet nickel-zircone yttrée (Ni-YSZ). L'électrode à oxygène – l'anode – est un oxyde de structure pérovskite, souvent composé de La, Sr, Co et Fe, dénommé LSCF. La *figure 3a* présente une cellule en coupe et illustre les demi-réactions aux électrodes.

Une cellule EHT présente en général une surface de l'ordre de la centaine de cm<sup>2</sup>, permettant une production de quelques g/h d'H<sub>2</sub>. Afin d'atteindre les valeurs de productions massives requises pour les applications visées, les cellules sont empilées pour former des empilements (« stacks »). Pour ce faire, de part et d'autre d'une cellule sont placés deux demi-interconnecteurs métalliques, en acier inoxydable ferritique, afin de conduire le courant électrique, et pourvus de canaux pour apporter les réactifs et évacuer les produits. L'ensemble forme un motif élémentaire ou « single repeat unit » (SRU). Le nombre de SRU intégrés au stack est ajusté en fonction de la puissance visée, de l'ordre de plusieurs dizaines dans les stacks d'EHT actuels. Enfin, des étanchéités sont intégrées, afin de séparer les chambres H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub> à l'intérieur du stack et vis-à-vis de l'extérieur. Ces étanchéités sont constituées de matériau vitrocéramique.

Comme pour les autres technologies d'électrolyse, les stacks sont ensuite assemblés en nombres variables dans des modules, qui intègrent les fonctions thermique, fluide,

électrique et mécanique nécessaires au fonctionnement du stack. Enfin, plusieurs modules peuvent être assemblés pour augmenter la puissance des électrolyseurs et forment alors un système d'électrolyse. Ce caractère modulaire offrira de la flexibilité dans le pilotage des unités de forte puissance, avec la possibilité de démarrer ou non certains modules selon le besoin en hydrogène, et facilitera les opérations de maintenance, l'ensemble de l'unité d'électrolyse ne devant pas être intégralement arrêté pour une intervention sur un module.

### Statut et challenges de l'EHT

#### Performance et durabilité

Pour les cellules EHT, deux technologies sont principalement considérées. Toutes deux planaires, elles présentent soit un électrolyte épais (~ 100 μm d'épaisseur) et deux électrodes minces – ce sont alors des cellules dites à électrolyte support (ESC) –, soit une électrode épaisse – l'électrode H<sub>2</sub>, plusieurs centaines de μm d'épaisseur –, un électrolyte très mince (moins de 10 μm) et l'électrode O<sub>2</sub> mince également – ce sont alors des cellules dites à électrode support (CSC) –, comme présenté schématiquement sur la *figure 4*. L'amincissement de l'électrolyte permet de diminuer les chutes ohmiques et donc d'améliorer fortement les performances de la cellule. Pour fixer les ordres de grandeur, des densités de courant jusqu'à deux fois supérieures sont obtenues avec des cellules à électrode support (- 1,2 A/cm<sup>2</sup> contre environ - 0,6 A/cm<sup>2</sup> pour des cellules à électrolyte support), pour une température inférieure de 100 °C (700-750 °C contre 800-850 °C) [9-10].

Les développements des stacks visent à conserver autant que possible les performances intrinsèques des cellules, ce qui nécessite en particulier d'assurer une bonne distribution fluide et électrique. La *figure 5a* compare les courbes i-V d'une cellule seule à un « short stack » de cinq cellules et à un stack échelle 1 composé de 25 cellules. Une bonne superposition des trois séries de courbes est observée, la performance de la cellule seule étant proche de celle de la meilleure cellule au sein des stacks. La bonne distribution fluide au sein du stack permet d'opérer avec des taux de conversion de la vapeur d'eau – quantité de vapeur d'eau nécessaire pour la réaction de production d'H<sub>2</sub> sur quantité totale introduite – élevés (> 85 %), comme cela est présenté sur la *figure 5b* [11].



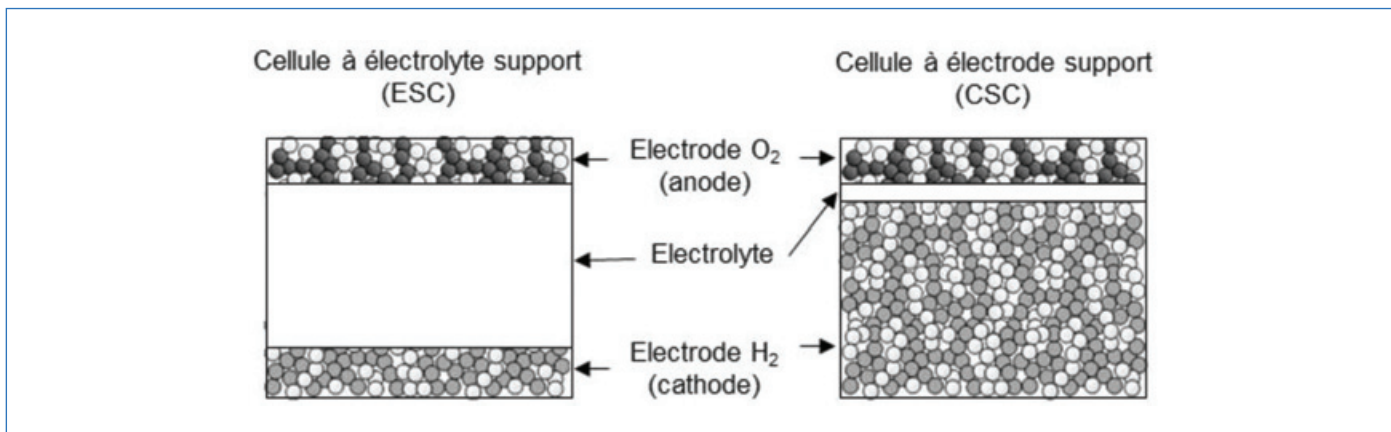


Figure 4 - Représentation schématique d'une cellule à électrolyte support (ESC) et d'une cellule à électrode support (CSC).

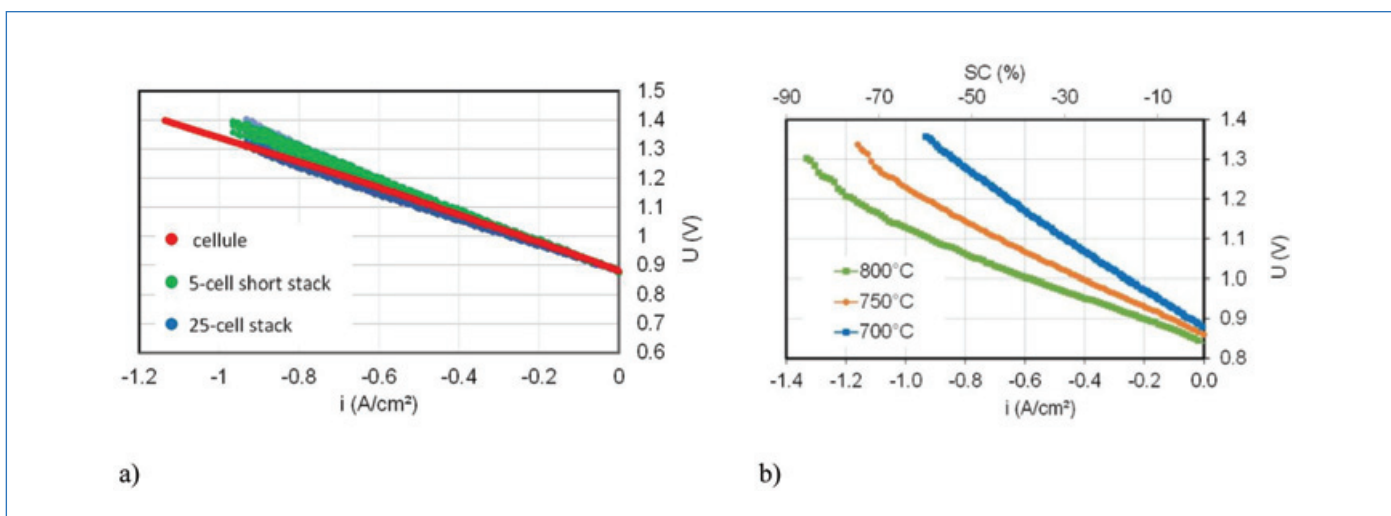


Figure 5 - a) Courbes i-V obtenues à 700 °C en 90 %H<sub>2</sub>O/10 %H<sub>2</sub> coté électrode H<sub>2</sub> (débit normalisé de 12 Nml/min/cm<sup>2</sup>), air coté électrode O<sub>2</sub> pour une monocellule (courbe rouge), un short stack de cinq cellules (5 courbes vertes) et un stack de vingt-cinq cellules (25 courbes bleues); le type de cellules considéré est une cellule à électrode support, identique dans les trois cas. b) Effet de la température sur la courbe i-V du stack vingt-cinq cellules (tension moyenne reportée) pour les mêmes conditions de gaz que la figure 5a; l'axe x secondaire indique le taux de conversion de la vapeur d'eau SC.

Les courbes de la figure 5 confirment des valeurs de densité de courant de l'ordre de - 1 A/cm<sup>2</sup> pour une tension de 1,3 V<sup>(3)</sup>, ainsi qu'un effet croissant de la température sur la densité de courant. L'augmentation du débit de vapeur d'eau influe dans le même sens (effet non présenté ici).

La feuille de route européenne vise à augmenter encore la densité de courant, pour atteindre en 2030 une valeur de - 1,5 A/cm<sup>2</sup> [6]. Mais outre la performance intrinsèque atteignable avec les cellules et les stacks, leur durabilité est un paramètre important, particulièrement à ces niveaux de courant. Ce point constitue d'ailleurs à ce jour le principal enjeu de la technologie EHT, la plupart des mécanismes de dégradation des matériaux constitutifs, chimiques ou physico-chimiques étant thermiquement activés. La durabilité est évaluée lors d'essais de longue durée, typiquement sur plusieurs milliers d'heures. On notera que l'essai le plus long reporté à l'échelle laboratoire est aujourd'hui de 23 000 h à une densité de courant intermédiaire [12].

Le taux de dégradation est mesuré par l'augmentation de la tension nécessaire au maintien du courant et donc du flux d'hydrogène produit. Des taux de dégradation de l'ordre de 1 à 6 %/1 000 h sont reportés dans la littérature [9], pour des densités de courant et des taux de conversion de la vapeur généralement modérés, ces deux paramètres influant au

premier ordre sur la dégradation mesurée. Un des enjeux majeurs actuels porte donc sur l'abaissement de ce taux de dégradation, pour atteindre une valeur de 0,5 %/1 000 h, compatible avec une durée de vie de dix ans, au cours d'un fonctionnement à forte densité de courant (- 1,5 A/cm<sup>2</sup>) [6]. L'atteinte de cet objectif passe par la compréhension fine des mécanismes de dégradation et la proposition de solutions permettant d'une part de limiter ces mécanismes et stabiliser les matériaux et leur microstructure actuelle, et d'autre part de proposer des solutions disruptives avec des matériaux et des microstructures plus stables que les solutions actuelles.

### Fonctionnement en pression

Le fonctionnement en pression est également un objectif important. En effet, l'hydrogène, pour la plupart de ses usages, mais également pour son stockage ou son transport, doit être sous pression. Différentes études ont donc montré l'intérêt économique et technologique de le produire déjà pressurisé. Les électrolyses alcaline et PEM le font déjà pour la plupart, jusqu'à une trentaine de bars. La question du fonctionnement en pression de l'EHT se pose donc. Peu de laboratoires sont équipés d'installations EHT sous pression; on peut citer les instituts de recherche DTU au Danemark, DLR en Allemagne et le CEA-LITEN. La figure 6 présente l'effet de la pression sur

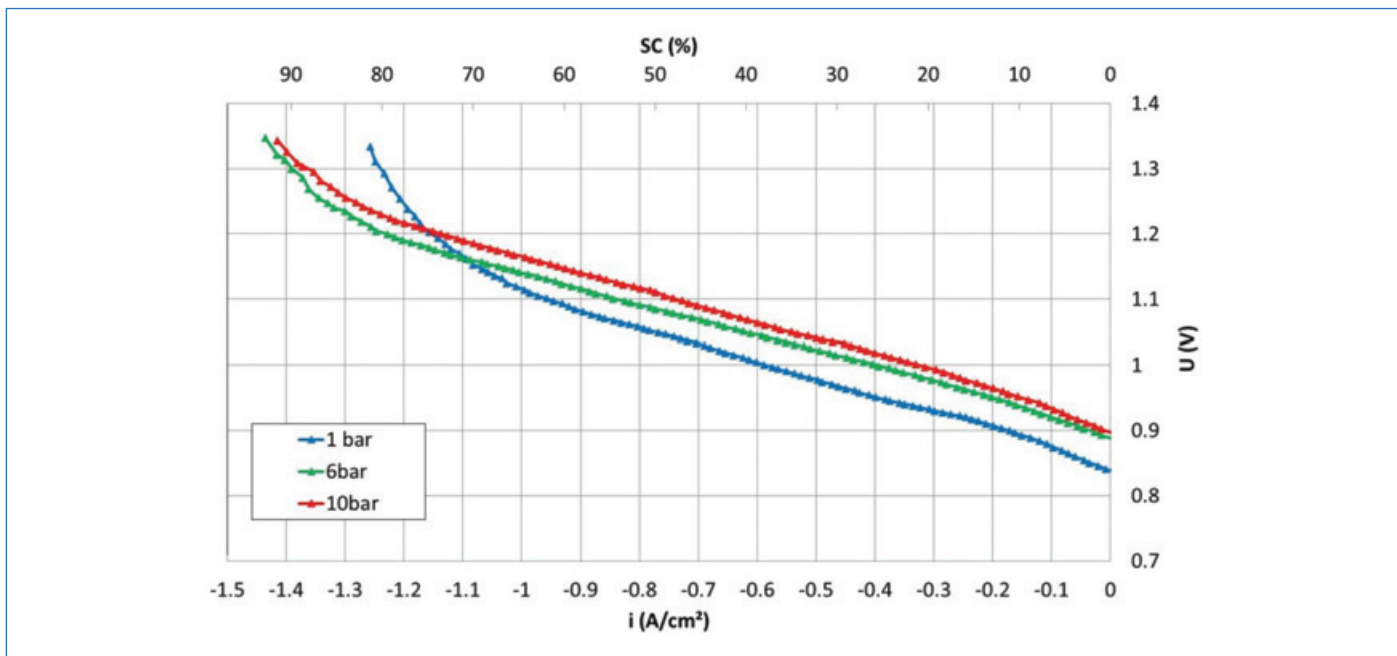


Figure 6 - Courbes i-V d'une cellule à électrode support obtenues à 800 °C, en 35 % N<sub>2</sub>/58,5 % H<sub>2</sub>O/6,5 % H<sub>2</sub> coté électrode H<sub>2</sub> (débit normalisé de 12 Nml/min/cm<sup>2</sup>), air coté électrode O<sub>2</sub> pour trois niveaux de pression (1, 6 et 10 bars); l'axe x secondaire indique le taux de conversion de la vapeur d'eau SC.

la courbe i-V d'une cellule. À faible densité de courant, on observe un effet négatif de la pression, la tension étant plus élevée du fait de l'augmentation de la tension à courant nul (OCV, « open circuit voltage ») avec la pression, selon la loi de Nernst. Par contre, à forte densité de courant, lorsque le comportement électrochimique de la cellule est piloté par le transport et la diffusion des gaz, l'effet de la pression devient favorable et les courbes se croisent. Pour l'essai reporté en figure 6, un gain de l'ordre de 20 % est observé sur la densité de courant maximum atteinte (1,4 A/cm<sup>2</sup>), et de manière associée un taux de conversion de la vapeur de presque 90 % [13]. Il apparaît de plus que le gain est obtenu entre 1 et 6 bars, et que le fait d'augmenter la pression à 10 bars n'ajoute rien en termes de performance électrochimique. Ce résultat, confirmé par les travaux de DTU [14] et DLR [15], indique que la technologie EHT est apte à fonctionner sous pression, comme l'électrolyse alcaline et PEM.

Il convient en outre de noter qu'au gain « électrochimique » s'ajoute un gain « système », le premier étage de compression de l'hydrogène entre 1 et 10 bars étant le plus énergivore.

### Couplage aux énergies renouvelables

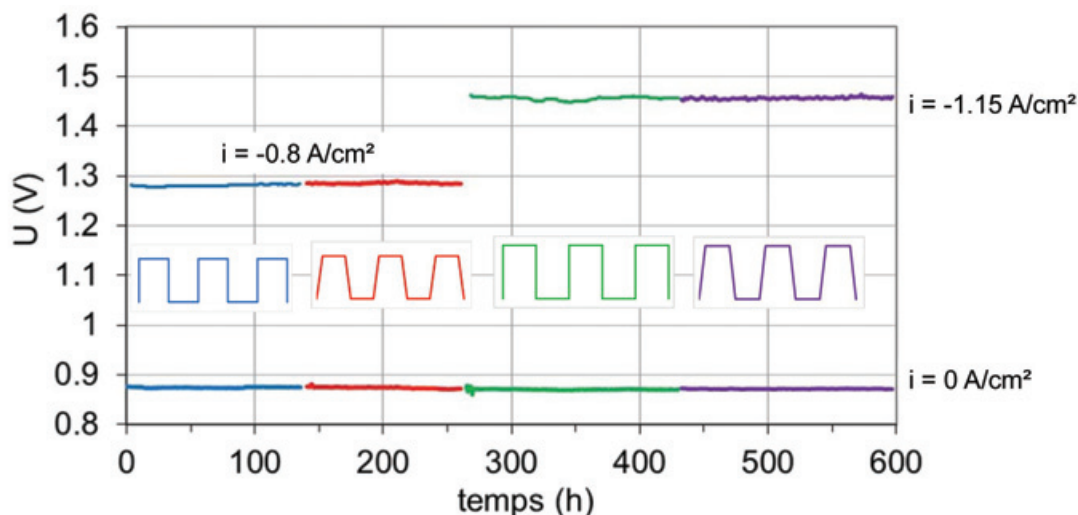
La production d'hydrogène décarboné nécessite une source d'électricité elle-même décarbonée, telle que les sources d'énergies renouvelables solaire ou éolienne. Or celles-ci sont par nature intermittentes, et la question du fonctionnement d'un EHT se pose alors de façon légitime. S'il semble invraisemblable de démarrer et arrêter un électrolyseur EHT en quelques minutes, il est en revanche envisageable, s'il est en « standby chaud », de démarrer rapidement la production d'hydrogène et d'effectuer un suivi de charge correspondant à l'électricité renouvelable disponible. La figure 7 présente quatre types de cycles de courant on/off appliqués sur un SRU. On observe d'une part qu'il a été possible d'effectuer ces quatre types de cycles, y compris les plus rapides et ceux conduisant à un fonctionnement en mode exothermique, et d'autre part qu'ils n'ont pas induit de dégradation accélérée du stack, la tension restant inchangée au cours de l'essai [16].

Schefold *et al.* confirment cela avec la réalisation de 80 000 cycles on/off à l'échelle d'une cellule [17]. Sous réserve d'un maintien du stack à chaud, le couplage de l'EHT aux énergies intermittentes semble donc tout à fait possible. La feuille de route européenne adresse ce point également et vise d'obtenir à l'échelle système à la fois des rampes en courant à partir d'un standby chaud (de l'ordre de quelques minutes), mais aussi des rampes de démarrage à froid en 4 h à l'horizon 2030 [6]. Ce point constitue un enjeu technologique majeur à l'échelle du SRU comme du stack.

### Maturité

Un dernier enjeu porte sur la montée en maturité de la technologie, avec en particulier la réalisation de systèmes d'électrolyse EHT de taille croissante et leur déploiement en conditions réelles hors du laboratoire. Le premier système de laboratoire a été mis en service au CEA en 2014 [18]. Il a permis de faire la preuve du concept de la technologie en intégrant un stack de vingt-cinq cellules et en produisant 1,2 Nm<sup>3</sup>/h d'H<sub>2</sub> au point de fonctionnement choisi<sup>(4)</sup>. Il a également permis de démontrer qu'il n'était pas nécessaire de disposer d'une source de chaleur à 700 °C pour atteindre d'excellents rendements. Le point de fonctionnement choisi pour ce système était légèrement exothermique. Grâce à la mise en œuvre d'échangeurs de chaleur performants, une récupération de la chaleur des gaz de sortie a pu être effectuée pour surchauffer la vapeur d'eau de 150 °C (température de la génération de vapeur) à 700 °C, sans consommer de puissance électrique.

Il a ainsi été démontré expérimentalement qu'une source de chaleur à 150 °C, utilisée dans ce cas uniquement pour vaporiser l'eau et produire la vapeur utilisée pour la réaction d'électrolyse, suffit pour obtenir un rendement de 85 % PCI. En l'absence de toute source de chaleur, le rendement vaudrait alors 74 % PCI, ce qui reste toutefois supérieur aux autres technologies d'électrolyse. Ce premier système de laboratoire a ouvert la voie et depuis, plusieurs systèmes ont pu être installés hors laboratoire par Sunfire, industriel allemand, et par Sylfen, startup du CEA, et d'autres sont déjà prévus



Type de cycle	Gamme de tension	Gamme de courant et rampe
Cycle rapide (bleu)	Entre l'OCV et la tension thermoneutre (~ 1,3 V)	De $i = 0$ à $i = -0,8$ A/cm <sup>2</sup> avec une rampe de 1 A/cm <sup>2</sup> /s
Cycle lent (rouge)	Entre l'OCV et la tension thermoneutre (~ 1,3 V)	De $i = 0$ à $i = -0,8$ A/cm <sup>2</sup> avec une rampe de 0,5 mA/cm <sup>2</sup> /s
Cycle rapide (vert)	Entre l'OCV et une tension exothermique de ~ 1,5 V	De $i = 0$ à $i = -1,15$ A/cm <sup>2</sup> avec une rampe de 1 A/cm <sup>2</sup> /s
Cycle lent (violet)	Entre l'OCV et une tension exothermique de ~ 1,5 V	De $i = 0$ à $i = -1,15$ A/cm <sup>2</sup> avec une rampe de 0,5 mA/cm <sup>2</sup> /s

Figure 7 - Effet d'un cyclage en courant sur l'évolution de la tension d'un SRU au cours du temps ; mesures effectuées à 800 °C, 90 %H<sub>2</sub>O/10 %H<sub>2</sub>, pour quatre types de cycles décrits dans le tableau.

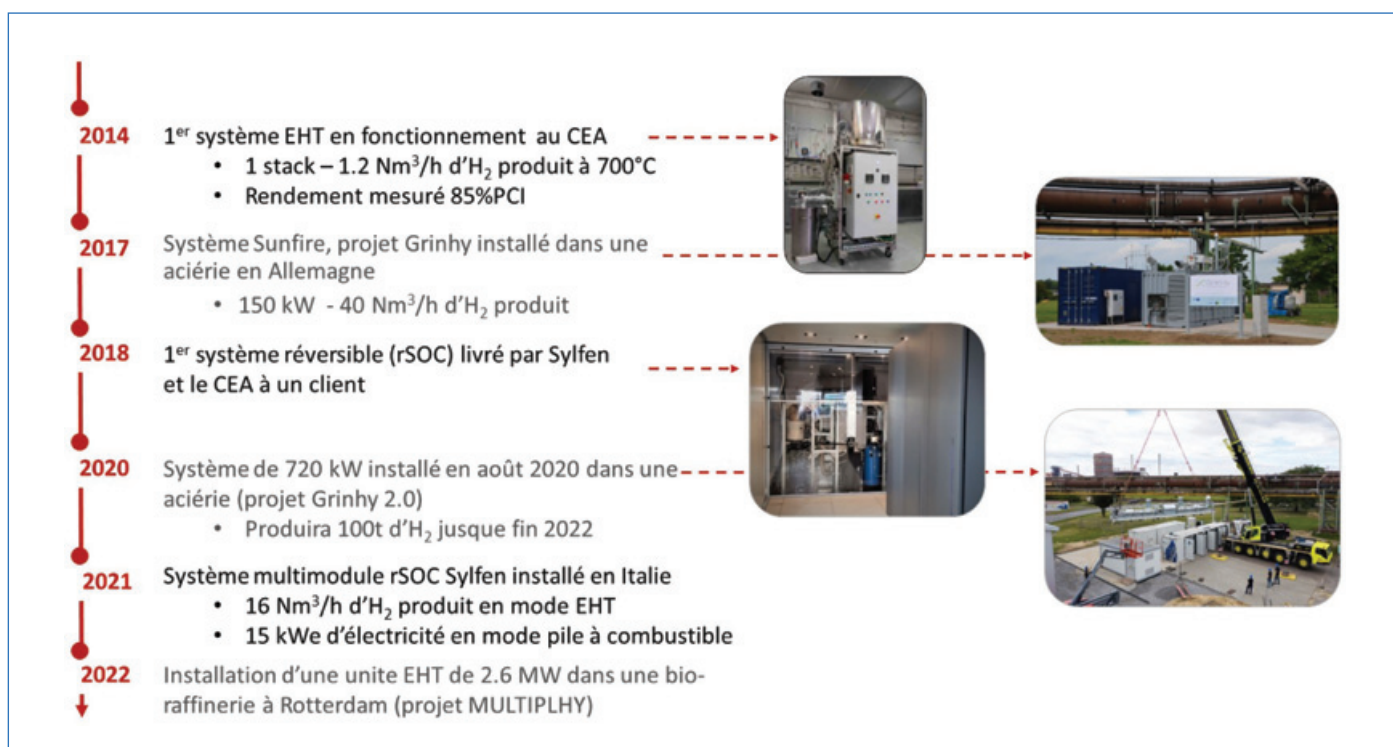


Figure 8 - Frise chronologique présentant les principaux systèmes installés ou prévus d'être installés dans les prochaines années.

(figure 8), menés par différents acteurs industriels, dont la société Genvia, créée en mars 2020, qui se positionne sur le déploiement de la technologie EHT issue du CEA pour le marché de la production massive d'hydrogène (voir encadré 1). Les feuilles de route nationales de déploiement

allemande ou française sont « exponentielles » en termes de puissance installée en fonction du temps et ambitionnent l'installation d'unités de l'ordre de la centaine de MW à l'horizon 2030, de manière cohérente avec la feuille de route européenne et les 2 x 40 GW d'électrolyse visés.

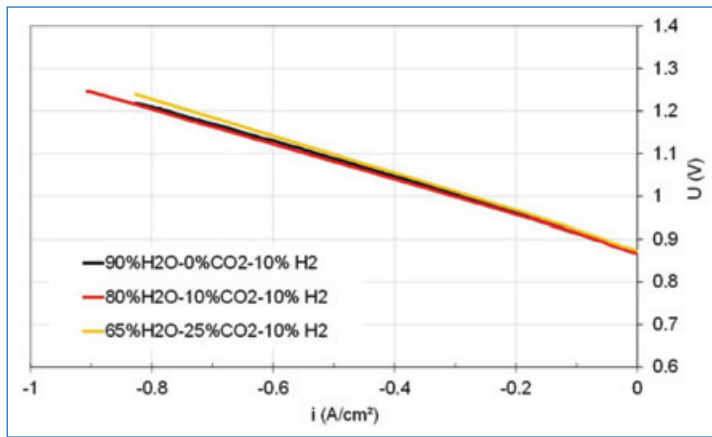


Figure 9 - Courbes i-V (tension moyenne de cellule) d'un stack testé dans un système complet de co-électrolyse, à 750 °C, pour deux compositions H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> : 65 % H<sub>2</sub>O/25 % CO<sub>2</sub>/10 % H<sub>2</sub> et 80 % H<sub>2</sub>O/10 % CO<sub>2</sub>/10 % H<sub>2</sub> (courbes jaune et rouge), et comparaison avec la performance en pure EHT (90 % H<sub>2</sub>O/10 % H<sub>2</sub>), courbe noire ; débit total de 12 Nml/min/cm<sup>2</sup> dans les trois cas.

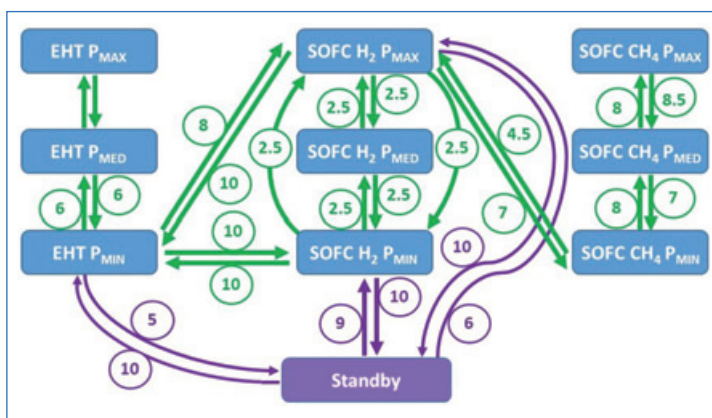


Figure 10 - Représentation schématique des trois modes de fonctionnement (EHT, SOFC-H<sub>2</sub> et SOFC-CH<sub>4</sub>) et des trois points de fonctionnement dans chaque cas (Pmin : puissance minimale ; Pmed : puissance moyenne ; Pmax : puissance maximale), ainsi que le mode standby. Les nombres figurant dans les cercles sont les durées en minutes nécessaires aux transitions entre les différents points de fonctionnement.

### Autres avantages

La technologie EHT présente deux avantages que ne présente pas l'électrolyse alcaline ou PEM. D'une part elle permet d'électrolyser non seulement la vapeur d'eau pour produire de l'hydrogène, mais également le CO<sub>2</sub> pour produire du CO, et donc de co-électrolyser de la vapeur d'eau et du CO<sub>2</sub> pour produire du syngas, un mélange H<sub>2</sub> + CO, pouvant ensuite être transformé par réaction catalytique en différentes molécules de synthèse (CH<sub>4</sub>, méthanol, DME, diesel, etc.) : c'est la base du « power-to-X » [19]. La figure 9 présente des courbes i-V en mode co-électrolyse, pour deux ratios H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub> et les compare à une courbe d'électrolyse pure. Les trois courbes parfaitement superposées valident le fonctionnement en co-électrolyse avec cette technologie. En fonction du ratio H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub> en entrée et de la densité de courant choisie, il est possible d'ajuster le ratio H<sub>2</sub>/CO dans le syngas produit, en fonction de la molécule de synthèse visée en aval [20].

D'autre part, elle permet de fonctionner dans le mode inverse, le mode pile à combustible (SOFC), avec différents types de combustibles (H<sub>2</sub> mais aussi CH<sub>4</sub>, gaz naturel, biogaz, ammoniac et divers reformats de combustibles liquides). Cette flexibilité de fonctionnement autorise la conception de systèmes réversibles (rSOC, « reversible solid oxide cell »),

### Encadré 1

Associant Schlumberger, le CEA, Vicat, Vinci Construction et l'Agence régionale Energie-Climat Occitanie, la co-entreprise Genvia a été officiellement lancée le 1<sup>er</sup> mars dernier avec pour ambition d'industrialiser une nouvelle génération d'électrolyseurs sur son site de Béziers (Hérault).

• [www.genvia.com](http://www.genvia.com)



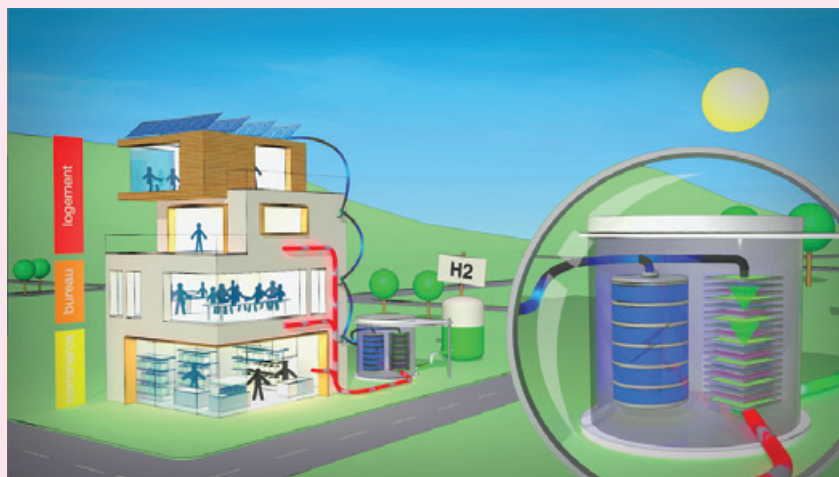
particulièrement adaptés pour le stockage des énergies renouvelables. En effet, en période de surplus d'électricité renouvelable, le système fonctionne en mode électrolyse et l'hydrogène produit est stocké. Inversement, en période où la demande excède la disponibilité d'électricité renouvelable, le système fonctionne alors en mode pile à combustible et produit de l'électricité à partir de l'hydrogène stocké. Par rapport aux technologies hydrogène conventionnelles non réversibles, qui nécessitent l'installation d'un électrolyseur et d'une pile, fonctionnant chacun à temps partiel, dans le cas présent un seul système est nécessaire, qui fonctionne à 100 % du temps, ce qui minimise l'investissement et maximise le retour sur investissement respectivement. En outre, pour un usage dans des bâtiments ou des écoquartiers, la chaleur produite par le système peut être valorisée. Ce type de système rSOC est développé par la société Sylfen (voir encadré 2).

Ce mode réversible a d'abord été testé en laboratoire, avec un système permettant de fonctionner selon trois modes : EHT, pile SOFC alimentée en H<sub>2</sub> et pile SOFC alimentée en CH<sub>4</sub>. Pour chacun des trois modes, trois points de fonctionnement ont été définis, plus un mode standby. Le pilotage de ce système a démontré qu'il était possible de passer d'un point de fonctionnement à l'autre en moins de 10 minutes, témoignant de la flexibilité de cette technologie (figure 10) [21]. Sylfen a installé chez un client un système similaire hybridé avec des batteries et démontré sur site son fonctionnement [22].

### Ce qu'il faut retenir...

La technologie EHT est une technologie à haut rendement. Par des stratégies de pilotage optimisées, elle permet de s'affranchir d'une source de chaleur à haute température, d'être alimentée par des énergies renouvelables intermittentes et de fonctionner en pression (jusqu'à 30 bars). Grâce à ces atouts, les études technico-économiques prévoient qu'un coût de l'hydrogène de l'ordre de 2 €/kg H<sub>2</sub> pourra être atteint pour les unités de très grande taille, faisant de cette technologie un « game changer » pour la génération d'hydrogène. Sa maturité reste actuellement moindre que celle des autres technologies d'électrolyse, mais des démonstrateurs fonctionnent désormais hors des laboratoires, avec des prévisions de puissances installées en croissance « exponentielle » en fonction du temps. Enfin, cette technologie présente des spécificités, telles que la co-électrolyse et le fonctionnement réversible, ouvrant des perspectives additionnelles à la pure production d'hydrogène, telles que la production de produits de synthèse à haute valeur ajoutée et le stockage des énergies renouvelables.

L'auteure remercie Jérôme Aicart, Karine Couturier, Stéphane di Iorio, Jérôme Laurencin, Marie Petitjean et Julien Vulliet, dont les travaux sont particulièrement illustrés dans cet article, ainsi que l'ensemble des collègues du service des Technologies Hydrogène pour leur contribution



© Sylfen.

Startup du CEA créée en 2015, Sylfen développe des solutions intégrées de stockage d'énergie et de production d'énergie par cogénération, à destination des bâtiments et écoquartiers souhaitant couvrir leurs besoins à partir de sources d'énergies locales et renouvelables. Le Smart Energy Hub de Sylfen, basé sur la technologie d'électrolyse de la vapeur d'eau à haute température, hybridée avec des batteries, permet de stocker les énergies renouvelables produites sur un bâtiment et de les réutiliser localement afin de maximiser l'autoconsommation. En outre, il permet de fournir de la chaleur au bâtiment, en cogénération.

• <https://sylfen.com>

au développement global et à l'étude des cellules, stacks et système EHT. Le support de l'Europe via le programme H2020 – FCH-JU et les projets Sophia, Eco, REFLEX, Balance, NewSOC, de l'Agence nationale de la recherche (ANR) via les projets Django et Ecoreve, et enfin de l'Institut Carnot Energies du Futur ont été précieux dans l'atteinte de ces résultats.

(1) Une expression du rendement avec le PCS (pouvoir calorifique supérieur) de l'hydrogène est également possible ; il convient de préciser quelle convention est retenue.

(2) Pour la technologie d'électrolyse, il est préférable d'exprimer le coût par rapport à un débit d'hydrogène produit, d'où l'unité reportée en €/kg/j d'H<sub>2</sub> produit). L'expression en €/kW (kW consommés) est fournie à titre indicatif car souvent usitée, mais n'est pas la plus judicieuse pour la comparaison entre des technologies de rendements différents. En effet, une technologie ayant un moins bon rendement présentera un coût en €/kW plus faible, alors qu'il est au contraire souhaitable, pour produire un même débit d'hydrogène, d'avoir la consommation en kW la plus faible.

(3) La tension de 1,3 V par cellule est souvent considérée, car elle correspond à la tension thermoneutre. La réaction d'électrolyse de l'eau et de la vapeur d'eau est endothermique, mais des pertes ohmiques (effet Joule) existent. À la tension thermoneutre, ces pertes compensent exactement l'endothermicité de la réaction d'électrolyse. Si le point de fonctionnement correspond à une tension supérieure à 1,3 V par cellule, alors le fonctionnement est exothermique, et inversement si la tension est inférieure à 1,3 V par cellule, il est endothermique.

(4) Le normo mètre cube, de symbole Nm<sup>3</sup>, est une unité de mesure de quantité de gaz qui correspond au contenu d'un volume d'un mètre cube, pour un gaz se trouvant dans les conditions normales de température et de pression.

[1] The European Green Deal, European Commission, 11/12/2019.

[2] Green Hydrogen for a European Green Deal: A 2x40 GW Initiative, Hydrogen Europe, 03/2020.

[3] A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe, European Commission, 08/07/2020.

[4] P. Millet, Fundamentals of water electrolysis, in *Hydrogen Production by Electrolysis*, A. Godula-Jopek (ed.), Wiley-VCH, 2015.

[5] P.W. Atkins, *Physical Chemistry*, 5<sup>th</sup> vol., p. 331, Oxford University Press, 2002.

[6] Strategic Research and Innovation Agenda, Hydrogen Europe, Oct. 2020.

[7] C. Graves, S.D. Ebbesen, M. Mogensen, Sustainable hydrocarbon fuels by recycling CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O with renewable or nuclear energy, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2011, 15, p. 1-23.

[8] F. Lefebvre-Joud, J. Mougin, L. Antoni., E. Bouyer, G. Gebel, Matériaux de la filière hydrogène – Partie 1 : Production et conversion, *Techniques de l'Ingénieur*, N 1205, 2010.

[9] J. Mougin, Hydrogen production by high temperature steam electrolysis, Chap. 8 in *Compendium of Hydrogen Energy*, Vol. 1: Hydrogen production and purification,

V. Subramani, A. Basile, T.N. Veziroglu (eds), Woodhead Publishing Series in Energy, Elsevier, 2015.

[10] A. Ploner, J. Mougin *et al.*, Optimization of solid oxide cells and stacks for reversible operation, *ECS Transactions*, 2019, 91, p. 2517-526.

[11] J. Mougin *et al.*, Development of a solid oxide electrolysis stack able to operate at high steam conversion rate and integration into a SOE system, *ECS Transactions*, 2017, 78, p. 3065-075.

[12] J. Schefold *et al.*, 23,000 h steam electrolysis with an electrolyte supported solid oxide cell, *Int. J. Hydrog. Energy*, 2017, 42, p. 13415-426.

[13] L. Bernadet *et al.*, Influence of pressure on solid oxide electrolysis cells investigated by experimental and modeling approach, *Int. J. Hydrog. Energy*, 2015, 40, p. 12918-928.

[14] S.H. Jensen *et al.*, Characterization of a planar solid oxide cell stack operated at elevated pressure, *J. Electrochem. Soc.*, 2016, 163, p. F1596-604.

[15] M. Riedel *et al.*, Analysis of pressurized operation of 10 layer solid oxide electrolysis stacks, *Int. J. Hydrog. Energy*, 2019, 44, p. 4570-581.

[16] J. Mougin *et al.*, High temperature steam electrolysis stack with enhanced performance and durability, *Energy Procedia*, 2012, 29, p. 445-454.

[17] J. Schefold *et al.*, 80,000 current on/off cycles in a one year long steam electrolysis test with a solid oxide cell, *Int. J. Hydrog. Energy*, 2020, 45, p. 5143-154.

[18] A. Chatroux, J. Mougin *et al.*, A packaged and efficient SOEC system demonstrator, *ECS Transactions*, 2015, 68, p. 3519-526.

[19] Y. Zheng *et al.*, A review of high temperature co-electrolysis of H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> to produce sustainable fuels using solid oxide electrolysis cells (SOECs): advanced materials and technology, *Chem. Soc. Rev.*, 2017, 46, p. 1427-463.

[20] M. Reytier, J. Mougin *et al.*, Stack performances in high temperature steam electrolysis and co-electrolysis, *Int. J. Hydrog. Energy*, 2015, 40, p. 11370-377.

[21] J. Aicart, J. Mougin *et al.*, Transition cycles during operation of a reversible solid oxide electrolyzer/fuel cell (rSOC) system, *Fuel Cells*, 2019, 19, p. 381-388.

[22] A. Nechache, S. Hody, Test and evaluation of an hybrid storage solution for buildings, based on a reversible high-temperature electrolyzer, *ECS Transactions*, 2019, 91, p. 2485-494.

**Julie MOUGIN\***,  
Chef du Service des Technologies Hydrogène, CEA/LITEN/DTCH/  
STH2, Grenoble.

\* [Julie.mougin@cea.fr](mailto:Julie.mougin@cea.fr)

### Les systèmes d'électrolyse de l'eau à membrane échangeuse de protons

**Résumé** La production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau via une membrane échangeuse de protons est un procédé de conversion électrochimique de l'eau en oxygène et hydrogène grâce à l'application d'un courant électrique. Contrairement à d'autres procédés électrolytiques de production d'hydrogène, comme en milieu alcalin ou à haute température avec des électrolytes céramiques, la technologie PEM (« proton membrane exchange ») utilise une membrane polymère qui joue à la fois le rôle de séparateur de gaz et d'électrolyte. Dans cet article sont abordés les principes de fonctionnement et l'architecture classique des électrolyseurs PEM, leurs performances actuelles et les travaux de recherche et de développement visant à les améliorer.

**Mots-clés** Hydrogène, électrolyse basse température, électrolyte polymère conducteur protonique.

**Abstract** Water electrolysis system based on proton exchange membrane

Hydrogen production by water electrolysis using proton exchange membrane is an electrochemical process that converts water using electricity. Contrary to others electrochemical processes that involved alkaline media or high temperature and ceramic electrolyte, PEM technology uses a proton exchange membrane that acts as gases separator and electrolyte. In this article, the operating principle, the classical architecture of system and the actual performances and the ongoing research and development of PEM electrolyzers have been reviewed.

**Keywords** Hydrogen, low temperature electrolysis, proton exchange polymer membrane.

Depuis de nombreuses années, l'hydrogène est considéré comme un vecteur énergétique d'avenir, susceptible de pouvoir être utilisé à la fois pour stocker de l'énergie sous forme chimique et en tant que combustible propre. Si son utilisation est déjà une réalité dans bon nombre d'applications industrielles et dans certains marchés de niche, son déploiement massif nécessitera de travailler sur les procédés de production, de stockage et de distribution, et sur les méthodes les plus efficaces de l'utiliser pour remplacer des combustibles fossiles. En particulier, la production de l'hydrogène, efficace et à bas coût, à partir de sources d'énergies électriques renouvelables, constitue un des verrous à l'utilisation de l'hydrogène énergie.

La production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau est un procédé de conversion électrochimique de l'eau en dioxygène ( $O_2$ ) et dihydrogène ( $H_2$ ) grâce à l'application d'un courant électrique. S'il existe plusieurs matériaux pouvant servir à la conception et à la fabrication de ce type de convertisseur, trois principaux types de système, dont les caractéristiques principales sont rassemblées dans le *tableau I*, sont actuellement déployés à une échelle significative et font l'objet d'intenses activités de recherche et de développement.

Les électrolyseurs alcalins, utilisant des électrolytes liquides, sont ainsi les systèmes actuellement les plus déployés. Si ceux-ci utilisent des matériaux peu onéreux et ont donc l'avantage de pouvoir produire de l'hydrogène ultra pur à un coût raisonnable, ils ont comme inconvénients de ne pas pouvoir fonctionner à forte densité de courant, ce qui impacte leurs densités volumiques, et d'avoir des temps de réponse relativement longs. Les électrolyseurs à hautes températures, basés sur des matériaux céramiques sont considérés comme les plus prometteurs mais ont encore un niveau de maturité technologique encore faible et restent limités en termes de temps de réponse du fait d'un fonctionnement à hautes températures (600 ~ 800 °C). Moins matures que les électrolyseurs alcalins mais beaucoup plus compacts, les électrolyseurs

à membranes polymères conductrices protoniques possèdent des temps de réponse très courts, intimement liés au fonctionnement à basses températures et à l'utilisation d'électrolytes solides. Cette caractéristique en fait la technologie la plus à même d'être couplée simplement avec des sources d'énergie électrique intermittentes telles que les centrales éoliennes et solaires.

Nous nous focaliserons ici sur les procédés d'électrolyse utilisant des membranes polymères conductrices protoniques. Après un rapide rappel des principes de fonctionnement des électrolyseurs, l'architecture classique des électrolyseurs PEM sera décrite. Leurs performances obtenues actuellement seront discutées ainsi que les principaux axes d'amélioration étudiés à travers le monde afin de réduire les coûts de production de l'hydrogène (diminution du coût du système et de la consommation électrique) et d'augmenter la durée de vie des systèmes d'électrolyse.

#### L'électrolyseur PEM : principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un électrolyseur à membrane est identique à celui de tous les systèmes électrolytiques. Il est basé sur l'utilisation du courant électrique afin de décomposer une espèce chimique. Dans le cas de l'électrolyse de l'eau, les gaz obtenus sous l'action de l'énergie électrique sont le dioxygène à l'anode et le dihydrogène à la cathode. Les performances d'une cellule d'électrolyse vont dépendre à la fois des équilibres thermodynamiques des réactions mises en jeu et de la vitesse à laquelle ces deux réactions vont avoir lieu. Ces performances sont classiquement reliées à la tension de fonctionnement du convertisseur et à la densité de courant traversant celui-ci, et il est possible de relier ces paramètres au rendement de conversion et donc à la consommation électrique de la cellule d'électrolyse lors de la production d'hydrogène [2-3]. Dans le document rédigé par le JRC<sup>(1)</sup>, avec le soutien de plusieurs centres de recherche et d'industriels

	Cibles pour la technologie PEM		Comparaison des technologies électrolytiques de production de H <sub>2</sub>		
	État de l'art en 2017	Cibles pour 2023	Technologie PEM	Technologie alcaline	Technologie haute température à membrane céramique
<b>Indicateur-1</b> Consommation électrique (kWh/Nm <sup>3</sup> )	5,1 - 5,4	4,5	4,4-5	4,2-5	3
<b>Indicateur-2</b> Coût d'investissement (CAPEX) + les auxiliaires (€/kW <sub>el</sub> )	3 400	700	1 400 -2 100	800 - 1 500	< 2 000
<b>Indicateur-3</b> Dégradation (μv/h) (%/an)	5,4 - 10,7 2 - 4	< 2,3 < 1	0,5 - 2,5	0,25 - 1,5	3 - 50
<b>Indicateur-4</b> Flexibilité d'opération Plage d'utilisation en pourcentage par rapport à la puissance nominale	5 - 100 %	0 - 300 %	0 - 100 %	20 - 100 %	- 100 % ou + 100 %
<b>Indicateur-5</b> Réactivité Départ à chaud : durée pour atteindre la puissance max Départ à froid : durée pour atteindre la puissance max	1 min 5 min	< 1 s 10 s	< 10 s 5 - 10 min	1 - 5 min 1 - 2 h	15 min plusieurs heures

Tableau I - Comparaison des principales caractéristiques des technologies d'électrolyse de l'eau [1].

travaillant dans le domaine, sont indiquées les différentes approches pour calculer les performances et le rendement d'un électrolyseur [4].

## L'architecture d'un système d'électrolyse PEM

### La cellule élémentaire

Comme tout système de conversion électrochimique, une cellule d'électrolyse PEM est constituée de deux électrodes, sièges des réactions électrochimiques, et d'un électrolyte, qui va séparer les deux électrodes, tout en assurant le passage d'un courant ionique et en évitant le passage d'un courant électronique. Un exemple de cellule élémentaire d'électrolyseur PEM est représenté sur la figure 1. Cet assemblage constitue le cœur de la cellule et se nomme « assemblage membrane électrodes » (AME).

### La membrane

Les membranes utilisées dans la réalisation de cellules d'électrolyse sont presque exclusivement des membranes perfluoro-sulfonées acides (PFSA), dont la plus connue est le Nafion® de la société Dupont de Nemours. Ces matériaux sont très résistants à la fois mécaniquement, thermiquement et chimiquement, et possèdent des conductivités protoniques très importantes de l'ordre de 0,1 S/cm [5]. Afin de limiter la chute ohmique et l'encombrement du système, la membrane PFSA doit être aussi fine que possible. Toutefois, cette membrane n'est pas parfaitement imperméable aux gaz et une partie des gaz produits peut donc la traverser. Ce phénomène de perméation de la membrane aux gaz peut s'avérer problématique. En effet, au-delà de 4 vol. % de dihydrogène dans le dioxygène, le mélange devient explosif [6]. Il est donc nécessaire d'avoir une épaisseur de membrane

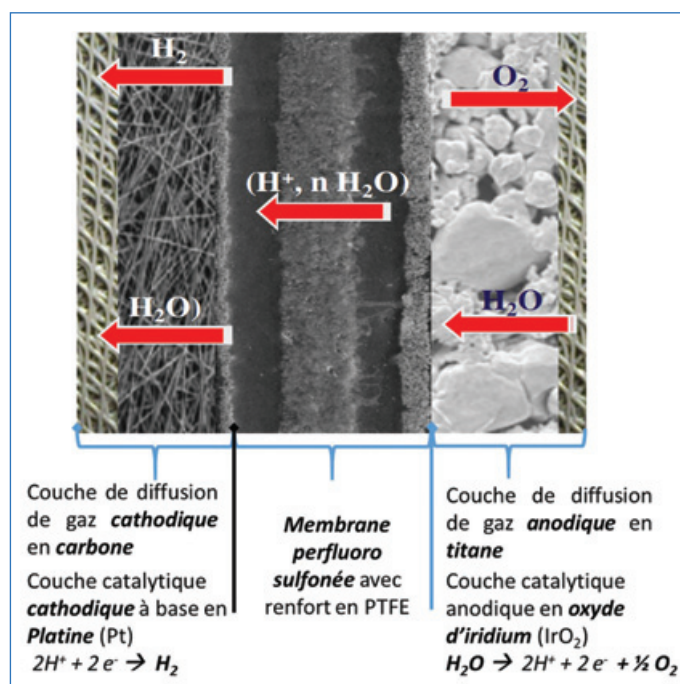


Figure 1 - Schéma d'une cellule d'électrolyse de l'eau à membrane échangeuse de protons (PEM).

suffisamment importante pour limiter ce phénomène de diffusion, en particulier quand les pressions de fonctionnement sont très supérieures à la pression atmosphérique. Dans la pratique, les membranes des systèmes d'électrolyse PEM ont des épaisseurs entre 90 et 200 μm, soit une épaisseur dix fois plus importante que celle utilisée pour la réalisation de piles à combustible. Dans tous les cas, pour prévenir des accidents, la teneur de H<sub>2</sub> dans O<sub>2</sub> en sortie anodique est

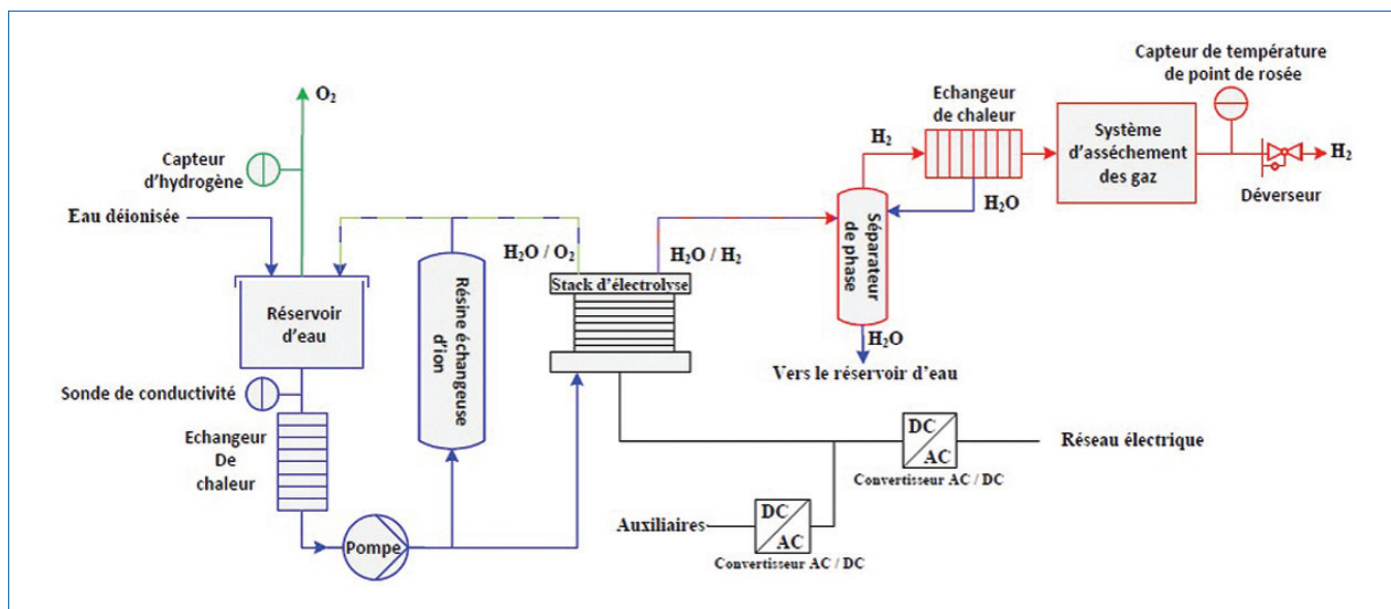


Figure 2 - Schéma simplifié d'un électrolyseur à membrane échangeuse de protons (PEM).

toujours mesurée et revêt une grande importance en termes de sécurité.

### Les électrodes

Les électrodes d'un réacteur électrochimique sont les sièges des réactions d'oxydo-réduction. Elles sont réalisées de manière à optimiser la surface utile de la cellule. Pour ce faire, le catalyseur est dispersé à la surface de la membrane et une couche supplémentaire appelée couche de diffusion est ajoutée à l'assemblage afin de pouvoir distribuer les réactifs sur l'ensemble de la surface, d'évacuer les produits de réaction, et de collecter ou distribuer les électrons de l'extérieur de la cellule électrochimique vers le siège des réactions d'oxydo-réduction.

Dans des conditions de forte acidité et de potentiel élevé, les matériaux utilisables pour les électrodes et les couches de diffusion de gaz sont très limités. Pour la réaction de réduction du proton, le platine est le catalyseur le plus utilisé et les chargements actuels, c'est-à-dire la quantité de métal noble utilisée pour la fabrication des électrodes, souvent exprimée en masse de métal par unité de surface, est comprise entre 0,5 et 1 mg/cm<sup>2</sup> [7]. Pour la réaction anodique d'oxydation de l'eau, la réaction est bien plus difficile et le platine ne peut pas être utilisé en tant que catalyseur. Le meilleur catalyseur est dans ces conditions de fort potentiel le ruthénium, mais sa stabilité n'est pas suffisante pour une utilisation en système d'électrolyse PEM. C'est donc l'oxyde d'iridium qui sert classiquement de catalyseur et les chargements sont bien plus élevés à l'anode avec environ 2 mg/cm<sup>2</sup>. Les distributeurs fluidiques ou couches de diffusion nécessaires au fonctionnement de l'électrolyseur peuvent être de natures différentes selon leur positionnement dans la cellule. À l'anode, ces couches doivent résister à un milieu oxydant et des poreux en titane sont souvent utilisés. À la cathode en revanche, des matériaux moins résistants peuvent être envisagés tels que des tissus ou des papiers réalisés en fibre de carbone.

### Le stack

Afin de produire une grande quantité d'hydrogène, la surface active disponible d'un électrolyseur doit être importante. Pour réaliser des électrolyseurs de puissance, il faut donc non

seulement travailler avec des cellules de grandes surfaces mais aussi utiliser plusieurs cellules simultanément. Parmi les architectures de réalisation d'électrolyseurs à membrane, celle du filtre presse, qui consiste à empiler en série plusieurs cellules (AME) dans un même objet, est de loin la plus répandue car elle permet d'obtenir des empilements de très forte compacité. Pour réaliser cet empilement ou « stack », il est nécessaire de disposer de plaques bipolaires qui vont séparer fluidiquement chaque AME tout en les connectant en série électriquement. Du fait des conditions de fonctionnement des électrolyseurs, le choix des matériaux est encore fortement restreint et c'est le titane qui est considéré comme le matériau de référence pour ces plaques. Néanmoins, un certain nombre d'autres matériaux tels que l'acier inoxydable protégé par une couche de passivation sont étudiés comme matériaux de plaques bipolaires [8].

### Le système

Le stack nécessitant un apport continu de réactifs (eau et énergie électrique) et une évacuation des produits (H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>) et de la chaleur de réaction, il doit être intégré au sein d'un système pour fonctionner. Le schéma d'un système d'électrolyse assez classique est représenté sur la figure 2. D'une manière générale, l'apport de réactifs et l'évacuation de la chaleur sont assurés par une pompe, qui va distribuer l'eau dans le compartiment anodique, et par un échangeur thermique permettant le refroidissement du convertisseur électrochimique. Les gaz produits à la fois du côté anodique et cathodique sortent du stack à des températures proches de la température de fonctionnement (environ 70-80 °C) et sont saturés en eau. Afin de pouvoir les utiliser, il convient de les sécher, ce qui en fonction de la teneur acceptable en eau dans l'application finale peut se faire en plusieurs étapes. Dans un premier temps, un échangeur de chaleur permet d'abaisser la température des gaz en sortie de stack et de condenser l'eau contenue dans l'hydrogène et l'oxygène. Afin d'obtenir de l'hydrogène parfaitement sec, une seconde étape est souvent nécessaire, qui est souvent réalisée à l'aide d'un système d'absorption PSA (« pression swing adsorption ») ou TSA (« thermal swing adsorption »). Ces procédés permettent d'adsorber l'eau sur des zéolithes qui doivent être régénérées



soit par de l'hydrogène sec et pressurisé (PSA), soit par chauffage (TSA). Cette régénération se fait en consommant une partie de l'hydrogène produit et a un impact sur le rendement global du système. Pour alimenter le stack et les auxiliaires en énergie électrique, il est nécessaire de disposer d'une source électrique. En fonction de la nature de celle-ci (alternative, continue), un ou plusieurs convertisseurs de puissance sont nécessaires au bon fonctionnement du système. Si ces technologies de conversion sont bien maîtrisées, elles peuvent être la source d'une déperdition énergétique pouvant atteindre 10 %, ce qui diminue le rendement global de l'électrolyseur.

### Performances actuelles et exemples d'utilisation

Du fait du nombre important d'applications visées, les caractéristiques réelles des systèmes d'électrolyse sont relativement disparates, mais on peut considérer qu'un électrolyseur PEM à l'échelle système consomme entre 5 et 6,5 kWh pour produire un Nm<sup>3</sup> d'hydrogène, et qu'un stack consomme entre 4 et 5 kWh environ pour le même volume d'hydrogène [1]. La consommation du système est donc liée à la performance des stacks (donc au choix de son point de fonctionnement), à la consommation des auxiliaires nécessaires, à l'évacuation de la chaleur, et à la purification des produits et des réactifs. Sur la figure 3 sont rassemblées quelques courbes de polarisation d'électrolyseurs obtenues sur des stacks intégrés dans des produits commerciaux (ITM Power, Siemens, CETH2) ou sur des cellules en cours de développement susceptibles

d'équiper les nouvelles générations d'électrolyseurs (Proton Advanced, Lewinski, Suermann). Ces courbes traduisent la performance d'un système électrochimique, la tension de fonctionnement devant être la plus faible possible tout en permettant le passage d'une densité de courant la plus forte possible. Les courbes représentées sur cette figure, obtenues sur des assemblages avancés, sont représentatives des progrès très importants réalisés aux cours de ces dernières années. Cela permet d'envisager des systèmes fonctionnant à 4 A/cm<sup>2</sup> à 1,7 V, là où les systèmes commerciaux fonctionnent actuellement aux alentours de 2 A/cm<sup>2</sup> pour des tensions comprises entre 1,9 et 2,1 V.

Un grand nombre de systèmes d'électrolyse à membrane échangeuse de protons sont maintenant commercialement disponibles et sont déployés dans de nombreux sites et pour une gamme de production variée. Dans le tableau II sont regroupés, pour quelques applications, les débits d'hydrogène produits et la puissance requise des électrolyseurs.

Historiquement, les électrolyseurs à membrane acide ont été développés pour obtenir de l'hydrogène ou de l'oxygène de grande pureté, tout en limitant les problèmes d'encombrement et de corrosion inhérents à l'utilisation d'électrolyseurs alcalins. Leurs premiers déploiements ont eu lieu dans des applications de niche de types sous-marin, avion ou spatial. Avec la montée en maturité de la technologie et la baisse des coûts, les applications se sont diversifiées et la puissance des électrolyseurs installés a progressivement augmenté. Ainsi, Hydrogenics, en relation avec Air liquide, est en train de déployer à Bécancour dans la province de Québec au Canada, 20 MW d'électrolyseurs PEM permettant à terme de délivrer 3 000 tonnes d'hydrogène par an pour applications industrielles et de mobilité.

Du fait de la problématique du réchauffement climatique dû aux émissions de gaz à effet de serre en général et du CO<sub>2</sub> en particulier, l'intérêt pour la production de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique s'est fortement renforcé ces dernières années, et un effort très important a été porté sur le déploiement d'électrolyseurs PEM dans ce contexte. En effet, avec des temps de réponse de l'ordre de la dizaine de ms, l'électrolyse PEM est une technologie très réactive et particulièrement adaptée pour être couplée aux sources d'énergies intermittentes. À titre d'exemple, on peut voir sur la figure 4 la réponse en tension et en densité de courant d'une cellule d'électrolyse lors d'une sollicitation caractéristique de la production d'énergie électrique par panneaux photovoltaïques. Les variations d'ensoleillement au cours d'une journée ont été simulées sur 12 h. L'augmentation de la

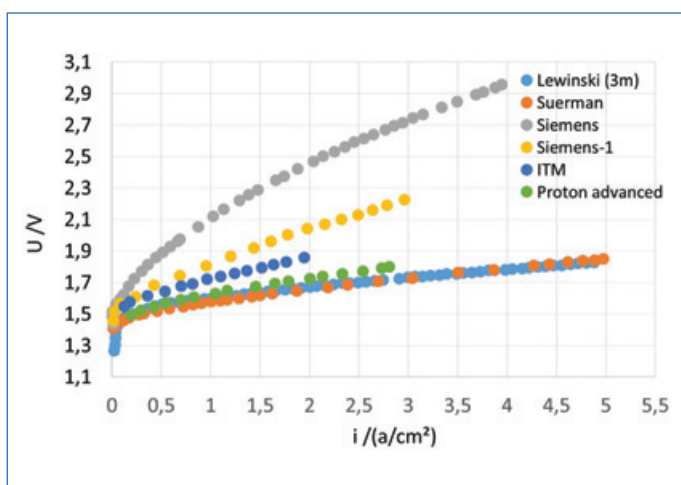


Figure 3 - Courbes de polarisation obtenues sur des cellules d'électrolyse à membrane échangeuse de protons [1].

	Taille Nm <sup>3</sup> /h	Puissance de l'électrolyseur kW
Générateur d'hydrogène pour bijouterie, laboratoire médical	0,005 - 0,5	0,125 - 12,5
Turbine de refroidissement dans les grands alternateurs	5 - 10	25 - 50
Station à hydrogène	5 - 60	25 - 300
Fabrication de pastilles de UO <sub>2</sub> à partir de UF <sub>6</sub>	50	250
Industrie électronique (H <sub>2</sub> comme gaz vecteur de gaz réactif)	100- 400	500 - 2 000
Métallurgie (frittage en atmosphère réductrice)	200 - 750	1 000 - 3 750
<b>Hypothèse, consommation électrique d'un électrolyseur MEP à 5 kWh/Nm</b>		

Tableau II - Les applications actuelles des électrolyseurs PEM.

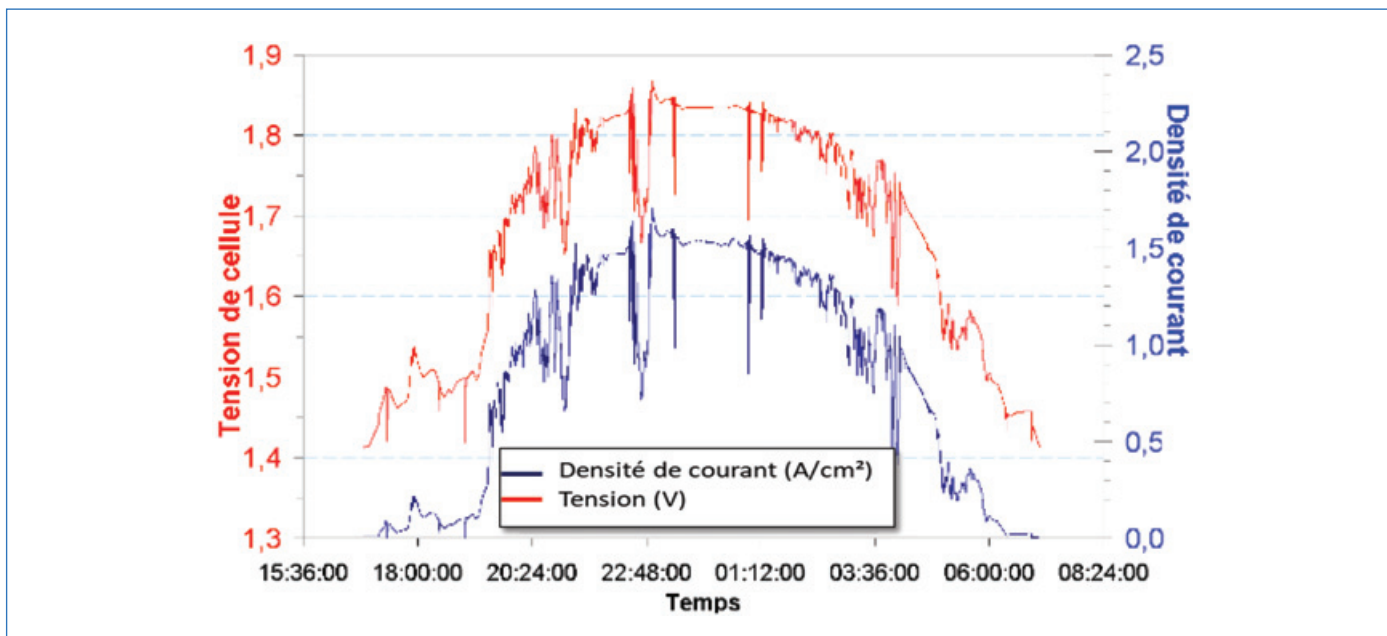


Figure 4 - Réponse en tension d'une cellule d'électrolyse à des sollicitations en courant simulant une cycle de production de panneau photovoltaïque.

tension de cellule correspond à un ensoleillement important (tension de cellule supérieur à 1,7 V), ce qui se traduit par une densité de courant plus importante (plus grande production d'hydrogène), alors que les périodes de début et de fin de la courbe simulent le début de matinée et début de soirée et donc des tensions plus faibles (inférieures à 1,6 V). On peut également voir des pics de tension correspondant à des passages sporadiques de nuages provoquant des chutes brutales de tension.

Ce couplage entre énergie renouvelable et électrolyseur permet d'obtenir un hydrogène bas carbone susceptible d'être utilisé dans un certain nombre d'applications, en particulier dans le domaine de l'énergie. Une des applications qui suscitent le plus d'intérêt est celle des stations-service de recharge pour les véhicules à hydrogène (HRS, « hydrogen refuelling station »). Ces installations sont capables de fournir de l'hydrogène jusqu'à 600 kg/jour en couplant un électrolyseur avec un système de stockage et de compression. L'hydrogène est délivré à 900 bars de façon à réduire le temps de recharge des véhicules à environ 3 min. Une carte interactive des stations hydrogène en Europe est disponible [9] ; on y recense 144 stations en Europe, mais le nombre de stations en France n'y est pas mis à jour puisqu'on y compte que trois stations alors qu'il en existe plus d'une dizaine [10] (figure 5).

Une autre utilisation émergente des générateurs d'hydrogène porte sur l'utilisation de l'hydrogène bas carbone comme réactif pour la fabrication du méthane ( $\text{CH}_4$ ). Dans ce cas, le générateur d'hydrogène est une composante d'une installation plus vaste intégrant la récupération du  $\text{CO}_2$  et un bloc de méthanation. Le méthane ainsi formé est injecté dans le réseau de gaz naturel, comme le montre le schéma de la figure 6 issu du projet Biocat [11].

Une autre application des électrolyseurs PEM est le stockage de l'énergie électrique provenant de sources intermittentes de types solaires ou éoliennes sous forme d'énergie chimique. Si un certain nombre de démonstrateurs existent à l'échelle mondiale pour l'alimentation de site isolé comme la plateforme MYRTE en Corse, des applications plus récentes comme les démonstrateurs Race for Water [12] et Energy Observer [13]



Figure 5 - Station de ravitaillement située à Nantes. Cette station est ouverte aux particuliers utilisant des voitures à hydrogène mais également aux utilitaires et aux bus. L'avantage de l'hydrogène par rapport aux véhicules électriques à batterie réside d'une part dans l'augmentation drastique de l'autonomie – un véhicule familial peut parcourir environ 100 km avec 1 seul kg d'hydrogène – et d'autre part dans la réduction tout aussi importante des temps de recharge puisqu'il est possible de faire le plein en quelques minutes seulement. © Jean-Claude MOSCHETTI/IMN/CNRS Photothèque.

ont servi de vitrine pour les systèmes de stockage énergétique basés sur l'hydrogène. Dans le cas d'Energy Observer par exemple, la chaîne hydrogène est composée d'un électrolyseur PEM de  $4 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , alimenté par de l'eau de mer purifiée, et d'un système de stockage à 350 bars permettant d'alimenter un système pile à combustible de 115 kW (figure 7).

### Vers des électrolyseurs toujours plus performants et compétitifs

Le déploiement de systèmes d'électrolyse PEM est encore à l'heure actuelle freiné par deux verrous. D'une part leurs coûts de fabrication restent relativement importants, et d'autre part leurs durées de vie sont faibles comparées à celles des électrolyseurs alcalins. Ainsi, le coût annoncé d'un électrolyseur PEM est encore actuellement compris entre 900 et 1 200 €/kW et sa durée de vie est de l'ordre de 40 000 à 50 000 heures,

## Power-to-Gas via Biological Catalysis (P2G-BioCat)

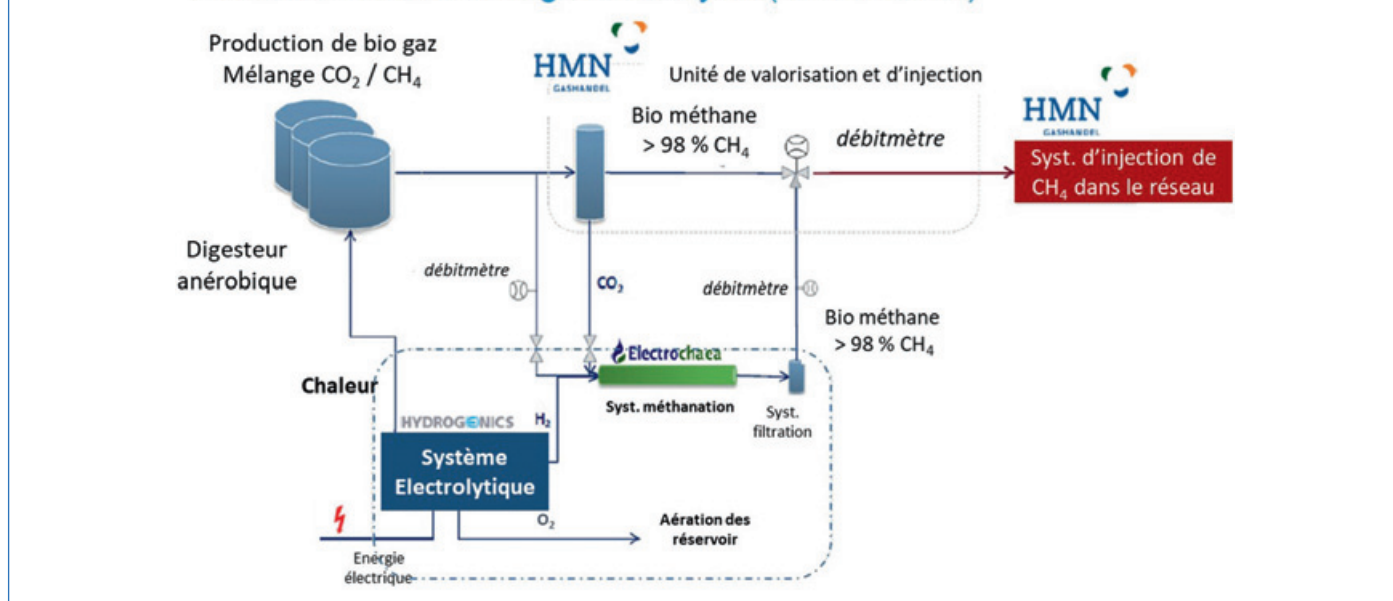


Figure 6 - Installation « power to gaz » du projet BioCat [11].



Figure 7 - « Bateau laboratoire », Energy Observer allie trois sources d'énergies renouvelables (solaire, éolien et hydrolien) et deux formes de stockage (batteries pour le court-terme et hydrogène pour le long terme). L'hydrogène est produit à bord grâce à une chaîne de production installée dans les flotteurs du navire, qui permet de désaliniser, purifier, électrolyser, comprimer et enfin stocker l'hydrogène dans huit réservoirs (www.energy-observer.org/fr). Crédits photos : bateau : © Energy Observer/David Champion ; réservoir : © Energy Observer/Jérémy Bidon.

là où les systèmes alcalins coûtent entre 450 et 800 €/kW et ont des durées de vie deux fois plus importantes.

Ces deux verrous impactent nécessairement le coût de production de l'hydrogène et diminuent la compétitivité des systèmes d'électrolyse PEM vis-à-vis de technologies plus matures. Si ces verrous sont en partie compensés par la très grande compacité, la grande pureté des gaz produits et la capacité de fonctionner sous pression, il est néanmoins nécessaire de poursuivre les développements afin d'atteindre une rentabilité économique, en particulier lorsqu'on envisage l'hydrogène en tant que vecteur énergétique.

Étant donné le coût des catalyseurs utilisés dans les stacks d'électrolyse PEM, un grand nombre de travaux se sont focalisés sur le remplacement du platine et de l'iridium par des matériaux moins onéreux ou plus performants. Dans un électrolyseur PEM, la réaction anodique d'oxydation de l'eau est la plus difficile (environ 100 millions de fois plus lente que la réduction des protons) et limite donc les performances

du stack. Des nanoparticules à base d'alliages de ruthénium et d'iridium ont montré des performances de cellules très intéressantes ( $E < 1,7 \text{ V}$  à  $1 \text{ A/cm}^2$ ) avec un chargement anodique à  $0,34 \text{ mg/cm}^2$  [14]. Néanmoins, même si ces stratégies ont montré leur robustesse sur des durées de vie relativement courtes ( $< 2 \text{ 000 h}$ ), il reste à évaluer quelles seraient les performances de ces nouvelles électrodes dans un test de vieillissement de plus longue durée ( $> 10 \text{ 000 h}$ ). D'autres matériaux à base de tantale ( $\text{TaO}_2$  ou  $\text{TaC}$ ), de titane ( $\text{TiO}_2$ ), d'étain ou d'antimoine, avec ou sans ajout de platinoïdes ont aussi été évalués [15]. Du côté cathodique, bien que la réaction soit plus rapide que la réaction à l'anode, de nombreuses recherches se sont portées sur des alternatives au platine. Même si des matériaux ont été évalués, comme les alliages de nickel [16], des alliages  $\text{Cu/Pt}$ ,  $\text{Pt/Co/Mn}$  ou  $\text{Pt/Ir/Ru}$ , des oxydes de molybdène [17], il apparaît cependant que l'écart entre les performances du platine et celles des catalyseurs non nobles reste important (près de 300 mV d'écart

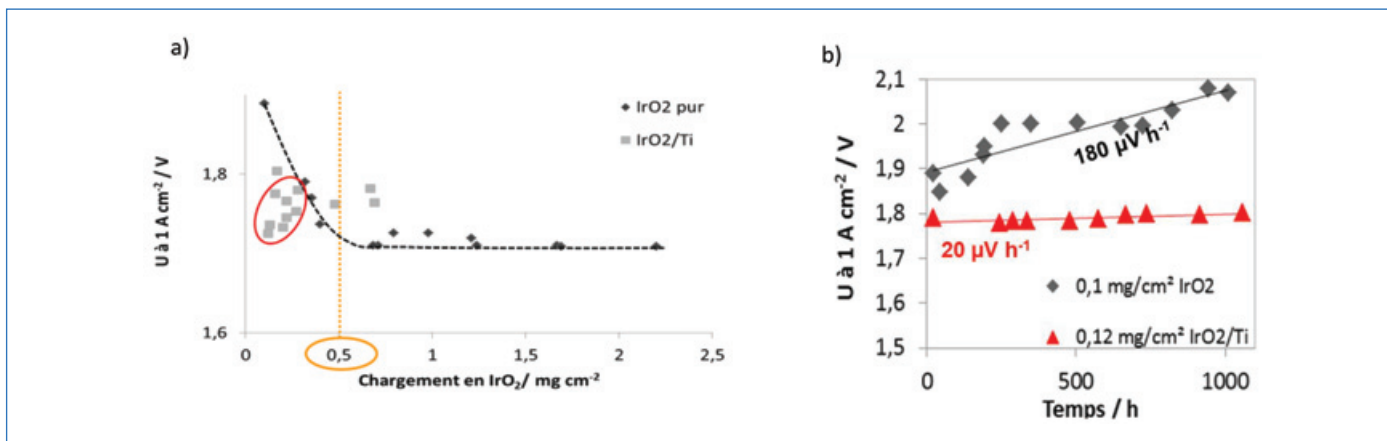


Figure 8 - Stratégie de réduction du chargement en catalyseur anodique : a) évolution de la performance à  $1 \text{ A/cm}^2$  en fonction de la charge catalytique ; b) évaluation sur 1000 h à  $1 \text{ A/cm}^2$  de la stratégie du mélange  $\text{IrO}_2/\text{titane}$ .

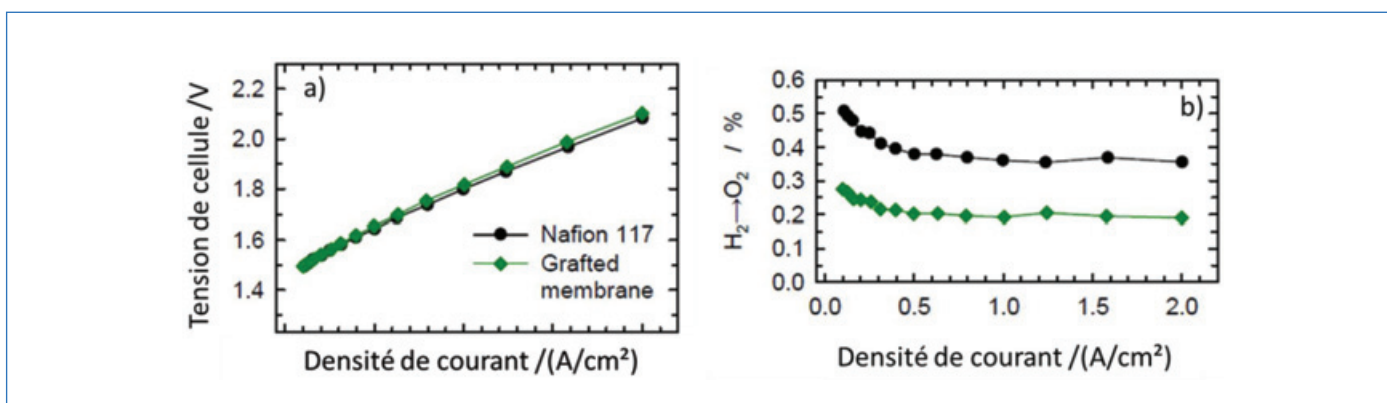


Figure 9 - Performances des membranes hydrocarbonées greffées [18] : a) comparaison des courbes de polarisation obtenues avec des membranes PFSA (Nafion™ 117) et avec des membranes ETFE greffées ; b) évolution du taux d'hydrogène dans l'oxygène le long des courbes de polarisation pour les deux types de membranes.

à  $0,6 \text{ A/cm}^2$  lors de l'utilisation de cobalt clathrochélate) [18]. Une autre approche consiste à garder les catalyseurs classiques, mais à travailler la structure de l'électrode afin d'optimiser l'utilisation du catalyseur. Dans les travaux présentés en *figure 8*, Rozain *et coll.* ont par exemple réduit la teneur des électrodes en  $\text{IrO}_2$  tout en assurant la percolation électronique par l'ajout de microparticules de titane [19]. Cette approche a permis de passer le chargement en  $\text{IrO}_2$  de  $1 \text{ mg/cm}^2$  à moins de  $0,2 \text{ mg/cm}^2$  sans augmenter la tension de cellule à  $1 \text{ A/cm}^2$ .

Un autre axe de baisse des coûts consiste à travailler sur des membranes polymères alternatives aux membranes PFSA. En effet, leurs coûts de l'ordre de  $500$  à  $800 \text{ €/m}^2$  limite la compétitivité des électrolyseurs membranaires. Beaucoup d'études ont donc cherché à remplacer ces membranes par des alternatives moins onéreuses, plus résistantes ou moins perméables à l'hydrogène. Des essais avec des membranes polymères à base de PBI (polybenzimidazole), de PEEK (polyétheréthercéto) sulfonées, de PES (polyéthersulfone) ont ainsi été réalisés [15]. À titre d'exemple, les performances obtenues par les équipes de L. Gubler sur des membranes ETFE (éthylène tétrafluoroéthylène) modifiée par des groupes styrènes et sulfonées sont représentées sur la *figure 9*. Ces membranes hydrocarbonées préparées par irradiation et greffage ont à la fois des bonnes propriétés de conductivité protonique et de faibles taux de perméation de gaz [20].

Un des derniers axes d'amélioration qui suscitent une forte activité de recherche à l'échelle des laboratoires de recherche

et des industriels porte sur l'optimisation de la distribution des réactifs et l'évacuation des gaz à l'intérieur même de la cellule d'électrolyse. En effet la présence de bulles de gaz à la surface des électrodes induit une perte d'accessibilité de l'eau et entraîne une perte de performances importante, en particulier à forte densité de courant. Grigoriev *et coll.* ont ainsi montré qu'un mauvais dimensionnement de la microstructure des poreux de diffusion pouvait mener à une augmentation du potentiel d'électrolyse de  $100 \text{ mV}$  – ce qui équivaut à une augmentation de la consommation électrique de  $0,25 \text{ kWh/Nm}^3$  – à un point de fonctionnement de  $2 \text{ A/cm}^2$  [21]. Bien que des travaux de compréhension des écoulements diphasiques soient menés, grâce notamment à des simulations numériques [22] et à des observations neutroniques ou de radiographie X [23], il reste encore beaucoup de points à éclaircir afin d'éviter les phénomènes d'engorgement qui se produisent à forte densité de courant ( $> 3 \text{ A/cm}^2$ ). Néanmoins, certains travaux ont contribué à des avancées notables de la technologie. On peut citer par exemple les travaux de Lettenmeir *et coll.* [24] qui ont montré l'intérêt de l'insertion d'une couche macroporeuse entre la couche catalytique de l'AME et le poreux de titane. Ils ont observé un gain de  $400 \text{ mV}$  à  $5 \text{ A/cm}^2$  qu'ils ont attribué à une diminution des résistances de contact et une meilleure gestion entre des flux de gaz et d'eau à l'anode. Un autre exemple porte sur la fabrication et l'utilisation de membrane polymère perfluorosulfonée, mais ayant une masse équivalente plus faible que les membranes de références. Siracusano *et coll.*, en utilisant une

membrane polymère de ce type, ont atteint 1,8 V à 3,2 A/cm<sup>2</sup> et 90 °C quand la performance de référence dans les mêmes conditions est de 2,5 V à 3 A/cm<sup>2</sup> [25].

## L'électrolyse PEM : une technologie d'avenir

L'électrolyse à membrane échangeuse de protons est une technologie d'électrolyse qui possède l'avantage de pouvoir produire de l'hydrogène de grande pureté directement sous pression, et avec des systèmes compacts nécessitant un faible entretien. Malgré des coûts de production encore relativement élevés, du fait des prix des matériaux constituant le stack d'électrolyse et des rendements encore insuffisants, ces systèmes sont de plus en plus utilisés aussi bien pour remplacer l'hydrogène dans des applications industrielles, que pour démontrer la pertinence de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique. Dans les prochaines années, des progrès importants, soutenus par des travaux de recherche et de développement académiques et industriels, devraient permettre à la fois de baisser les coûts des matériaux mis en jeu dans ces systèmes d'électrolyse, et d'augmenter de manière importante les rendements de conversion par l'optimisation de chaque composant mis en jeu dans la production et le conditionnement de l'hydrogène. Ces progrès devraient permettre aux électrolyseurs PEM de réduire le coût de production de l'hydrogène de 10 €/kg à moins de 5 €/kg [26], ce qui constitue la cible ultime pour que l'hydrogène devienne compétitif avec le diesel et l'essence pour les applications liées à la mobilité.

(1) JRC : Joint Research Centre, centre commun de recherche scientifique de l'Union européen basé à Bruxelles.

[1] A. Buttler, H. Spliethoff, Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **2018**, 82, p. 2440-454.

[2] P. Millet, Électrolyseurs de l'eau à membrane acide, *Tech. Ing.*, **2007**, 20.

[3] A. Grimaud, L'électrolyse de l'eau en quête de performance... et donc d'électrocatalyseurs, *L'Act. Chim.*, **2019**, 438-439, p. 23-28.

[4] A. Pilega, G. Tzotridis, European Commission, Joint Research Centre, *EU harmonised terminology for low temperature water electrolysis for energy storage applications*, [http://publications.europa.eu/publication/manifestation\\_identifiant/PUB\\_KJNA29300ENN](http://publications.europa.eu/publication/manifestation_identifiant/PUB_KJNA29300ENN)

[5] H. Ito, T. Maeda, A. Nakano, H. Takenaka, Properties of Nafion membranes under PEM water electrolysis conditions, Int. Conf. Hydrog. Prod. ICH2P-2010, *Int. J. Hydrog. Energy*, **2011**, 36, p. 10527-540.

[6] P. Millet, R. Ngameni, S.A. Grigoriev, V.N. Fateev, Scientific and engineering issues related to PEM technology: water electrolyzers, fuel cells and unitized regenerative systems, *Int. J. Hydrog. Energy*, **2011**, 36, p. 4156-163.

[7] M. Carmo, D.L. Fritz, J. Mergel, D. Stolten, A comprehensive review on PEM water electrolysis, *Int. J. Hydrog. Energy*, **2013**, 38, p. 4901-934.

[8] S.A. Grigoriev, V.N. Fateev, D.G. Bessarabov, P. Millet, Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology, *Int. J. Hydrog. Energy*, **2020**, 45, p. 26036-6058.

[9] <https://h2-map.eu>

[10] [www.h2-mobile.fr/stations-hydrogene](http://www.h2-mobile.fr/stations-hydrogene)

[11] P2G-BioCat, <http://biocat-project.com>

[12] Race for Water, Une fondation pour préserver l'eau, [www.raceforwater.org/fr](http://www.raceforwater.org/fr)

[13] Cap sur l'énergie du futur, [www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/les-defis-du-cea/les-defis-du-CEA-219.pdf](http://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/les-defis-du-cea/les-defis-du-CEA-219.pdf)

[14] S. Siracusano, N. Hodnik, P. Jovanovic, F. Ruiz-Zepeda, M. Šala, V. Baglio, A.S. Arico, New insights into the stability of a high performance nanostructured catalyst for sustainable water electrolysis, *Nano Energy*, **2017**, 40, p. 618-632.

[15] M. Rashid, M.K.A. Mesfer, H. Naseem, M. Danish, Hydrogen production by water electrolysis: a review of alkaline water electrolysis, PEM water electrolysis and high temperature water electrolysis, *Int. J. Eng. Adv. Technol.*, **2015**, 4, p. 80-93.

[16] C.C.L. McCrory, S. Jung, I.M. Ferrer, S.M. Chatman, J.C. Peters, T.F. Jaramillo, Benchmarking hydrogen evolving reaction and oxygen evolving reaction electrocatalysts for solar water splitting devices, *J. Am. Chem. Soc.*, **2015**, 137, p. 4347-357.

[17] M.K. Debe *et al.*, Initial performance and durability of ultra-low loaded NSTF electrodes for PEM electrolyzers, *J. Electrochem. Soc.*, **2012**, 159, K165.

[18] S.A. Grigoriev *et al.*, Hydrogen production by proton exchange membrane water electrolysis using cobalt and iron hexachloroalatochelates as efficient hydrogen-evolving electrocatalysts, *Int. J. Hydrog. Energy*, **2017**, 42, p. 27845-850.

[19] C. Rozain, Développement de nouveaux matériaux d'électrodes pour la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau, Thèse de l'Université Paris Sud, **2013**.

[20] L. Gubler, P.S. Institut, Membranes for water electrolysis. Durability and degradation issues in PEM electrolysis cells and its components, 16 fév. **2016**, Fraunhofer ISE, Freiburg (All.).

[21] S.A. Grigoriev, P. Millet, S.A. Volobuev, V.N. Fateev, Optimization of porous current collectors for PEM water electrolyzers, *Int. J. Hydrog. Energy*, **2009**, 34, p. 4968-973.

[22] A. Nouri-Khorasani, E. Tabu Ojong, T. Smolinka, D.P. Wilkinson, Model of oxygen bubbles and performance impact in the porous transport layer of PEM water electrolysis cells, *Int. J. Hydrog. Energy*, **2017**, 42, p. 28665-680.

[23] M.A. Hoeh *et al.*, In operando synchrotron X-ray radiography studies of polymer electrolyte membrane water electrolyzers, *Electrochem. Commun.*, **2015**, 55, p. 55-59.

[24] P. Lettenmeier, S. Kolb, F. Burggraf, A.S. Gago, K.A. Friedrich, Towards developing a backing layer for proton exchange membrane electrolyzers, *J. Power Sources*, **2016**, 311, p. 153-158.

[25] S. Siracusano, V. Baglio, A. Stassi, L. Merlo, E. Moukheiber, A.S. Arico, Performance analysis of short-side-chain Aquivion® perfluorosulfonic acid polymer for proton exchange membrane water electrolysis, *J. Membr. Sci.*, **2014**, 466, p. 1-7.

[26] A. Christensen, Assessment of hydrogen production costs from electrolysis: United States and Europe, **2020**, [https://theicct.org/sites/default/files/publications/final\\_icct2020\\_assessment\\_of%20hydrogen\\_production\\_costs%20v2.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/final_icct2020_assessment_of%20hydrogen_production_costs%20v2.pdf)

**Sébastien GERME**, technicien de recherche et développement, **Frédéric FOUADA-ONANA**, ingénieur-chercheur, et **Sébastien ROSINI\***, ingénieur-chercheur, Université Grenoble Alpes, CEA LITEN-DEHT, Grenoble.

\* [Sebastien.rosini@cea.fr](mailto:Sebastien.rosini@cea.fr)



Toute l'actualité de la  
Société Chimique de France

et bien plus...

**societechimiquedefrance.fr**

### La pyrolyse du méthane

#### De l'hydrogène « gris » à l'hydrogène « turquoise »

**Résumé** La production d'hydrogène « turquoise » suscite aujourd'hui un intérêt croissant. Cette voie est basée sur la pyrolyse du gaz naturel à haute température pour la coproduction d'hydrogène et de carbone solide. Le principal avantage de cette méthode est qu'elle est thermodynamiquement beaucoup moins énergivore que l'électrolyse de l'eau. Dans cet article sont abordées les différentes méthodes de pyrolyse du méthane, avec un focus particulier sur la pyrolyse plasma qui permet la coproduction d'hydrogène et de noir de carbone à forte valeur ajoutée avec une faible empreinte carbone.

**Mots-clés** **Pyrolyse, méthane, plasma, hydrogène turquoise, noir de carbone, décarbonation.**

**Abstract** **Plasma pyrolysis: from "gray" hydrogen to "turquoise" hydrogen**

The production of "turquoise" hydrogen is now attracting growing interest. This pathway is based on the pyrolysis of natural gas at high temperatures for the co-production of hydrogen and solid carbon. The main advantage of this method is that it is thermodynamically much less energy intensive than water electrolysis. In this article are discussed the different methods of methane pyrolysis with a particular focus on plasma pyrolysis which allows the co-production of hydrogen and high added value carbon black with a low carbon footprint process.

**Keywords** **Pyrolysis, methane, plasma, turquoise hydrogen, carbon black, decarbonization.**

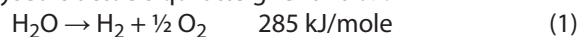
#### L'hydrogène : du « gris » au « turquoise »

Dans la perspective d'une nécessaire transition vers une « décarbonation » massive de l'énergie, l'hydrogène sera très probablement amené à jouer un rôle clé au cours des prochaines décennies. Malheureusement, la méthode actuelle de production d'hydrogène à échelle industrielle la plus courante, le « steam methane reforming (SMR) » ou reformage à l'eau produit de l'hydrogène couramment qualifié de « gris » car elle s'accompagne, en moyenne à l'échelle mondiale, de plus de 10 tonnes de CO<sub>2</sub> par tonne d'hydrogène !

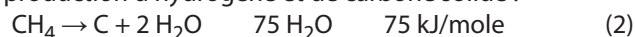
La plupart des compagnies pétrolières et gazières travaillent aujourd'hui sur l'option SMR + CCUS qui consiste à capturer le CO<sub>2</sub> en sortie de procédé pour l'utiliser ou le stocker géologiquement. L'hydrogène ainsi produit est couramment qualifié de « bleu ». Cette option n'est cependant à ce jour pas déployée à l'échelle industrielle. Par ailleurs, des travaux récents par Howards et Jacobson [1] ont montré que loin d'être neutres en carbone, les émissions de gaz à effet de serre provenant de la production d'hydrogène « bleu » sont assez élevées, notamment en raison des émissions dues aux fuites de méthane. À partir d'hypothèses basées sur des taux d'émission de méthane (fuites) de 3,5 % et de potentiel de réchauffement global du méthane (GWP) sur vingt ans, les auteurs ont montré que les émissions totales d'équivalent CO<sub>2</sub> pour l'hydrogène « bleu » ne sont que de 9 à 12 % inférieures à celles de l'hydrogène « gris ».

L'électrolyse de l'eau est évidemment une option idéale à long terme pour la production d'hydrogène « décarboné » (H<sub>2</sub> vert) et le stockage d'électricité renouvelable. Cependant, la réaction de dissociation de l'eau est extrêmement énergivore car elle nécessite 285 kJ par mole (éq. 1), ce qui correspond à environ 40 kWh/kgH<sub>2</sub>. Cela constitue un frein pour le développement à grande échelle de cette technologie à court et moyen termes en raison des coûts de production très élevés, estimés entre 3 à 6 US\$ par kg H<sub>2</sub>, pour le court et

le moyen terme respectivement, malgré des rendements d'électrolyseurs actuels qui atteignent 70 % :



Une troisième voie émergente pour la production d'hydrogène décarboné, communément qualifiée de « turquoise », suscite aujourd'hui un intérêt croissant. Cette voie est basée sur la pyrolyse du gaz naturel à haute température (éq. 2) pour la coproduction d'hydrogène et de carbone solide :



Le principal avantage de cette méthode est qu'elle est thermodynamiquement nettement moins énergivore que la dissociation de l'eau car elle nécessite environ sept fois moins d'énergie par masse (ou mole) d'hydrogène (38 kJ vs 285 kJ par mole H<sub>2</sub>). Un autre avantage est qu'elle permet la coproduction de deux produits potentiellement valorisables : le carbone solide et l'hydrogène.

#### Les procédés de pyrolyse du méthane

Les procédés de pyrolyse du méthane ou du gaz naturel connaissent un regain d'intérêt en raison notamment du faible coût actuel du gaz naturel par rapport au pétrole, du développement de la filière biogaz, et des infrastructures existantes pour le transport et la distribution du gaz. Un rapport récent [2], commandé par le Département américain de l'énergie et des piles à combustible, présente un état de l'art très complet sur le sujet. Les principales conclusions de ce rapport sont synthétisées ci-après.

On peut classer les différents procédés envisagés à ce jour en cinq grandes catégories.

#### Décomposition thermique non catalytique

Ce procédé a été depuis très longtemps utilisé dans l'industrie pour produire un noir de carbone de qualité bien particulière appelé « thermal black » [3], couramment utilisé dans des applications allant des pneumatiques à certains équipements

électriques (câblerie...) en passant par les encres. Au fil du temps, le gaz naturel comme matière première a été largement remplacé par des fractions de pétrole lourd, souvent caractérisées par de fortes teneurs en soufre. L'hydrogène produit étant directement brûlé pour fournir l'énergie de décomposition, on ne peut pas réellement considérer cette méthode comme un moyen de production d'hydrogène. Par ailleurs, le traitement des effluents gazeux qui en résultent augmente considérablement la complexité des installations, du fait notamment des fortes teneurs en oxydes de soufre et mercaptans.

### Décomposition thermique catalytique

Cette approche a fait l'objet d'un grand nombre de recherches, visant notamment à réduire les températures de réaction et l'énergie de décomposition. De très nombreux catalyseurs métalliques et carbonés ont été considérés. Les catalyseurs métalliques les plus étudiés sont le nickel, le cobalt et le fer. Ils permettent de produire des carbones plus ou moins structurés mais qui n'entrent pas dans le domaine des « noirs de carbone ». Les catalyseurs carbonés les plus couramment utilisés sont les charbons actifs et les noirs de carbone. Enfin, de nombreuses configurations de réacteurs ont été développées : lits fixes, circulants, fluidisés...

Bien que de très nombreuses formulations de matériaux catalytiques hautement actifs aient été utilisées, la désactivation des catalyseurs par le dépôt de carbone et leur stabilité mécanique au cours des phases de recyclage restent des problèmes importants, non totalement résolus à ce jour. Par ailleurs, la récupération du carbone, sa séparation du catalyseur ainsi que la « contamination » du carbone par des fragments de catalyseur restent également problématiques.

L'optimisation de ce type de procédé pour permettre à la fois de produire des carbones valorisables de qualité contrôlée et de l'hydrogène répondant aux spécifications requises reste un défi majeur. Par ailleurs, la décomposition incomplète du méthane en un seul passage augmente sensiblement la complexité des systèmes du fait de la nécessité de mise en place de dispositifs pour la séparation et le recyclage des gaz.

Aujourd'hui, cette approche continue de faire l'objet de nombreuses recherches, particulièrement en Allemagne – TUD (Dortmund), RUB (Bochum) – et développements conduits à l'échelle pilote, notamment par BASF, Linde Group et ThyssenKrupp [4].

### Bain de métaux fondus

Cette approche, qui consiste à faire « buller » du méthane à travers une colonne remplie de métal en fusion, fait l'objet de nombreuses recherches, notamment au KIT (Karlsruhe), IASS (Potsdam), TNO (Pays-Bas), BNL (États-Unis) [5-6], et développements à l'échelle pilote, notamment par Czero (États-Unis), Ember-TNO (Pays-Bas).

À l'instar de la décomposition catalytique, de nombreux métaux et alliages métalliques ont été proposés, le rôle du métal pouvant être purement thermique mais également catalytique. Cette technologie est relativement facile à mettre en œuvre et peu énergivore. Elle souffre cependant d'importantes limites liées notamment à la relativement faible température maximale du bain fondu qui, en pratique, peut difficilement dépasser 1 000 °C et qui ne permet généralement pas d'obtenir une conversion totale du méthane. La récupération d'un carbone « valorisable » est également problématique.

À notre connaissance, les technologies les plus avancées restent au stade du pilote et aucun procédé industriel basé sur cette technologie n'a abouti à ce jour.

### Solaire à concentration

De nombreuses recherches sur la pyrolyse du méthane à très haute température par énergie solaire à concentration ont été menées, notamment en France au laboratoire PROMES-CNRS par l'équipe de G. Flamant et à l'ETH (Zurich). Ces recherches ont conduit à d'importantes avancées scientifiques, notamment sur la compréhension et l'analyse des mécanismes de nucléation croissance et les transferts radiatifs en présence de particules. Elles ont donné lieu à de nombreuses publications scientifiques [7-9]. Ces travaux n'ont cependant pas dépassé le stade du laboratoire. La gestion et le transport du carbone solide au sein du procédé posent en particulier de sérieux problèmes technologiques. Le contrôle de la qualité des carbones produits et les coûts des centrales solaires restent également des verrous importants pour le déploiement de cette technologie à court et moyen termes.

### Plasmas non thermiques

L'utilisation de plasmas froids ou non thermiques a également été envisagée. À notre connaissance, les avancées les plus significatives ont été réalisées au Canada par la startup Atlantic Hydrogen [10] entre 2010 et 2015, qui a développé la technologie jusqu'au stade préindustriel à Fredericton (New Brunswick). Malheureusement, la société a fait faillite en 2015, notamment du fait de problèmes technologiques et d'une trop faible valorisation des carbones produits pour assurer la viabilité économique du procédé. Aujourd'hui, la compagnie russe Gazprom a fait plusieurs annonces dans la presse indiquant un intérêt pour cette approche. À notre connaissance, les recherches dans ce domaine n'ont pas dépassé le stade du laboratoire.

### Plasmas thermiques

Les plasmas thermiques permettent la conversion d'énergie électrique en énergie thermique, avec des rendements qui sont d'autant plus élevés que la taille de l'installation est importante. Ils permettent un apport d'énergie flexible et contrôlable à très haute température, à partir de tous types de gaz, et ceci sans émissions directes de CO<sub>2</sub>. Ils sont particulièrement adaptés aux procédés endothermiques et nécessitant de (très hautes) températures.

L'idée d'utiliser les plasmas ou les arcs électriques pour la pyrolyse d'hydrocarbures n'est pas récente puisque le premier brevet sur la décomposition des hydrocarbures par plasma thermique a été publié en 1920 par Rose [11] ! De 1920 à 1990, de très nombreux producteurs de noirs de carbone ont continué à explorer cette voie, notamment Goodyear, Ashland Oil and Refining, Continental Carbon, Phillips Petroleum (pour un historique détaillé sur le sujet, voir [12]).

Dans les années 1990, la société d'ingénierie norvégienne Kvaerner (aujourd'hui Aker-Kvaerner) a activement travaillé sur le développement d'une technologie plasma à courant continu DC pour la coproduction de noir de carbone et d'hydrogène à partir de gaz naturel. Les travaux initiaux ont été conduits en collaboration avec l'équipe de J.A. Bakken, à SINTEF-NTNU (Trondheim, Norvège). Un premier pilote plasma de 3 MW a été installé et testé avec succès en Suède dans les installations ScanArc à Hofors en 1992. En 1997, Kvaerner a entrepris la construction d'une première unité

industrielle d'une capacité de 20 000 tonnes de noir de carbone et 70 millions de  $\text{Nm}^3$  d'hydrogène par an, installée à Karbomont (Canada). Malheureusement, le développement de la technologie a dû être stoppé en 2003 en raison de problèmes technologiques et économiques, liés principalement à la qualité insuffisante du carbone produit pour le marché du noir de carbone [13-14].

Quasiment simultanément, en 1993, Fulcheri et Schwob ont initié des recherches sur le développement d'un procédé basé sur une technologie plasma triphasée [15]. Cette technologie a fait l'objet de nombreux brevets et articles scientifiques (pour un historique complet sur les recherches et l'évolution de cette technologie, voir [16]).

D'autres recherches ont suivi par la suite, menées par différentes équipes basées au Canada, en Chine, aux États-Unis et en Corée du Sud, qui ont également travaillé sur des dispositifs de laboratoire basés sur différentes technologies plasma (induction, micro-ondes, arc DC).

### La technologie plasma à électrodes en graphite

Le dispositif plasma triphasé, développé initialement au PROMES-CNRS puis à Mines-ParisTech, est alimenté par une source électrique triphasée fonctionnant directement à la fréquence du réseau (50 Hz), ce qui présente un avantage de taille en termes de CAPEX et OPEX par rapport aux technologies à courant continu qui nécessitent des redresseurs AC-DC souvent très coûteux. En sortie de cette alimentation électrique, chaque phase est reliée à chacune des trois électrodes en graphite situées en tête du réacteur. Un écoulement d'hydrogène gazeux est introduit axialement à grande vitesse dans la partie supérieure du réacteur. Sous l'effet du courant électrique, cet écoulement gazeux porté à très haute température libère des électrons et devient ionisé pour se comporter comme un excellent conducteur électrique gazeux qui forme un écoulement plasma sous l'effet de l'écoulement d'hydrogène gazeux introduit axialement à grande vitesse. L'amorçage du plasma est initié par contact (court-circuit entre les trois électrodes) ; les trois électrodes sont écartées une fois le plasma établi. Le réglage de la distance inter-électrode permet de « régler » les tensions d'arc. Le courant est, quant à lui, contrôlé à partir de la tension de sortie de l'alimentation électrique. Une vue schématique du dispositif est représentée sur la *figure 1*.

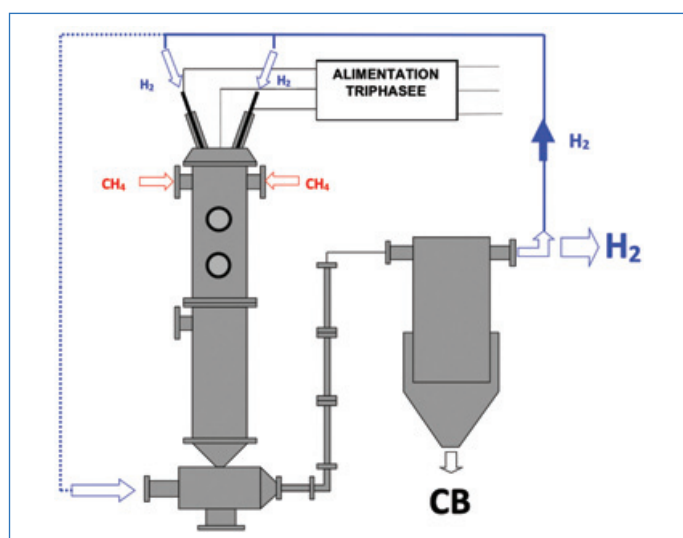


Figure 1 - Schéma de principe du dispositif triphasé.

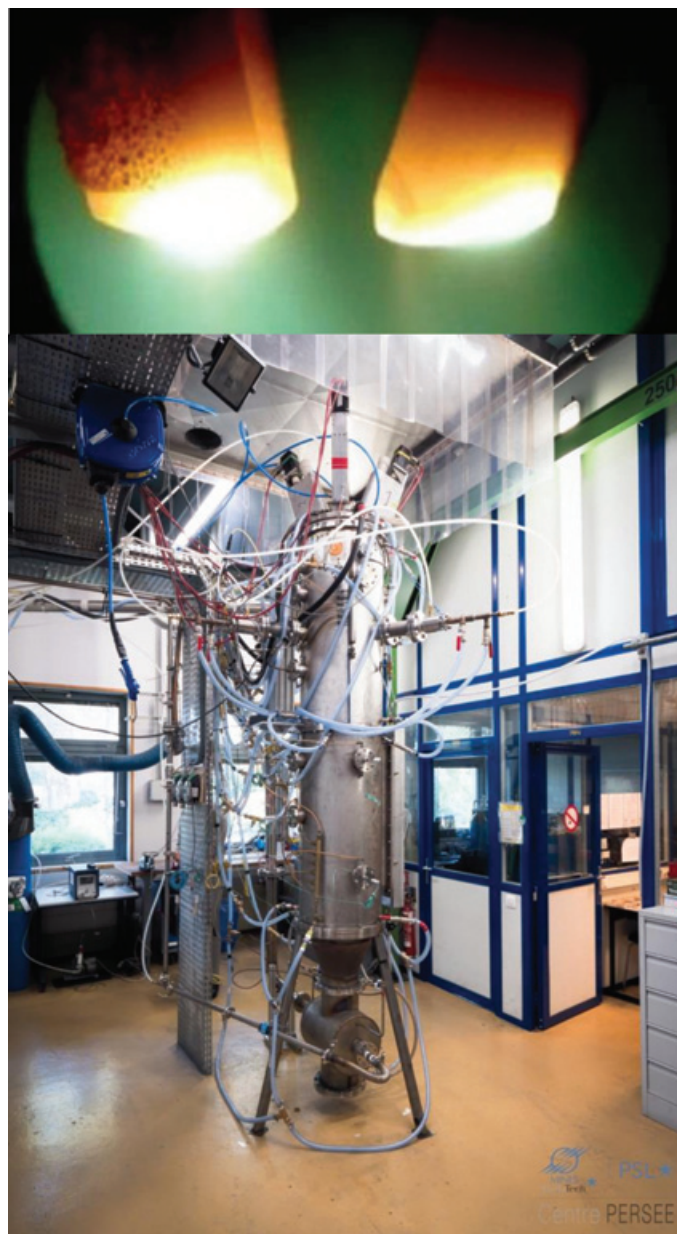


Figure 2 - Vue de la zone plasma : électrodes (haut) et réacteur triphasé (bas).

À noter que contrairement à la plupart des dispositifs plasmas à courant continu DC qui utilisent des électrodes métalliques dont la durée de vie ne dépasse généralement pas quelques centaines d'heures, les électrodes sont ici des éléments consommables du dispositif et leur érosion est compensée par un dispositif d'avance et d'alimentation automatique. Cette érosion reste cependant limitée du fait du mouvement rapide des arcs entre les trois électrodes sous l'effet des alternances de courant et des forces électromagnétiques, chaque électrode agissant successivement comme anode et cathode. Le méthane est injecté en aval du plasma dans des conditions extrêmement contrôlées avant de se décomposer en carbone solide et hydrogène sous l'effet des hautes températures. Un filtre à manche situé en sortie du dispositif permet de séparer le carbone solide de l'hydrogène. La température moyenne de réaction peut varier entre 1 200 et 2 000 °C en fonction de la qualité du noir de carbone recherchée. Cette température est établie à partir des débits entrants (gaz plasma et méthane) et de la puissance injectée dans le plasma. La *figure 2* présente une vue du dispositif et de la zone d'arc.

En 2012, la société californienne Monolith Materials [17] a entrepris le développement industriel de ce procédé pour la





Figure 3 - Vue aérienne du pilote installé en Californie (Seaport).

coproduction de noir de carbone et d'hydrogène, en collaboration avec l'équipe PERSEE à Mines-ParisTech. À court terme en effet, l'économie du procédé dépend largement de la valeur et de la qualité du carbone produit. Le domaine du noir de carbone a été choisi car il constitue, à ce stade, le domaine le plus intéressant compte tenu des volumes du marché (12 millions de tonnes par an) et de la forte valeur ajoutée du carbone avec des prix sur le marché compris entre 500 et 3 000 US\$ par tonne en fonction de la qualité (grade) du noir de carbone.

Un premier pilote d'une puissance d'environ 1 MW a été développé et testé avec succès de 2013 à 2018 à Mountain View-Seaport, au cœur de la Silicon Valley californienne (figure 3). En 2018, les résultats obtenus au stade pilote ont été jugés suffisamment intéressants pour initier la construction d'une première unité industrielle, OC1, installée à Lincoln dans le Nebraska, avec un démarrage de l'installation prévu en 2020 (figure 4) [18].

### Un procédé, deux produits potentiellement valorisables

L'hydrogène peut être considéré comme la forme ultime de la « décarbonation » des hydrocarbures. Comme évoqué précédemment, plus de 95 % de l'hydrogène sur le marché mondial est produit à partir d'hydrocarbures, principalement à partir du gaz naturel (SMR) avec des impacts directs considérables en termes d'émissions de CO<sub>2</sub>.

D'un autre côté, depuis la révolution industrielle, la production de noirs de carbone a régulièrement augmenté pour atteindre aujourd'hui 12 millions de tonnes (Mt) par an. De nombreuses études montrent que la demande continuera de croître et qu'elle devrait atteindre 20 Mt avant 2030. 90 % de la production de noirs de carbone est utilisée dans l'industrie des pneus ; 95 % étant produits à partir du procédé

« fournaise ». Ce procédé, développé il y a plus d'un siècle, repose sur la combustion incomplète de différents hydrocarbures lourds issus de la distillation de brut. Il est extrêmement polluant en termes d'émissions de SO<sub>x</sub> et NO<sub>x</sub> et se caractérise par de très mauvais rendements en carbone puisqu'une grande partie de l'hydrocarbure est brûlée pour apporter l'énergie nécessaire au craquage de la fraction restante, avec comme conséquence directe des émissions de CO<sub>2</sub> comprises entre 3 et 5 tonnes CO<sub>2</sub>éq par tonne de noir de carbone.

Le principe du nouveau procédé vise à terme à remplacer les procédés de combustion ci-dessus, tous deux caractérisés par d'importants impacts environnementaux, par un nouveau procédé électrique, sans émission directe de CO<sub>2</sub> et permettant l'obtention de rendements en carbone voisins de 100 %.

### Le noir de carbone

Le noir de carbone est un matériau nanostructuré possédant un taux de carbone très élevé, généralement supérieur à 98 % [19]. Il se présente généralement sous forme de fines particules quasi sphériques, appelées particules primaires, reliées entre elles par un certain nombre de liaisons fortes pour former des agrégats qui peuvent présenter des structures ramifiées plus ou moins complexes. Ces agrégats peuvent former des agglomérats par des liaisons faibles qui peuvent se briser sous l'effet de contraintes mécaniques. Le diamètre moyen des particules primaires varie entre quelques dizaines et quelques centaines de nanomètres en fonction de la qualité (grade) des noirs de carbone.

Le terme de « structure » se réfère à l'organisation des particules primaires au sein de l'agrégat. Une structure élevée correspond à une organisation comprenant un grand nombre de particules très ramifiées et largement entrelacées. Une faible structure correspond à une organisation en particules



Figure 4 - Vue générale de OC1 (Lincoln, Nebraska).

isolées ou en agrégats constitués d'un faible nombre de particules. La *figure 5* représente une image par microscopie électronique à transmission (MET) d'un agrégat de noir de carbone caractéristique ainsi qu'une représentation schématique de la section d'une particule primaire.

Les particules de noir de carbone sont généralement composées de petites cristallites présentant un arrangement atomique turbostratique. Une certaine confusion peut exister dans la littérature entre les termes « noir de carbone » ou « carbon black » et « suie », « soot » ou « black carbon ». Le premier fait en effet référence à un matériau produit dans des conditions contrôlées, tandis que le second fait référence à un résidu fatal de combustion qui peut être dangereux. Nous verrons cependant dans ce qui suit que ces deux types de nanomatériaux carbonés sont généralement issus de mécanismes de croissance très similaires.

Les propriétés des noirs de carbone dépendent fortement des conditions de synthèse (températures, temps de séjours...). Leurs applications industrielles dépendent d'un très grand nombre de paramètres physico-chimiques qui ne seront pas développés ici. Notons cependant que deux paramètres jouent un rôle particulièrement important pour les applications dans les élastomères (pneumatiques) : le diamètre moyen des particules et la structure du noir de carbone. Les noirs de carbone natifs ne présentant généralement aucune porosité, il existe donc une relation directe entre la taille des particules et la mesure de la surface spécifique (BET) généralement exprimée en  $\text{m}^2/\text{g}$ . Pour ce qui concerne l'estimation de la structure moyenne des agrégats, les méthodes les plus utilisées sont basées sur leur capacité d'absorption de liquides. L'estimation de ces deux paramètres clés fait l'objet d'une norme ASTM très largement utilisée par les industriels.

La formation des noirs de carbone à partir du méthane suit un processus de déshydrogénation continu de différents composés hydrocarbonés ultra-rapide. Dans les premières étapes, on assiste à des ruptures d'un certain nombre de liaisons C-H sous l'effet des très hautes températures et à la création de liaisons C-C thermodynamiquement plus stables à haute température pour former ainsi des précurseurs alcènes et alcynes. L'acétylène, particulièrement stable à haute température, apparaît comme un précurseur majeur. Dans l'étape suivante, les premiers précurseurs réagissent entre eux pour progressivement former des composés aromatiques couramment appelés hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Différents mécanismes de formation des HAP ont été identifiés mais le mécanisme principal est appelé « HACA » (H-abstraction-acétylène-addition). La cinétique du mécanisme HACA décroît au fur et à mesure de la croissance des clusters en raison de l'augmentation de la barrière énergétique. Intervient alors un second mécanisme de croissance résultant des collisions entre HAP. Le principal mécanisme d'assemblage des HAP par collision reste sujet à débat. Les forces faibles de type Van der Waals semblent jouer un rôle important ; néanmoins, l'hypothèse de la création de liaisons covalentes semble également possible, en particulier pour les processus à très haute température (2 000 K). Cette étape de collision des premiers HAP est connue sous le nom de processus de nucléation ; ces nucléi étant formés par l'assemblage de dix à vingt cycles aromatiques. L'étape suivante conduit à la formation de nanogouttes de goudron très visqueux par collision coalescente de plusieurs nucléi. La solidification de ces gouttelettes, aussi appelée maturation, se produit par un réarrangement interne de la constitution des HAP selon des couches turbostratiques et par la perte progressive d'hydrogène au sein de la particule. Les particules passent alors

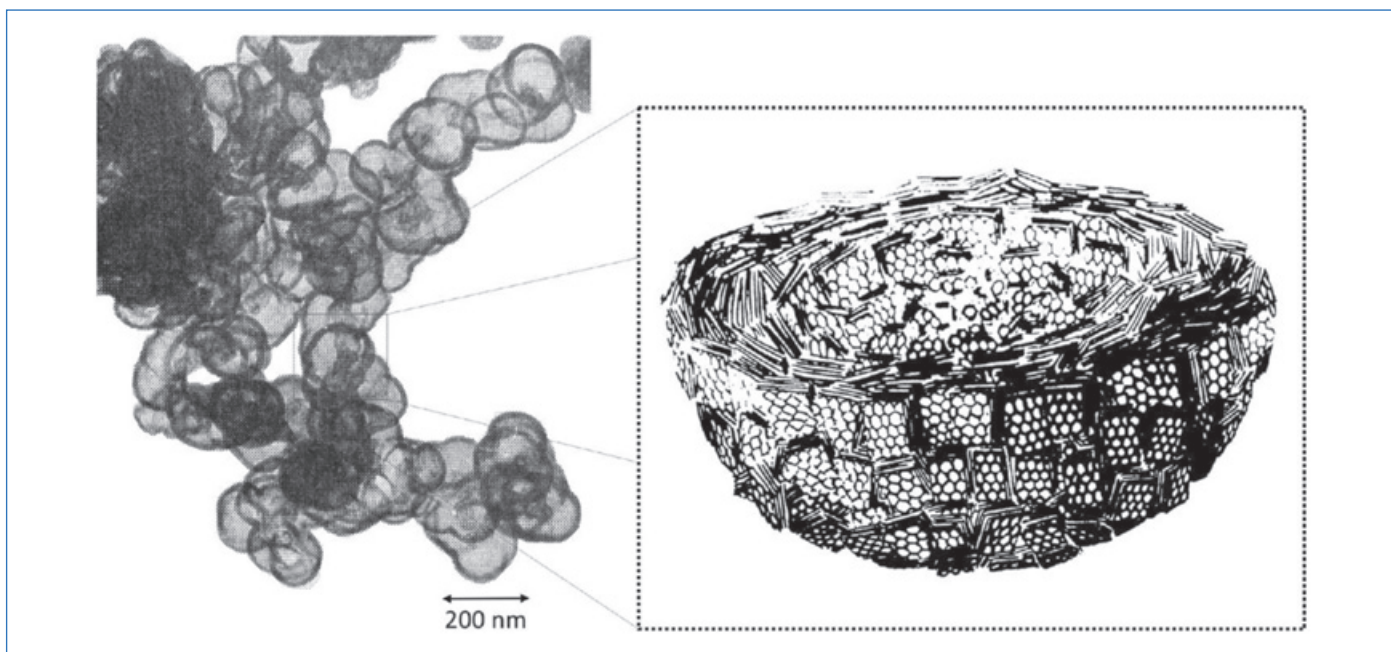


Figure 5 - Image par microscopie électronique à transmission (MET) d'un agrégat de noir de carbone caractéristique et représentation schématique de la section d'une particule primaire (d'après Donnet [2]).

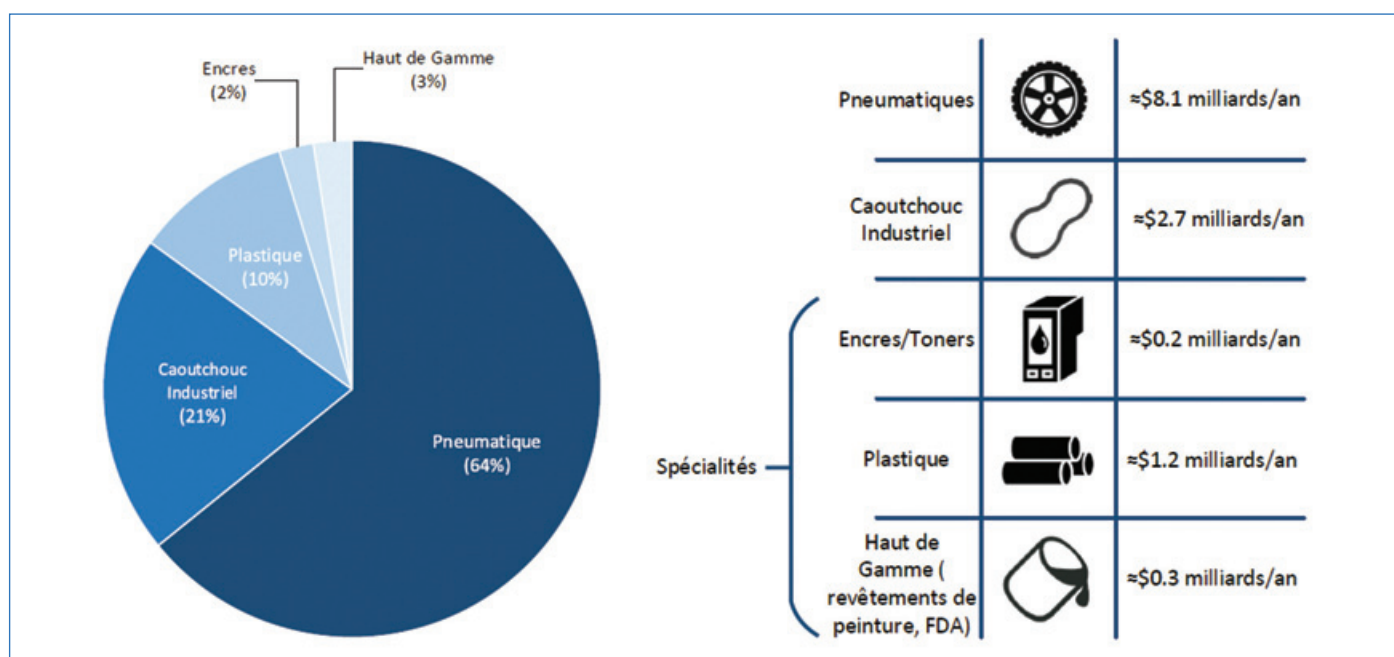


Figure 6 - Principales applications du noir de carbone représentées par chiffre d'affaires sectoriel (production mondiale : 12 millions de tonnes par an).

d'un état visqueux (goudron) à un état quasi solide. Ayant atteint un état quasi solide, le mécanisme de croissance par collision passe d'un mode de coalescence à un processus d'agrégation continue pour former des agrégats qui présentent généralement une organisation fractale comme illustré sur la figure 5.

La production industrielle de noir de carbone a démarré il y a plus d'un siècle. Aujourd'hui, ce secteur fait partie des cinquante industries chimiques les plus importantes en termes de chiffre d'affaires. Le marché mondial est d'environ 12 Mt par an pour un chiffre d'affaires d'environ 13 milliards US\$. L'essentiel de cette production est utilisé dans les élastomères (caoutchouc), principalement les pneumatiques. La figure 6 présente les principaux domaines d'application représentés en fonction du chiffre d'affaires du secteur.

### Un procédé disruptif

Le procédé plasma DMD, issu de plus de vingt-cinq ans de R & D conduits au sein du laboratoire PERSEE, permet de produire de l'hydrogène « turquoise » et du carbone solide par pyrolyse du gaz naturel à très haute température sans émissions directes de CO<sub>2</sub> à partir d'une source d'énergie électrique décarbonée. Ce procédé pourrait s'avérer disruptif pour l'industrie du noir de carbone. Cité dans le dernier rapport établi par l'Agence internationale de l'énergie en 2019, il pourrait à plus long terme le devenir pour la production d'hydrogène [20].

Il nécessite, en fonction de la qualité du carbone produit, entre 10 et 30 kWh par kg H<sub>2</sub>, ce qui est très inférieur à l'électrolyse de l'eau qui nécessite aujourd'hui environ 55 kWh par kg H<sub>2</sub>.

### Stockage du carbone dans les sols

Un récent rapport coordonné par l'INRA, à l'initiative de l'ADEME, intitulé « Stocker du carbone dans les sols français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? », publié en 2019 [21], rappelle le rôle primordial que pourrait jouer le stockage du carbone dans le sol dans la lutte contre le réchauffement climatique. Le rapport spécial du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) de 2018 établit que pour contenir la hausse de la température en deçà de + 1,5 °C par rapport à la période préindustrielle, il serait nécessaire d'atteindre la neutralité carbone à l'échelle du globe en 2050. L'accord de Paris de 2015 mentionne, dans son article 4, l'objectif d'atteindre la neutralité carbone avant la fin du siècle, pour rester bien en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels. Dans le cadre du projet de loi relatif à l'énergie et au climat de 2019, la France remplace l'objectif de division par quatre des émissions de GES entre 1990 et 2050 (facteur 4) par un objectif de neutralité carbone en 2050. Parallèlement, la stratégie mise en place en 2015 pour atteindre la neutralité carbone suppose à la fois :

- de réduire drastiquement les émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'usage des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), à la déforestation et à la disparition des zones humides, ainsi que les émissions des autres GES (CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O), d'origine majoritairement agricole ;
- d'accroître simultanément le puits de CO<sub>2</sub> que constitue la biosphère continentale.

Parallèlement à la photosynthèse qui se déroule dans la partie aérienne des plantes, des recherches récentes démontrent le rôle primordial du carbone dans les sols, notamment au regard de la diversité microbologique vivante (bactéries, champignons...) qui se développe en symbiose avec les végétaux, et qui joue un rôle clé pour le transport de l'eau et des nutriments inorganiques vers les racines.

Une idée émergente envisagée au sein de notre équipe consiste à étudier la possibilité de stocker directement le carbone – ex pyrolyse – dans les sols. L'utilisation du carbone solide dans les sols pourrait permettre d'accroître la croissance des cultures tout en stockant le carbone solide dans les sols de manière utile, durable et sûre, à l'instar du carbone d'origine organique.

Ce procédé utilisant du méthane (CH<sub>4</sub>) comme matière première et de l'électricité (décarbonée), sa viabilité économique actuelle dépend largement du coût du gaz naturel, du coût de l'électricité, et de la valeur du carbone produit. Rappelons qu'en termes de masse, 1 tonne de méthane permet de produire 250 kg d'hydrogène... et 750 kg de carbone !

Ainsi à court terme, le développement de cette technologie repose sur la production de noir de carbone, nanomatériau carboné massivement utilisé dans l'industrie (12 Mt par an) et présentant une importante valeur ajoutée.

À moyen terme, en fonction des décisions politiques qui pourraient être prises (taxe carbone...) et des conditions économiques (prix de l'électricité, gaz, hydrogène), le développement de cette technologie devrait s'orienter vers la production massive d'hydrogène. Se posera alors la question fondamentale de l'utilisation du carbone solide à de très grandes échelles. Sur la base d'une production annuelle d'hydrogène de 80 Mt (production actuelle), la production d'hydrogène par pyrolyse du méthane conduirait à la production de 240 Mt de carbone par an, ce qui est vingt fois supérieur au marché mondial du noir de carbone. Dans cette perspective, plusieurs pistes sont actuellement à l'étude dans notre équipe, comme par exemple l'utilisation du carbone dans les matériaux de construction (béton, ciments...), ou encore l'utilisation du carbone comme amendement dans les sols, à l'instar de ce qui peut être fait avec du biochar ou de la lignite (voir encadré).

[1] R.W Howards, M.Z. Jacobson, How green is blue hydrogen?, *Energy Sci. Eng.*, **2021**, <https://doi.org/10.1002/ese3.956>.

[2] R.A. Dagle et al., *An Overview of Natural Gas Conversion Technologies for Co-Production of Hydrogen and Value-Added Solid Carbon Products*. United States: N. p., Web, **2017**, doi:10.2172/1411934.

[3] J.B. Donnet, *Carbon Black: Science and Technology*, 2<sup>nd</sup> ed., CRC Press, **1993**.

[4] A. Bode et al., Research cooperation develops innovative technology for environmentally sustainable syngas production from carbon dioxide and hydrogen, 20<sup>th</sup> World Hydrogen Energy Conference, Gwangju Metropolitan City (Corée), 16-21 juin **2014**.

[5] M. Plevan et al., Thermal cracking of methane in a liquid metal bubble column reactor: experiments and kinetic analysis, *Int. J. Hydrog. Energy*, **2015**, *40*, p. 8020-33.

[6] M. Steinberg, Fossil fuel decarbonization technology for mitigating global warming, *Int. J. Hydrog. Energy*, **1999**, *24*, p. 771-777.

[7] A. Steinfeld, Solar thermochemical production of hydrogen: a review, *Solar Energy*, **2005**, *78*, p. 603-615.

[8] S. Abanades et al., Experimental analysis of direct thermal methane cracking, *Int. J. Hydrog. Energy*, **2011**, *36*, p. 12877-886.

[9] S. Rodat et al., A pilot-scale solar reactor for the production of hydrogen and carbon black from methane splitting, *Int. J. Hydrog. Energy*, **2010**, *35*, p. 6748-758.

[10] [www.technologyreview.com/s/413344/turning-natural-gas-green](http://www.technologyreview.com/s/413344/turning-natural-gas-green)

[11] J.R. Rose, Process of and apparatus for producing carbon and gaseous fuel, US Patent 1352085, **1920**.

[12] J. Gonzalez-Aguilar et al., Carbon nanostructures production by gas-phase plasma processes at atmospheric pressure, *J. Phys. D Appl. Phys.*, **2007**, *40*(8), 2361.

[13] B. Gaudernack, S. Lynum, Hydrogen from natural gas without release of CO<sub>2</sub> to the atmosphere, *Int. J. Hydrog. Energy*, **1998**, *23*, p. 1087-93.

[14] S. Lynum et al., Production of carbon black, Patent WO-9320154, **1993**.

[15] L. Fulcheri, Y. Schwob, From methane to hydrogen, carbon black and water, *Int. J. Hydrog. Energy*, **1995**, *20*, p. 197-202.

[16] L. Fulcheri et al., Three-phase ac arc plasma systems: a review, *Plasma Chem. Plasma Process.*, **2015**, *35*, p. 565-585.

[17] <https://monolithmaterials.com>

[18] Upgrading natural gas to carbon and hydrogen with sustainable technology from natural gas pyrolysis, AIChE Ammonia Production, 13 nov. **2019**, [www.ammoniaenergy.org/wp-content/uploads/2019/08/20191113.0935-Hanson\\_2019\\_AIChE\\_Ammonia-Synthesis\\_Pyrolysis.pdf](http://www.ammoniaenergy.org/wp-content/uploads/2019/08/20191113.0935-Hanson_2019_AIChE_Ammonia-Synthesis_Pyrolysis.pdf)

[19] "What is Carbon Black... not just a scientific name for soot?", Degussa AG/Advanced Fillers & Pigments, *Technical Booklet*.

[20] IEA, *The future of hydrogen*, Report de l'IEA pour le G20, Japon, **2019**, [www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen](http://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen)

[21] S. Pellerin, L. Bamière et al., Stocker du carbone dans les sols français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ?, *Synthèse du rapport d'étude*, INRA (France), **2019**.

#### Laurent FULCHERI,

Directeur de recherche, Université PSL, Mines ParisTech, PERSEE, Centre Procédés, Énergies renouvelables et Systèmes énergétiques, Sophia Antipolis.

\* [laurent.fulcheri@mines-paristech.fr](mailto:laurent.fulcheri@mines-paristech.fr)

### L'hydrogène naturel, une nouvelle source d'énergie renouvelable

**Résumé** L'hydrogène naturel, sous sa forme moléculaire  $H_2$ , est abondant dans le milieu géologique – telle est la conclusion d'une synthèse récente. Ce gaz est généré en permanence dans les profondeurs de la Terre par des réactions inorganiques, ce qui permet de le classer comme une ressource renouvelable. Les estimations de flux d'hydrogène naturel ont été revues à la hausse, ce qui ouvre la possibilité d'exploration de cette nouvelle ressource.

**Mots-clés** Hydrogène naturel, énergie, renouvelable, économie.

**Abstract** Natural hydrogen, a new source of renewable energy

Natural hydrogen in its molecular form  $H_2$  is abundant in geological environment – this is the conclusion of a recent review. This gas is permanently generated in the depths of the Earth by inorganic reactions, which allows it to be classified as a renewable resource. Estimates of natural hydrogen flux have been revised upwards, which opens up the possibility of exploration of this new resource.

**Keywords** Natural hydrogen, energy, renewable, economy.

Une synthèse de la littérature scientifique autour du sujet de l'hydrogène naturel a été récemment publiée dans le journal *Earth-Science Reviews* [1]. Elle combine des données et des idées de près de cinq cents publications et livres scientifiques, et montre de manière concluante que l'hydrogène est beaucoup plus abondant dans la nature qu'on ne le pensait auparavant. Il s'agit de l'hydrogène dans son état moléculaire, ou dihydrogène ( $H_2$ ), et non de l'hydrogène lié de façon covalente sous forme d'eau ou dans les composés organiques<sup>(1)</sup>. La Terre est recouverte d'océans et de matières organiques qui contiennent de l'hydrogène, mais pendant longtemps, il a été considéré que le dihydrogène ne pouvait pas être présent sur Terre en grandes quantités. Les découvertes périodiques de dihydrogène étaient considérées comme des erreurs d'échantillonnage, ou comme des curiosités géologiques.

Sans le savoir, les humains ont rencontré depuis l'Antiquité des gaz riches en hydrogène, tels les mofettes (échappements naturels) de gaz qui brûlent en continu à Chimère, près d'Antalya en Turquie (figure). Ce gaz contient de 7,5 à 11,3 % de  $H_2$  et ses événements actifs sont connus depuis plus de 2 500 ans. La légende dit qu'à cet endroit se trouvait la source de la première flamme olympique. C'est aussi le lieu où les anciens Grecs situaient l'ancre de la Chimère, ce monstre mythique vaincu par le héros Bellérophon monté sur le cheval ailé Pégase.

La première analyse publiée d'un échantillon de gaz naturel contenant de l'hydrogène a été effectuée en 1888 par D. Mendeleïev. Il a signalé 5,8 à 7,5 % d'hydrogène dans le gaz s'échappant des fractures du charbon d'une mine près de la ville de Makiïvka, dans la région de Donetsk en Ukraine. Dans le siècle qui va suivre, c'est dans cette partie du globe – en Europe de l'Est et en Asie du Nord – que la majorité des découvertes d'hydrogène naturel sera faite. Mais ce n'est pas parce que cette région du monde est plus riche en hydrogène, mais simplement parce que historiquement l'hydrogène naturel y a été étudié plus souvent.

Cet exemple montre clairement une erreur de raisonnement logique. Si personne ne s'attend à trouver de l'hydrogène libre, personne n'en cherche. Ce préjugé influence la façon dont les échantillons de gaz sont analysés, mais surtout la



Photo du gaz brûlant en continu à Chimère (aussi appelé Yanartas), près d'Antalya en Turquie. Selon la légende, il serait la source de la première flamme olympique. Wikimedia/W. Neuheisel (licence cc-by-2.0).

façon dont les systèmes de détection sont conçus. Une grande partie des chromatographes en phase gazeuse utilisent l'hydrogène comme gaz-vecteur ; dans ce cas, l'hydrogène présent dans l'échantillon ne sera pas détecté.

Cependant, il existe de nombreux exemples dans la littérature scientifique de détections d'hydrogène dans la nature. L'article de synthèse [1] résume et classe les découvertes d'hydrogène en tant que gaz libre dans différents environnements : inclusions dans des roches de divers types, gaz dissous dans les eaux souterraines. L'hydrogène a été détecté à des concentrations élevées, souvent en tant que gaz majeur, dans tous les types de milieux géologiques : sédiments, roches métamorphiques et ignées, socle cristallin, gisements de minéraux et mines de charbon, réservoirs de pétrole et de gaz, aquifères.

Plusieurs mécanismes de génération d'hydrogène ont été proposés qui peuvent être classés dans les catégories suivantes :

- dégazage de l'hydrogène profond venant du cœur et du manteau de la Terre [2],
- réaction de l'eau avec les roches ultrabasiques (serpentinisation) [3],
- contact de l'eau avec les agents réducteurs dans le manteau [4],
- interaction de l'eau avec les surfaces rocheuses fraîchement exposées [5],
- décomposition des hydroxydes dans la structure des minéraux [6],
- radiolyse naturelle de l'eau [7],
- décomposition de la matière organique [8],
- activité biologique [8],
- activités anthropiques [9] et plus.

Les estimations de flux d'hydrogène sont données pour chaque mécanisme où elles étaient disponibles. En faisant la somme de toutes les sources géologiques, l'article propose une estimation actualisée du débit annuel d'hydrogène de 23 Tg/an<sup>(2)</sup>. Cette valeur est d'un ordre de grandeur supérieur à l'estimation précédente [10], mais très probablement encore insuffisante pour tenir compte des découvertes récentes des flux diffusifs d'hydrogène, qui sont présents sur tous les continents.

Parmi tous les mécanismes proposés, les deux premiers sont susceptibles de s'avérer les plus productifs et nécessitent des commentaires. La serpentinisation est un processus métamorphique dans lequel les roches ultrabasiques – en terminologie géologique ce sont des roches très pauvres en silice, SiO<sub>2</sub> et contenant du Fe<sup>2+</sup> – sont oxydées par l'eau en donnant la serpentine – une famille de minéraux du groupe des silicates – et en produisant de l'hydrogène. Ce processus naturel a été bien étudié et beaucoup d'articles sont disponibles sur le sujet. Jusqu'à présent, ce mécanisme était considéré comme la source principale d'hydrogène naturel.

Par contre, en faisant la synthèse, il est devenu clair que l'hydrogène profond (du cœur et du manteau de la Terre) est très probablement la plus grande source d'hydrogène dans la nature. Il est très probable que de grandes quantités d'hydrogène soient stockées à l'intérieur de la Terre depuis sa formation [2, 11-12]. L'hydrogène sera chimiquement lié sous forme d'hydrures avec des éléments variés. Les études théoriques et les expériences faites au laboratoire montrent que les hydrures de fer (FeH<sub>x</sub>) – Fe étant l'un des éléments principaux dans la composition de la Terre – sont stables sous les conditions de pression et de température prévalant à l'intérieur de la planète [13]. L'ajout d'hydrogène dans le noyau terrestre permet de résoudre l'énigme de la densité de ce dernier, qui est 10 % inférieure à celle de l'alliage Fe-Ni – qui est supposé constituer le noyau mais dont les propriétés ne correspondent pas aux données d'études sismiques. La découverte récente du premier hydrure naturel VH<sub>2</sub> [14] va stimuler des recherches nécessaires pour développer davantage ce sujet.

Progressivement et au cours du temps géologique, les hydrures se décomposent, ce qui génère le flux de l'hydrogène constant en surface de la Terre qui a été découvert par les études récentes. Ce mécanisme est purement inorganique et n'est pas lié aux dépôts fossiles. Cela veut dire qu'en utilisant cet hydrogène, il n'y aura pas d'émissions de dioxyde

de carbone. La génération d'hydrogène naturel dans la Terre via un tel processus géochimique naturel est active dans le temps présent ; elle était active dans le passé et le restera pendant des millions d'années. Pour cette raison, l'hydrogène géologique naturel est une ressource propre et renouvelable.

Actuellement, la plupart de l'hydrogène au monde est produit à partir du méthane par un procédé de vaporeformage qui libère du CO<sub>2</sub>. La production par électrolyse de l'eau gagne progressivement du terrain mais ne sera pas économiquement compétitive comparée au vaporeformage dans le moyen terme [15].

Parce que le débit total d'hydrogène géologique a été sous-estimé et se révèle plus élevé qu'on ne le pensait auparavant, la possibilité d'utiliser cette nouvelle source d'énergie est ouverte. La meilleure chose à propos de l'exploration de l'hydrogène naturel est qu'il n'est pas nécessaire de dépenser de l'énergie pour le produire. Pour cette raison, l'hydrogène naturel devrait être moins cher à la production que l'alternative actuelle la moins chère.

Le premier puits de production, qui fonctionne depuis 2012, fournit 98 % d'hydrogène pur [16] ! Les programmes d'exploration des pionniers commencent dans différents coins du monde. Mon entreprise, Natural Hydrogen Energy LLC, travaille sur l'exploration et la production en Amérique du Nord, où nous avons foré avec succès notre premier puits d'exploration en 2019 ; nous travaillons actuellement sur l'expansion du projet. D'autres sociétés sont actives en Afrique et en Amérique du Sud, et depuis peu en Australie, en Asie et en Europe. Cela signifie que les explorations sont présentes dans toutes les parties du monde ; il est donc possible d'affirmer que l'exploration de l'hydrogène naturel a officiellement débuté !

L'hydrogène naturel participe aux divers processus naturels. C'est aussi une source « d'énergie » pour de nombreux micro-organismes et il joue un rôle important dans la biosphère superficielle et profonde. Bien qu'il soit établi que les micro-organismes peuvent produire de l'hydrogène, le fait est que dans la nature, les bactéries productrices d'hydrogène coexistent toujours avec un organisme approprié utilisant l'hydrogène. De plus, les producteurs d'hydrogène ne peuvent exister sans consommateurs d'hydrogène, qui inhibe leur activité. Ainsi, tout l'hydrogène produit biologiquement est rapidement converti en d'autres composés.

Une grande partie des micro-organismes utilise le CO<sub>2</sub> pour assimiler de l'hydrogène. Le produit de cette réaction est le méthane, d'où vient leur nom « méthanogènes ». Les méthanogènes sont présents dans tous les types de sols, même dans les environnements secs du désert, mais aussi sous la glace de l'Antarctique et dans les profondeurs de la croûte terrestre. Il est possible que l'hydrogène fut le premier « aliment » pour les formes de vie simples durant les toutes premières périodes de l'évolution.

L'hydrogène profond est d'une importance cruciale dans la composition structurale de la Terre et influence un large éventail de phénomènes naturels allant du volcanisme à la formation de minéraux, de l'atmosphère au climat et à l'intégrité de la couche d'ozone. Par exemple, l'hydrogène d'origine géologique n'a pas été pris en compte par les études atmosphériques mais il aurait dû l'être, car en tant que réducteur puissant, il a un impact direct sur les concentrations d'ozone et de son précurseur OH-radical.

Les tests d'hydrogène peuvent être utilisés pour l'étude des environnements naturels, pour la surveillance et même la prévision des tremblements de terre, pour la cartographie des failles et la recherche de minéraux. Il a été proposé que l'hydrogène naturel a joué un rôle important dans la formation des hydrocarbures, et même des diamants !

En conclusion, la revue couvre diverses branches des géosciences [1] et devrait intéresser des spécialistes d'autres domaines et un public plus large, surtout en vue de l'utilisation d'hydrogène naturel en tant que nouvelle source d'énergie renouvelable.

(1) Dans l'article, le terme « hydrogène » signifie H<sub>2</sub> (sauf autres précisions).

(2) Téraграмme par an (Tg), soit 10<sup>12</sup> g/an ou 10<sup>6</sup> T/an.

[1] V. Zgonnik, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: a comprehensive review, *Earth Science Rev.*, **2020**, *203*, art. 103140.

[2] V.N. Larin, *Hydridic Earth: the New Geology of Our Primordially Hydrogen-rich Planet*, Polar Publishing, Alberta, **1993**.

[3] T.M. McCollom, C. Donaldson, Generation of hydrogen and methane during experimental low-temperature reaction of ultramafic rocks with water, *Astrobiology*, **2016**, *16*, p. 389-406.

[4] H.D. Holland, Volcanic gases, black smokers, and the great oxidation event, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **2002**, *66*, p. 3811-826.

[5] K. Suzuki, T. Shibuya *et al.*, Experimental hydrogen production in hydrothermal and fault systems: significance for habitability of seafloor H<sub>2</sub> chemoautotroph microbial ecosystems, *Subseafloor Biosphere Linked to Hydrothermal Systems*, J. Ishibashi, K. Okino, M. Sunamura (eds), Springer, **2015**, p. 87-94.

[6] F.T. Freund, J.T. Dickinson, M. Cash, Hydrogen in rocks: an energy source for deep microbial communities, *Astrobiology*, **2002**, *2*, p. 83-92.

[7] B. Sherwood Lollar, T.C. Onstott *et al.*, The contribution of the Precambrian continental lithosphere to global H<sub>2</sub> production, *Nature*, **2014**, *516*, p. 379-382.

[8] D.H. Ehhalt, F. Rohrer, The tropospheric cycle of H<sub>2</sub>: a critical review, *Tellus B Chem. Phys. Meteorol.*, **2009**, *61*, p. 500-535.

[9] D.H. Barnes, S.C. Wofsy *et al.*, Hydrogen in the atmosphere: observations above a forest canopy in a polluted environment, *J. Geophys. Res.*, **2003**, *108*, <https://doi.org/10.1029/2001JD001199>

[10] A.L. Gilat, A. Vol, Degassing of primordial hydrogen and helium as the major energy source for internal terrestrial processes, *Geosci. Front.*, **2012**, *3*, p. 911-921.

[11] E. Ohtani, N. Hirao *et al.*, Iron-water reaction at high pressure and temperature, and hydrogen transport into the core, *Phys. Chem. Miner.*, **2005**, *32*, p. 77-82.

[12] X. Yang, H. Keppler, Y. Li, Molecular hydrogen in mantle minerals, *Geochem. Perspect. Lett.*, **2016**, *2*, p. 160-168.

[13] E.I. Isaev, N.V. Skorodumova *et al.*, Dynamical stability of Fe-H in the Earth's mantle and core regions, *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, **2007**, *104*, p. 9168-171.

[14] L. Bindi, F. Cámara *et al.*, Discovery of the first natural hydride, *Am. Mineral.*, **2019**, *104*, p. 611-614.

[15] P. Nikolaidis, A. Poullikkas, A comparative overview of hydrogen production processes, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **2017**, *67*, p. 597-611.

[16] A. Prinzhofer, C.S. Tahara Cissé, A.B. Diallo, Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali), *Int. J. Hydrogen Energy*, **2018**, *43*, p. 19315-326.

**Viacheslav ZGONNIK,**

Directeur de la startup Natural Hydrogen Energy LLC.

\* [zgonnik@nh2e.com](mailto:zgonnik@nh2e.com)

<http://nh2e.com>

**CHIMIE ET...**  
Déjà 23 titres dans cette collection...  
Des livres à mettre en toutes les mains !

Commandez en ligne sur [laboutique.edpsciences.fr](http://laboutique.edpsciences.fr)

**edp sciences**

## Nouveaux principes actifs pharmaceutiques

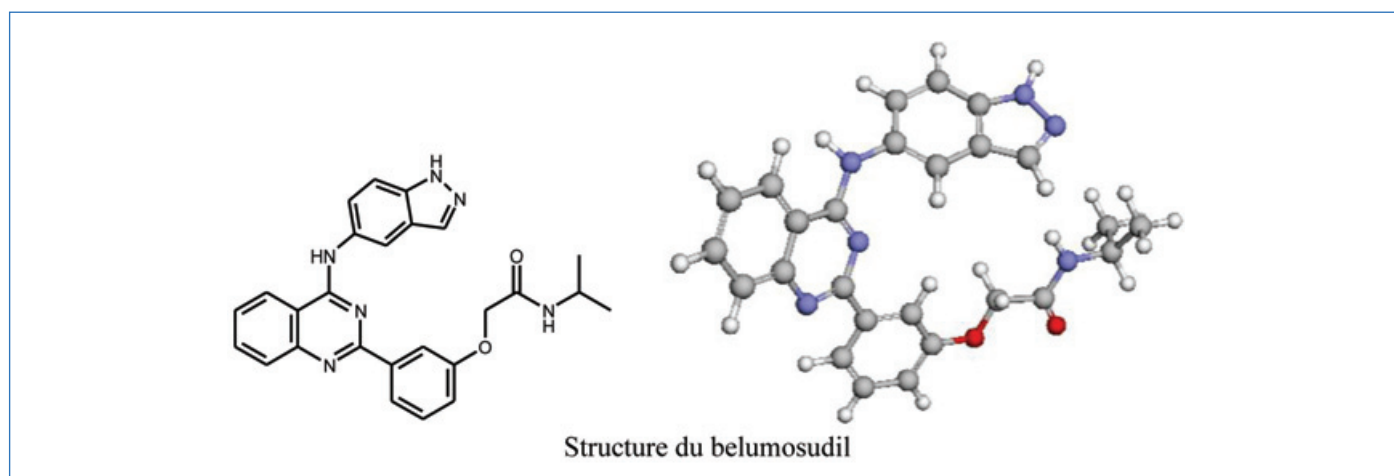
### Bilan des approbations FDA en juin-juillet 2021

Au cours de cette période, cinq nouvelles molécules de synthèse et trois nouvelles molécules biologiques ont été approuvées.

#### Molécules de synthèse

Principe actif	Compagnie	Indication
Ibrexafungerp citrate	Scynexis Inc.	Infections fongiques
Finerenone	Bayer Healthcare	Insuffisance cardiaque et néphropathie diabétique
Fexinidazole	Sanofi	Maladie du sommeil
Belumosudil mesylate	Kadmon Pharmaceuticals LLC	Maladie chronique du greffon contre l'hôte
Odevixibat	Albireo Pharma Inc.	Cholestase intrahépatique familiale progressive

La maladie chronique du greffon contre l'hôte est une complication courante chez les patients ayant reçu des greffes de moelle osseuse et de cellules souches. Le **belumosudil** est un inhibiteur sélectif de ROCK2, une protéine kinase, qui induit la réduction des cellules T auxiliaires de type 17 et folliculaires responsables de la maladie.



N° CAS : 911417-87-3 ; nom IUPAC : 2-(3-{4-[(1H-indazol-5-yl)amino]quinazolin-2-yl}phenoxy)-N-(propan-2-yl)acetamide.

\*La représentation 3D provient du site Drugbank<sup>(1)</sup> ([https://go.drugbank.com/structures/small\\_molecule\\_drugs/DB16703](https://go.drugbank.com/structures/small_molecule_drugs/DB16703)).

#### Molécules d'origine biologique

Principe actif	Type de molécule	Compagnie	Indication
Aducanumab-avwa	Anticorps monoclonal	Biogen Inc.	Maladie d'Alzheimer
Asparaginase erwinia chrysanthemi (recombinant)-rywn	Enzyme	Jazz Pharmaceuticals	Leucémie aiguë et lymphome lymphoblastiques
Anifrolumab-fnia	Anticorps monoclonal	AstraZeneca AB	Lupus érythémateux disséminé

L'**aducanumab-avwa** réduit les plaques amyloïdes dans le cerveau, mais il n'y a pas de preuve qu'il améliore les signes cliniques de la maladie d'Alzheimer, comme les capacités

cognitives. L'entreprise doit prouver avant 2030 que le médicament peut améliorer la cognition, faute de quoi il sera retiré (règle appliquée par la FDA aux médicaments



ayant reçu le label « accelerated approval » lors de leur homologation).

L'**asparaginase erwinia chrysanthemi** est une enzyme produite par *Erwinia chrysanthemi*; elle est spécifique de l'asparagine et est utilisée comme agent anticancéreux. Elle agit en épuisant les réserves d'asparagine, amino-acide

impliqué dans la synthèse de l'ADN et la survie cellulaire des cellules malignes. Elle est prescrite aux patients adultes et pédiatriques allergiques à l'asparaginase dérivée d'*E. coli*.

<sup>(1)</sup>Drugbank est une banque de données sur les principes actifs accessible sur Internet : D.S. Wishart et al., DrugBank 5.0: a major update to the DrugBank database for 2018, *Nucleic Acids Res.*, 2018, 46, p. D1074-D1082, <https://doi.org/10.1093/nar/gkx1037>

## Nouvelles substances actives phytopharmaceutiques

### Retraits

Les *Bulletins* des mois de juin et juillet de l'ANSES font état du retrait de cent quatre spécialités professionnelles : quatre-vingt-quinze sont des fongicides, six sont des herbicides à base de bénomaxole associé au S-métolachlore, métamitron, bentazone, métazachlore, glyphosate (sel d'isopropylammonium), trois des insecticides à base de cyperméthrine, diflubenzuron et imidaclopride. Trois fongicides retirés sont à base de soufre, pyriméthanil et dazomet ; tous les autres (92/95) contenaient du mancozèbe, seul ou associé au diméthomorphe, zoxamide, fosétyl, cymoxanil, mandipropamide, benthialcarbe, cuivre, glyphosate (sel d'isopropylammonium), flutolanil, valifénalate, amisulbrom, amétoctradine, ou béalaxyl-M.

### Nouvelles autorisations

De nouvelles autorisations sont accordées pour **usage professionnel** à : un régulateur de croissance fongicide à base de chlorure de mépiquat associé à la pyraclostrobine et à la prohexadione-calcium, en suspo-émulsion pour grandes cultures ; quatre herbicides aussi pour grandes cultures à base de métazachlore associé au quinmérac en suspension concentrée ou à la clomazone (avec ou sans napropamide) en suspension de capsules ; un adjuvant de bouillie fongicide ou régulateur de croissance à base de sulfate d'ammonium sous forme de granulés hydrosolubles pour cultures porte-graines, tropicales, plantes à parfum, aromatiques, médicinales et condimentaires ; un fongicide à base de cyazofamide en suspension concentrée pour cultures légumières ; un adjuvant de bouillie herbicide ou régulateur de croissance à base de sulfate d'ammonium associé à des esters méthyliques d'acides gras C16-C18 et C18 insaturés sous forme d'émulsion de type huileux pour cultures porte-graines, tropicales, plantes à parfum, aromatiques, médicinales et condimentaires ; un insecticide à base de téfluthrine en suspension de capsules pour grandes cultures et cultures légumières ; un insecticide à base de deltaméthrine sous forme de piège en arboriculture ; un insecticide à base d'esfenvalérate sous forme de piège pour arboriculture et viticulture ; un fongicide à base d'azoxystrobine en suspension concentrée pour grandes cultures, cultures légumières et ornementales, cultures porte-graines, tropicales, plantes à parfum, aromatiques, médicinales et condimentaires ; un fongicide à base de cyazofamide en suspension concentrée pour cultures légumières ; un fongicide à base de prothioconazole associé au fenpicoxamide, en concentré émulsionnable pour grandes cultures ; un herbicide à base d'aminopyralide associée au piclorame et au métazachlore en suspension concentrée pour grandes cultures ; un insecticide acaricide à base de sels de potassium d'acides gras de C7 à C18 et C18 insaturé sous forme de concentré soluble

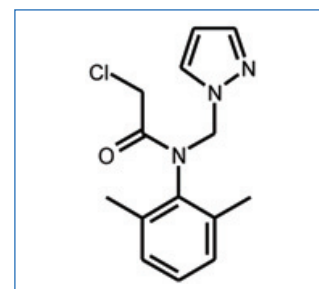
pour cultures légumières et ornementales et cultures porte-graines, tropicales, plantes à parfum, aromatiques, médicinales et condimentaires ; un régulateur de croissance à base de décan-1-ol sous forme de concentré émulsionnable pour grandes cultures ; un stimulateur de défenses naturelles en suspension concentrée pour viticulture ; trois fongicides en concentré soluble pour arboriculture respectivement à base d'acide phosphoreux, ou de phosphonates de potassium pour deux d'entre eux ; un fongicide régulateur de croissance à base de metconazole associé au chlorure de mépiquat sous forme de concentré soluble pour grandes cultures ; un herbicide à base de mésotrione en suspension concentrée pour grandes cultures.

À ceux-là s'ajoutent deux autorisations pour **usages amateurs** : un acaricide fongicide à base de soufre sous forme de granulés dispersables pour toutes cultures ; un herbicide-engrais à base de sulfate de fer(II) monohydrate, sous forme de granulés pour zones non agricoles.

### Renouvellements et extensions d'usage

Les AMM de huit herbicides professionnels à base de mésotrione, métazachlore, metsulfuron-méthyl, fluroxypyr associé au triclopyr, quinmérac associé au métazachlore, propoxycarbazone sodium sont renouvelées après réapprobation d'une substance active. Les autorisations d'un adjuvant pour bouillie herbicide à base de diméthylpolysiloxane, d'un herbicide à base de sels d'ammoniums et de potassium de MCPA, et de deux fongicides à base de fludioxonil seul ou associé au difénoconazole sont renouvelées après examen décennal.

Présent dans une quarantaine de préparations commerciales herbicides (cultures de colza), le **métazachlore** (famille des chloroacétamides) fait l'objet de nouvelles mesures de gestion afin de limiter les risques de transfert de certains métabolites vers les eaux souterraines.



Le métazachlore (2-chloro-N-(pyrazol-1-ylméthyle)acét-2',6'-xylylide ou 2-chloro-N-(2,6-diméthylphényl)-N-(1H-pyrazol-1-ylméthyle)acétamide). CAS n° 67129-08-02.

Cette rubrique est coordonnée et alimentée par **Josette FOURNIER**, qui a présidé de 2007 à 2010 le comité d'orientation et de prospective scientifique de l'Observatoire des résidus de pesticides (ORP) ([josette.fournier4@orange.fr](mailto:josette.fournier4@orange.fr)), et **Jean-Marc PARIS**, ancien directeur de recherche pharmaceutique dans le groupe Rhône-Poulenc et ancien directeur scientifique de la chimie organique et biotechnologies de Rhodia ([jeanmarc.paris@free.fr](mailto:jeanmarc.paris@free.fr)).

## Concilier durabilité et création de valeur

### La méthodologie SeeVal™ de Solvay

**Résumé** Si la durabilité est un objectif prioritaire dans le développement de nouveaux produits, procédés ou services, il est impératif de s'assurer que les choix technologiques relatifs aux différentes étapes sont pertinents et peuvent donc être considérés comme créateurs de valeur environnementale. Solvay a ainsi développé une méthodologie intégrée, appelée SeeVal™, permettant dès la phase de conception d'évaluer simultanément la création de valeur économique et environnementale d'une nouvelle proposition. Il s'agit donc d'un nouvel outil d'écoconception qui peut également être utilisé pour définir la meilleure option avec l'ensemble des acteurs de la chaîne de valeur.

**Mots-clés** Durabilité, cycle de vie, évaluation intégrée, valeur environnementale, écoconception.

**Abstract** **Reconciling sustainability and value creation**

While sustainability is a priority objective in the development of new products, processes or services, it is imperative to ensure that the technological choices relating to the various stages are relevant and can therefore be considered as creators of environmental value. Solvay has thus developed an integrated methodology, called SeeVal™, which allows from the design phase to simultaneously assess the creation of economic and environmental value of a new proposal. It is therefore a new eco-design tool that can also be used to define the best option with all the players in the value chain.

**Keywords** Sustainability, life cycle, integrated assessment, environmental value, eco-design.

### La durabilité : contrainte ou opportunité ?

La prise en compte de la durabilité dans le développement de nouveaux produits et procédés est devenue incontournable pour l'industrie chimique. L'évolution de la réglementation, les attentes du marché et plus récemment la prise de conscience de l'urgence climatique rendent nécessaire l'intégration de critères environnementaux et sociétaux dans le processus d'innovation.

Par ailleurs, si l'industrie chimique est par nature à l'origine d'impacts environnementaux dans son processus de production et « fait partie du problème », elle est aussi la plus à même de proposer des produits et des services qui vont contribuer à réduire les impacts générés dans la phase d'utilisation [1] et ainsi « faire partie de la solution ». Enfin, elle apparaît comme un acteur majeur de la transformation de l'économie, permettant de passer d'un modèle linéaire à un modèle circulaire [2], en contribuant à réduire les déchets, augmenter la durée de vie des matériaux et régénérer les milieux naturels[3].

Cependant, la durabilité est souvent vécue par les acteurs industriels comme une contrainte et en conflit avec les intérêts économiques. Cette perception retarde la mise sur le marché d'alternatives techniquement abouties à des produits existants et plus durables, et inhibe la recherche et le développement de nouvelles solutions.

Les raisons à cela sont connues : bien que plus de durabilité implique en principe moins de matières premières vierges et moins d'énergie consommées – ce qui devrait réduire les coûts de production –, l'innovation durable est confrontée à plusieurs difficultés :

- Les procédés existants, qu'il s'agisse de la production de produits existants ou de la combinaison d'opérations unitaires pour la production de nouveaux produits, sont souvent déjà très optimisés. Ceci se traduit par des investissements maîtrisés et des consommations de matières et d'énergie contenues.

- Au contraire, des procédés visant à utiliser des matières recyclées (issues de biens de consommation usagés) ou renouvelables (provenant de la biomasse) et de l'énergie elle-même renouvelable (électricité renouvelable ou biogaz) seront plus complexes (nombre d'étapes), nécessiteront des équipements spécifiques peu ou pas disponibles auprès des équipementiers, et seront donc plus capitalistiques.

Enfin, le coût des matières et de l'énergie dites circulaires (recyclées ou renouvelables) demeure aujourd'hui plus élevé que celui de leurs homologues fossiles. Par ailleurs, les chaînes logistiques permettant d'en assurer une fourniture fiable et sécurisée (collecte des matières usagées pour le recyclage, bioraffineries pour le renouvelable) restent encore souvent à développer.

### Privilégier une approche globale

Afin de promouvoir la durabilité d'un nouveau produit (ou matériau ou service), il apparaît donc nécessaire de mesurer et de valoriser la diminution des impacts environnementaux qu'il génère par rapport à une solution existante, et ce dès la phase de conception et pour les différentes phases de son cycle de vie (production, utilisation, réutilisation, recyclage, biodégradation...) afin de les associer à la valeur du produit obtenu.

Dans les faits, cette notion de création de valeur associée à une diminution des impacts environnementaux existe déjà. Ainsi, dans la chaîne de valeur de l'industrie automobile, relativement aux émissions de CO<sub>2</sub> (figure 1) :

- les producteurs des différents composants de l'automobile et le constructeur lui-même peuvent être pénalisés relativement à la phase de production par une taxe carbone, ou au contraire bénéficier de crédits carbone qu'ils peuvent vendre sur le marché ;

- à l'autre bout de la chaîne, le consommateur pourra lui aussi être taxé, ou au contraire bénéficier d'une aide

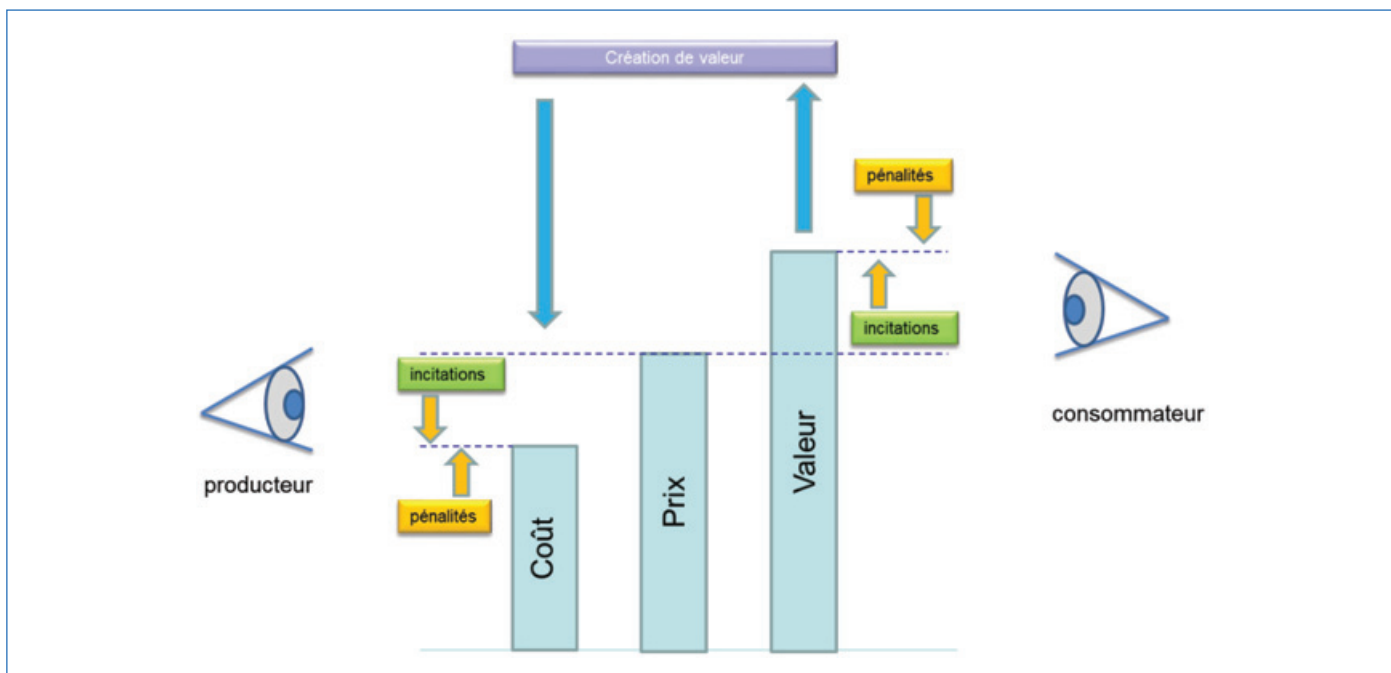


Figure 1 - Les incitations et les pénalités réglementaires influent sur la création de valeur.



Figure 2 - Les différentes étapes du cycle de vie d'un produit durable ou consommable.

gouvernementale selon le niveau d'émission de CO<sub>2</sub> pendant la phase d'utilisation

Mais au-delà de cet exemple, peut-on imaginer d'évaluer la valeur environnementale créée ou perdue par un produit, comparativement à une solution existante, lors des différentes phases de son cycle de vie ?

Pour ce faire, il est important de définir l'unité fonctionnelle qui va permettre d'effectuer cette étude comparative : il s'agit de la quantité de produit utilisée pour fournir un service donné. À titre d'exemple, on considère qu'une pièce de dimensions données en matériau composite pèse 40 % de moins que son équivalent en aluminium et 70 % de moins que son équivalent en acier ; 1 kg de composite devra donc être comparé à 1,4 kg d'aluminium et 1,7 kg d'acier.

On s'attachera également à définir l'ensemble des étapes du cycle de vie (figure 2) :

- la fabrication, incluant la production des matières premières, la génération d'énergie nécessaire et les sous-produits et déchets éventuels ;

- la consommation (si le produit est décomposé pendant son usage) ou l'utilisation (si le matériau est récupérable) : plusieurs sous-étapes sont à considérer, incluant le ou les clients industriels et le consommateur final ;

- la dissémination, pour laquelle la biodégradabilité devra être étudiée, ou le recyclage, pour lequel différentes options seront envisagées (physique ou chimique et pour quelles applications).

Si la première étape est généralement bien connue, c'est souvent moins le cas pour les deux autres pour lesquelles on devra, soit s'appuyer sur des données génériques provenant d'études de marché, soit nouer des partenariats avec d'autres acteurs de la chaîne de valeur pour disposer de données représentatives.

Il s'agit alors d'évaluer conjointement les performances économiques et environnementales du futur produit par rapport à une solution existante dans le cadre d'une même unité fonctionnelle. Cette approche comparative est clé car s'il est parfois difficile d'accéder à des valeurs absolues pour

certaines paramètres (rendements, prix), il est souvent plus facile de raisonner de manière relative.

## Monétisation des impacts

L'évaluation économique va concerner les coûts de fabrication et d'utilisation. Pour l'étape de fabrication, il est possible de s'appuyer sur des approches bien connues de type « full manufacturing cost (FMC) » [4] qui comptabilisent l'ensemble des coûts de mise en œuvre d'une étape : consommations de réactifs et d'énergie, main d'œuvre et entretien, amortissement du capital. Un intérêt particulier sera porté à la partie « variable costs » qui recouvre l'ensemble des coûts liés à la consommation de matières premières et d'utilités (vapeur, électricité, eau de refroidissement, etc.). Pour les étapes de consommation/utilisation et dissémination/recyclage, il sera nécessaire de s'appuyer comme indiqué précédemment sur des données génériques ou spécifiques selon la filière considérée.

Les étapes de l'évaluation économique sont :

- l'établissement d'un bilan matière et énergie représentatif de l'étape considérée ;
- la description d'un schéma procédé permettant de visualiser les flux d'entrée et de sortie ;
- la recherche des prix unitaires relatifs à chaque flux : ces prix peuvent être disponibles en interne, ou dans des bases commerciales ou par consultation de fournisseurs ;
- le calcul du coût de chaque flux et leur compilation, incluant des crédits éventuels liés à la valorisation de sous-produits.

En ce qui concerne l'évaluation environnementale, l'utilisation de la méthodologie analyse de cycle de vie (ACV) sera privilégiée. Nous ne détaillons pas ici les principes et la mise en œuvre de cette approche [5] mais rappelons simplement qu'elle permet d'évaluer les impacts générés au cours des différentes étapes de la vie d'un produit (ou service), ceux-ci étant exprimés selon différentes catégories qui peuvent elles-mêmes être regroupées en dommages.

L'approche retenue par Solvay (figure 3) s'appuie sur la collecte de données représentatives du produit selon l'étape considérée, de données d'inventaires et de méthodes de calcul proposées par des fournisseurs reconnus.

Les étapes de l'évaluation environnementale sont :

- l'établissement d'un bilan matière et énergie représentatif de l'étape considérée ;
- la description d'un schéma procédé permettant de visualiser les flux d'entrée et de sortie ;
- la recherche des données d'inventaire relatives à chaque flux : ces données peuvent être disponibles soit dans des bases commerciales, soit auprès de fournisseurs ou doivent être calculées en interne à partir de la littérature ;
- les impacts de chaque flux, déterminés grâce à un logiciel spécifique qui utilise une méthode de caractérisation définie au préalable et qui va fournir la liste d'impacts caractéristiques du produit.

On dispose donc désormais de deux types d'informations relatives à notre futur produit :

- une évaluation économique du coût de fabrication (dans nos usines), d'utilisation (par nos clients) et de fin de vie du produit ;
- une évaluation environnementale des impacts générés lors des mêmes étapes.

Or il se trouve que ces deux résultats sont obtenus à partir du même jeu de données, à savoir les flux d'entrée et de sortie de matière et d'énergie (figure 4). Concrètement, l'évaluation économique (FMC) et l'évaluation environnementale (LCA) reposent donc toutes les deux sur l'obtention des mêmes données que sont les quantités unitaires utilisées et générées lors des différentes étapes (figure 5).

Dans le cas de l'évaluation économique, des coûts unitaires sont affectés à ces données, alors que dans le cas de l'évaluation environnementale, ce sont des facteurs de caractérisation qui sont affectés. Mais peut-on aller plus loin, à savoir monétiser les impacts environnementaux afin de leur donner une valeur économique ?

Chez Solvay, nous avons pu traiter cette question en nous appuyant sur notre méthodologie d'évaluation de la durabilité de notre portefeuille de produits, appelée « Sustainable portfolio management (SPM) » [6]. Cette approche, mise en place dès 2009, vise à déterminer la part du portefeuille du groupe pouvant être considérée comme faisant partie de « solutions durables ». Pour Solvay, une « solution durable » est la combinaison d'un produit dans une application qui

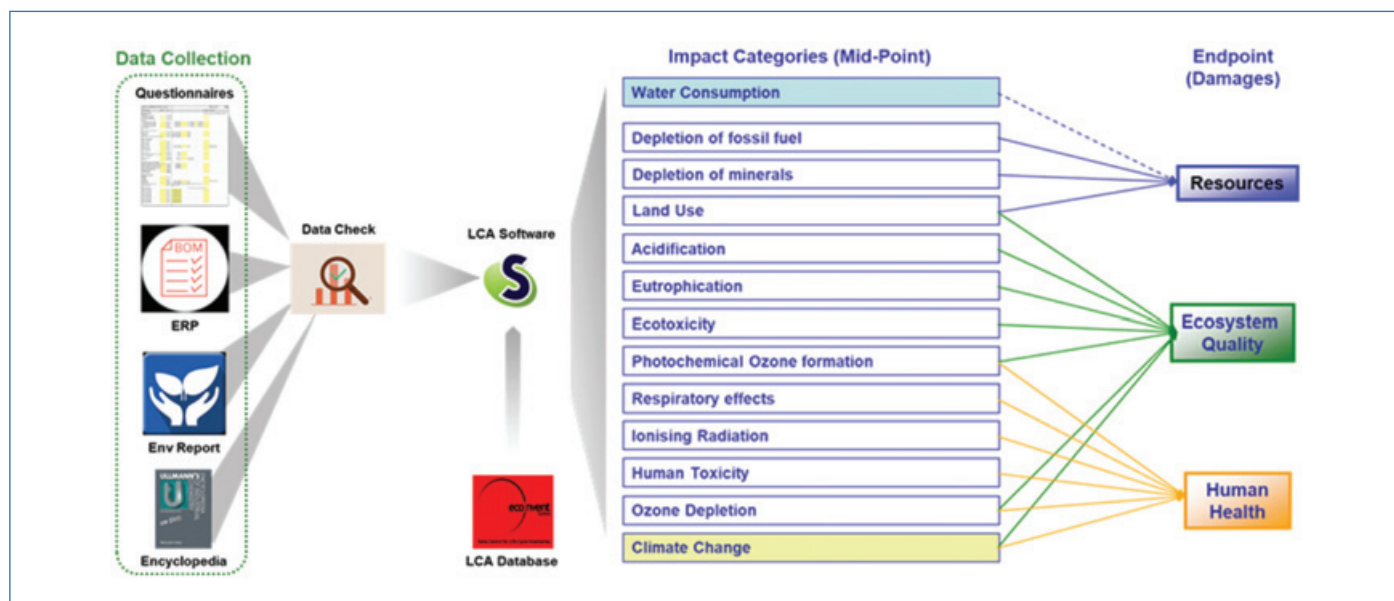


Figure 3 - Processus de réalisation d'une analyse de cycle de vie (ACV).

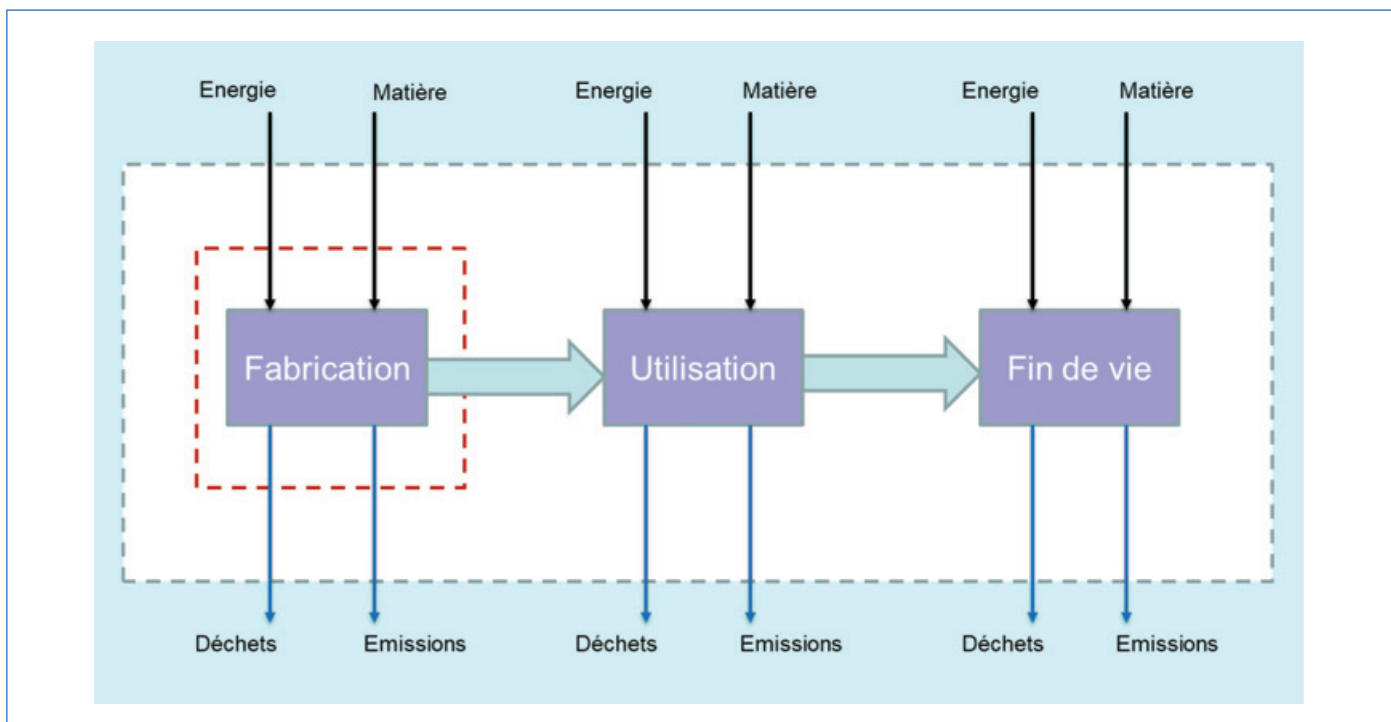


Figure 4 - Flux utilisés pour l'évaluation économique et environnementale.

### FMC

Variable Costs	Price	QPU
Raw Mat A	1 150	0.987
AA	8 500	0.003
BB	2 500	0.005
Raw Mat B	350	0.583
CC	2 800	0.008
DD	3 500	0.007
Electricity	75	0.6
Steam	25	15.4
Process water	1.0	4.2
Cooling water	0.1	221

### LCA

Inputs from technosphere: materials/fuels	Amount	Unit
Raw Mat A	0.587	kg
AA	0.00278	kg
BB	0.0049	kg
Raw Mat B	0.583	kg
CC	0.008	kg
DD	0.007	kg
Add		
Inputs from technosphere: electricity/heat	Amount	Unit
Electricity, high voltage (Europe without Switzerland)	0.6	kWh
On-site steam average E	15.4	kg
Water, completely softened, from decarbonised water	4.2	kg
Water, decarbonised, at user (RER) water production	221*0.03 = 6.63	kg

Figure 5 - Similitude des données utilisées pour LCA et FMC.

apporte au consommateur une contribution positive au plan social et environnemental, tout en limitant les impacts liés à la phase de production. Concernant ce dernier aspect, le principe retenu est de ne pas mettre sur le marché un produit dont la valeur économique pour le client serait significativement inférieure aux dommages infligés à la planète. Cette méthodologie a été développée avec l'aide de consultants reconnus et fait périodiquement l'objet d'audits par des cabinets extérieurs au groupe.

Concrètement, chacun des vingt-et-un impacts issus de l'ACV selon la méthode de caractérisation retenue est monétisé sur la base du coût de remédiation de l'impact généré ou de sa compensation. Ainsi, le coût de 1 tonne de CO<sub>2</sub> émise est fixé à 75 € en considérant les technologies actuellement disponibles de captage et de stockage. En ce qui concerne l'eau, le coût d'1 m<sup>3</sup> prélevé est fixé à 1 € en considérant le coût actuel de dessalement de l'eau de mer. Ces coûts sont périodiquement revus avec l'aide d'organismes extérieurs pour tenir compte de l'évolution des technologies et des réglementations.

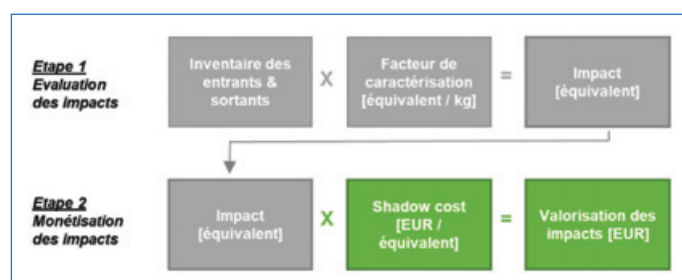


Figure 6 - Mode de calcul de la valorisation des impacts.

Ces coûts, qui sont actuellement fictifs, sont appelés « shadow costs » dans la méthodologie SPM et sont utilisés selon le schéma de la figure 6.

### Intégrer les aspects économiques, industriels et environnementaux

À partir de l'évaluation économique (FMC) et de l'évaluation environnementale (LCA) monétisée selon la méthodologie

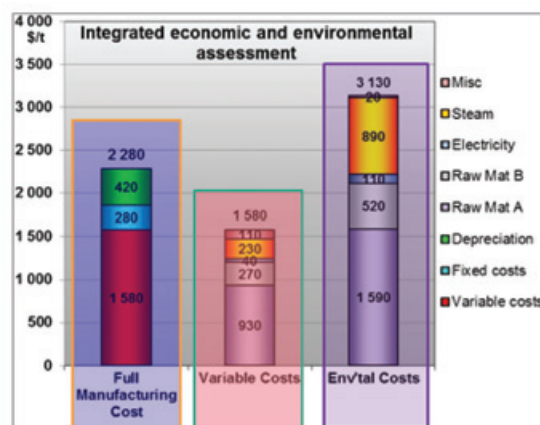


Figure 7.

SPM, un outil commun peut être défini. On dispose en effet d'une approche intégrée, utilisant les mêmes données relatives à un produit dans les différentes phases de son cycle de vie, pour déterminer simultanément un coût économique et un coût environnemental de production, d'utilisation et de fin de vie.

Cette approche, spécifiquement développée par Solvay dans ses laboratoires de recherche et associant des experts de l'évaluation économique et de l'évaluation environnementale, a été dénommée SeeVal™. Elle s'applique aux produits (ou procédés ou services) existants mais également aux projets d'innovation et propose une représentation harmonisée de l'évaluation économique et environnementale d'un produit, procédé ou service (figure 7). Elle offre de multiples avantages :

- Elle permet d'obtenir de manière simultanée les coûts économiques et les coûts environnementaux : l'utilisation de fichiers de calcul intégrant toutes les étapes permet de visualiser rapidement les conséquences d'une modification de procédé, d'un changement de matière première ou de nouvelles données économiques. La comparaison entre différentes options, et en particulier d'un futur produit avec une solution existante met en évidence la création de valeur environnementale apportée par l'innovation.

- Elle peut être utilisée dès la conception d'un nouveau produit, procédé ou service : une description sommaire des processus à étudier suffit pour mettre en place la méthode qui permet de faire évoluer le projet au fur et à mesure que des données plus précises sont disponibles. C'est ainsi un véritable outil d'écoconception utilisable de manière « agile » pour faire des arbitrages entre valeur économique et valeur environnementale.

- C'est un outil de dialogue avec les clients qui met en évidence de manière très lisible la création de valeur environnementale d'une option par rapport à une autre. De ce point de vue, l'outil peut aussi s'adapter en fonction des attentes du client et du marché correspondant : il est possible de remplacer les « shadow costs » définis par Solvay par des valeurs considérées comme étant plus représentatives des attentes du marché. Ainsi par exemple, un constructeur automobile donnera un poids plus important à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, tandis qu'un fabricant de cosmétiques sera davantage intéressé à valoriser la consommation d'eau évitée.

## Maximiser la valeur avec le client

Solvay commercialise un additif utilisé dans le procédé Bayer d'extraction de l'alumine. Dans ce procédé, la silice contenue dans la liqueur d'aluminate de sodium réagit au contact des parois d'échangeurs pour former de la sodalite, un silicate chloré de sodium et d'aluminium. Ce composé se dépose sur les parois des tubes d'échangeurs et nécessite des nettoyages fréquents afin de maintenir un coefficient d'échange élevé. La solution proposée par Solvay limite la croissance des particules de sodalite qui restent ainsi en solution et n'encrassent pas les échangeurs.

Pour le fabricant d'alumine, il est important de savoir quels avantages économiques et environnementaux l'utilisation de l'additif Solvay peut lui procurer, et ce dans différents cas de figure. En effet, selon les conditions économiques propres à chaque site industriel, il peut être plus intéressant de chercher à minimiser la consommation de vapeur, ou pour une même consommation de vapeur d'augmenter la concentration de la liqueur et donc de diminuer la consommation de soude caustique. La méthode SeeVal™ permet de répondre à ces questions.

Pour ce faire ont été calculés pour le fabricant d'alumine et comparativement à l'absence d'additif :

- le gain économique lié au coût d'énergie ou de matière évité,
- le gain environnemental lié aux impacts évités par la moindre utilisation d'énergie ou de matière.

Sur la figure 8, les gains apparaissent comme des coûts négatifs (unités monétaires arbitraires). On observe que :

- En ce qui concerne les gains économiques, la réduction de consommation de soude est plus avantageuse que la réduction de consommation de vapeur (- 1,2 vs - 0,5).
- En revanche, en ce qui concerne l'aspect environnemental, l'option réduction de consommation de vapeur est plus intéressante (- 4,7 vs - 0,9).

L'outil SeeVal™ permet ainsi de démontrer que dans tous les cas de figure, l'utilisation de l'additif Solvay est bénéfique au plan économique pour le fabricant d'alumine et au plan environnemental pour la planète. Il permet également au client de choisir l'option procédé qui lui semble la plus intéressante, compte tenu du contexte économique et réglementaire de son site ou de la communication qu'il souhaite

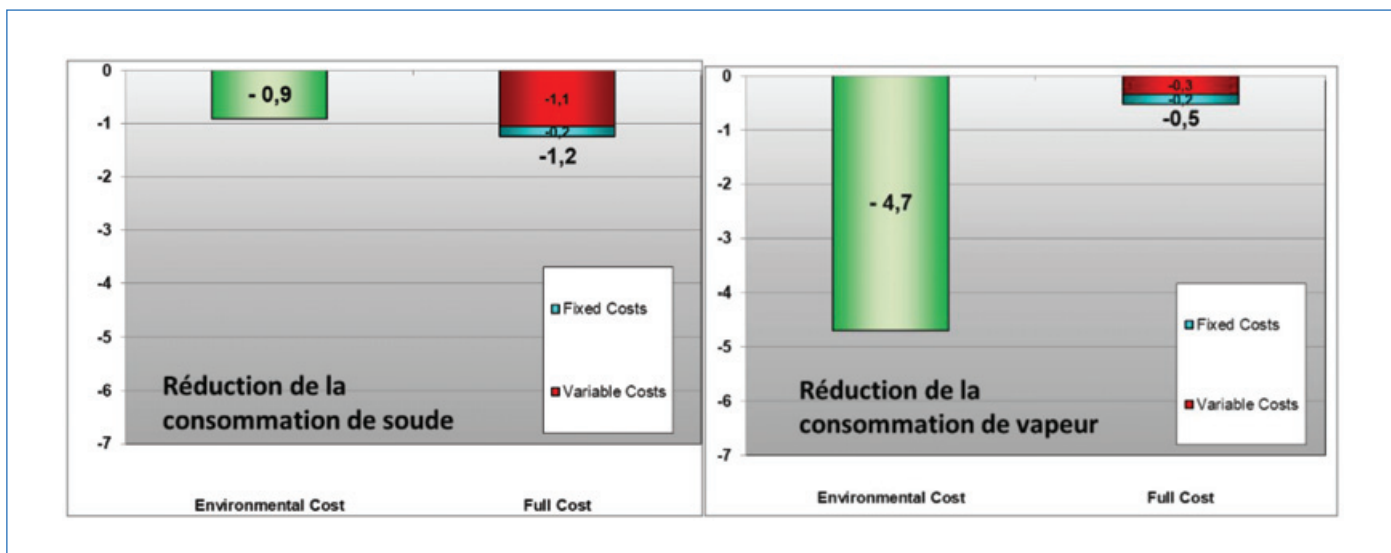


Figure 8 - Gains économiques et environnementaux selon le fonctionnement de l'unité Bayer.

faire sur son procédé. Il permet enfin d'établir un dialogue client-fournisseur constructif avec l'objectif commun de diminuer l'empreinte environnementale de la chaîne de valeur.

### Application à l'optimisation d'une voie biosourcée

Solvay cherche à augmenter la part de matières premières biosourcées dans son approvisionnement, dans le cadre de son programme One Planet de développement durable. L'ambition du groupe est ainsi de doubler à l'horizon 2030 la part de ses ventes liées à des matières recyclées ou renouvelables ou à de l'énergie renouvelable.

On observe par ailleurs une forte demande des consommateurs en faveur de produits d'origine plus naturelle. C'est particulièrement le cas pour les produits d'hygiène pour lesquels les grands industriels du secteur ont tous des objectifs d'augmenter la part de produits biosourcés et biodégradables et de diminuer l'empreinte carbone de leurs produits.

Voyons comment dans ce contexte la méthode SeeVal™ a été utilisée pour développer un tensio-actif biosourcé.

Comme indiqué précédemment, il est important dans un premier temps de définir une référence à laquelle se comparer et l'unité fonctionnelle qu'on va considérer. Comme il s'agit ici de substituer une matière première biosourcée à une matière première fossile pour la fabrication de la même molécule, on va considérer 1 kg de tensio-actif pétrosourcé comme unité fonctionnelle de référence, et se concentrer sur l'étape de fabrication du produit sachant que l'utilisation et la fin de vie sont identiques, quel que soit le produit utilisé. Notons cependant que l'impact de l'utilisation des tensio-actifs, et en particulier leur biodégradabilité dans les conditions de traitement des eaux usées domestiques, fait l'objet de travaux spécifiques qui ne sont pas décrits ici.

Les travaux de recherche pour la mise au point de ce tensio-actif ont donné lieu à une première proposition qui a été évaluée par la méthode SeeVal™. Cette première itération conduit à un produit biosourcé dont le coût économique est sensiblement plus élevé que celui du produit pétrosourcé (figure 9). Si l'empreinte carbone (CO<sub>2</sub> éq) est significativement réduite, l'ensemble du coût environnemental n'est que peu amélioré. On observe une création de

valeur environnementale plus faible que le coût économique consenti.

Il est alors possible d'identifier les éléments du coût environnemental sur lesquels doivent porter des recherches complémentaires et tester différentes options expérimentales permettant de réduire les impacts correspondants. Une proposition optimisée est obtenue, qui sera à nouveau comparée à l'option de référence pétrosourcée.

Pour la seconde itération (figure 10), il est observé que l'empreinte carbone est encore réduite ainsi que le coût économique, même s'il demeure supérieur à celui de la référence pétrosourcée. En revanche, le coût environnemental est, lui, significativement réduit, conduisant à une création de valeur environnementale supérieure au coût économique consenti.

En permettant de sélectionner les impacts environnementaux à réduire pour proposer une solution économiquement attractive et créatrice de valeur environnementale, SeeVal™ apparaît comme un puissant outil d'écoconception au service d'une innovation tournée vers la durabilité des procédés, tout en répondant aux attentes du marché.

### Promouvoir la durabilité par la création de valeur

Si la durabilité est un objectif prioritaire dans le développement de nouveaux produits, procédés ou services, il est impératif de s'assurer que les choix technologiques relatifs aux différentes étapes sont pertinents et peuvent donc être considérés comme créateurs de valeur environnementale.

Cette approche est d'autant plus importante que les options privilégiant la réduction des impacts conduisent souvent à des surcoûts économiques. Les différents acteurs de la chaîne de valeur – clients industriels de l'industrie chimique (transformateurs, formulateurs, conditionneurs...) et consommateur final – seront d'autant plus incités à accepter un prix plus élevé s'ils peuvent constater qu'il est largement compensé par la valeur environnementale créée.

Aujourd'hui, Solvay, qui est à l'initiative de cette approche, souhaite la partager avec le plus grand nombre de ses clients et partenaires, et au-delà avec tous les acteurs intéressés par une démarche volontariste, pragmatique et rigoureuse en faveur de la durabilité des activités industrielles.

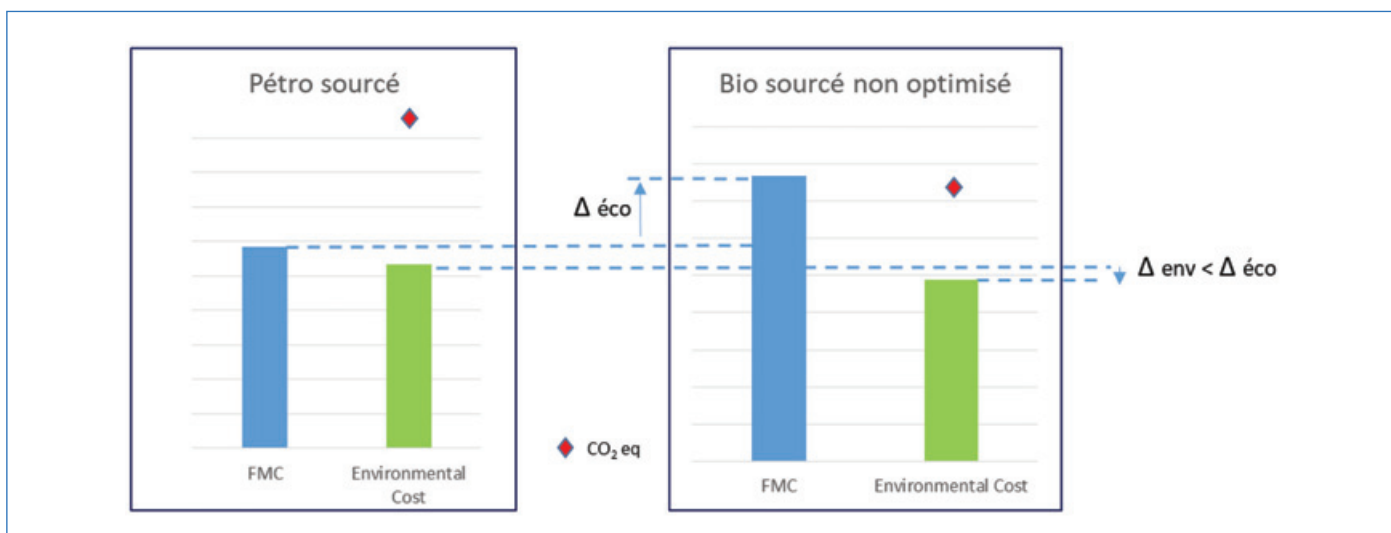


Figure 9 - Alternative biosourcée : proposition initiale.

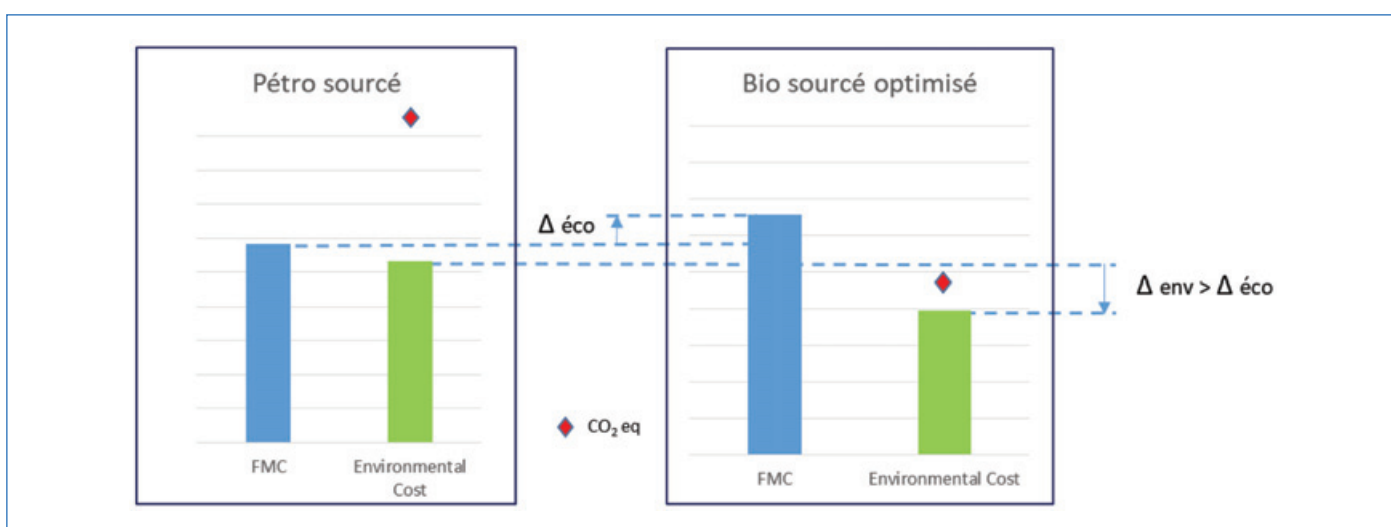


Figure 10 - Alternative biosourcée : proposition optimisée.

Cet article a été rédigé avec le support des fonctions « Sustainability » et « Research & Innovation » du groupe Solvay et plus particulièrement d'Emmanuel Marx, « Senior Scientist » au Centre de recherches de Lyon, que l'auteur remercie.

[4] A. Chauvel, *Manual of Process Economic Evaluation*, Éditions Technip, 2003.

[5] Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre, [www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:fr](http://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:fr)

[6] [www.solvay.com/en/sustainability/sustainable-portfolio-management-tool](http://www.solvay.com/en/sustainability/sustainable-portfolio-management-tool)

[1] *The essential role of chemicals*, ICCA, [https://icca-chem.org/wp-content/uploads/2020/05/ICCA-2017\\_Addressing\\_guidelines\\_WEB.pdf](https://icca-chem.org/wp-content/uploads/2020/05/ICCA-2017_Addressing_guidelines_WEB.pdf)

[2] *Winning in a circular economy*, Accenture, <https://cefic.org/app/uploads/2020/04/Accenture-Winning-In-A-Circular-Economy-Executive-Summary.pdf>

[3] What is a circular economy, Ellen MacArthur Foundation, <https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>

**Guy-Noël SAUVION,**

« Fellow Scientist », Solvay, Saint-Fons.

\* [guy-noel.sauvion@solvay.com](mailto:guy-noel.sauvion@solvay.com)





## Georges Gaudion (1885-1942), chimiste, musicien, poète, peintre et illustrateur français

**Résumé** Les œuvres de Georges Gaudion, ingénieur chimiste de la première promotion de l'Institut de Chimie de Toulouse créé en 1906 par Paul Sabatier, illustrent parfaitement ce que son maître avait exprimé à l'occasion d'un discours prononcé à l'Académie des Jeux floraux en 1907 dans lequel Sabatier veut « témoigner que la science et la poésie ne sont pas des ennemies, que loin de se repousser et de se déplaire, elles peuvent être l'objet d'un même culte ». En parallèle de ses activités de chimiste à Toulouse, Gaudion fut un artiste prolifique touchant beaucoup de domaines : la peinture, la poésie, la musique, les arts décoratifs. Sa production littéraire, musicale, et surtout picturale, est enthousiasmante, au carrefour de multiples disciplines, entre critique et création.

**Mots-clés** Georges Gaudion, Paul Sabatier, catalyse, aquarelles, poèmes, jazz.

**Abstract** **Georges Gaudion (1885-1942), a French chemist, musician, poet, painter and illustrator**  
The works of Georges Gaudion, chemical engineer from the first promotion of the Toulouse Chemistry Institute created in 1906 by Paul Sabatier, perfectly illustrate what his master had expressed during a speech given at the Academy of Floral Games in 1907 in which Sabatier wants "to testify that science and poetry are not enemies, that far from repelling and displeasing each other, they can be the object of the same cult". In parallel with his activities as a chemist in Toulouse, Gaudion was a prolific artist touching many fields: painting, poetry, music, decorative arts. His literary, musical and above all pictorial production is exciting, at the crossroads of multiple disciplines, between criticism and creation.

**Keywords** Georges Gaudion, Paul Sabatier, catalysis, watercolors, poems, jazz.

Georges Gaudion est né à Toulouse le 22 novembre 1885 [1]. Ses parents, issus de la bourgeoisie, lui offrirent une éducation confortable. Mais le petit garçon est chétif et souffreteux ; il est veillé, couvé et, bien entendu, il est terriblement gâté... Assez vite, il ressent un profond attrait pour les livres qui comblent la solitude de sa chambre d'enfant unique et malade.

À l'adolescence, Georges s'affirme comme un être passionné et est déjà, à 17 ans, très polyvalent. S'il s'enthousiasme encore pour la photographie, qui avait connu des grandes heures à Toulouse, il est aussi féru de poésie et de musique. Il évolue dans une ère qui nous apparaît comme un tournant sans précédent sur le plan des sciences et leurs applications : l'électricité, les automobiles, le cinématographe... Georges suit avec engouement les nouveautés techniques, mais aussi les différents courants artistiques du cinéma ou de la photographie.

En 1904, il intègre la Faculté de droit de Toulouse, envisageant, sûrement sur les conseils de son père, une carrière d'avocat. Cependant, ses études ne vont pas assouvir sa soif de connaissance et ne lui laisseront que le souvenir d'une rencontre majeure dans sa vie, celle qu'il fit avec Touny-Lérys – alias Marcel Marchandeaudeau (1881-1976), qui fut poète.

Bref, le droit ne l'intéresse pas vraiment et il se dirige vers des études scientifiques, alors même que les sciences subissent de grands changements dans leurs enseignements. À cette époque, la personnalité marquante de Toulouse est Paul Sabatier ; natif de Carcassonne, il s'y installa en 1883. Sabatier bouleversa en profondeur l'enseignement de la chimie par la création de plusieurs instituts d'enseignements appliqués, dont l'Institut de Chimie en 1906, qui conduisait en trois ans à un diplôme d'ingénieur chimiste « ICT » [2].

Gaudion s'inscrivit dès la première rentrée, en 1906, et devint l'un des premiers diplômés ingénieur chimiste en 1909. Une de ses aquarelles représentant l'Institut de Chimie montre une foule bigarrée des savants qui l'occupent (figure 1).

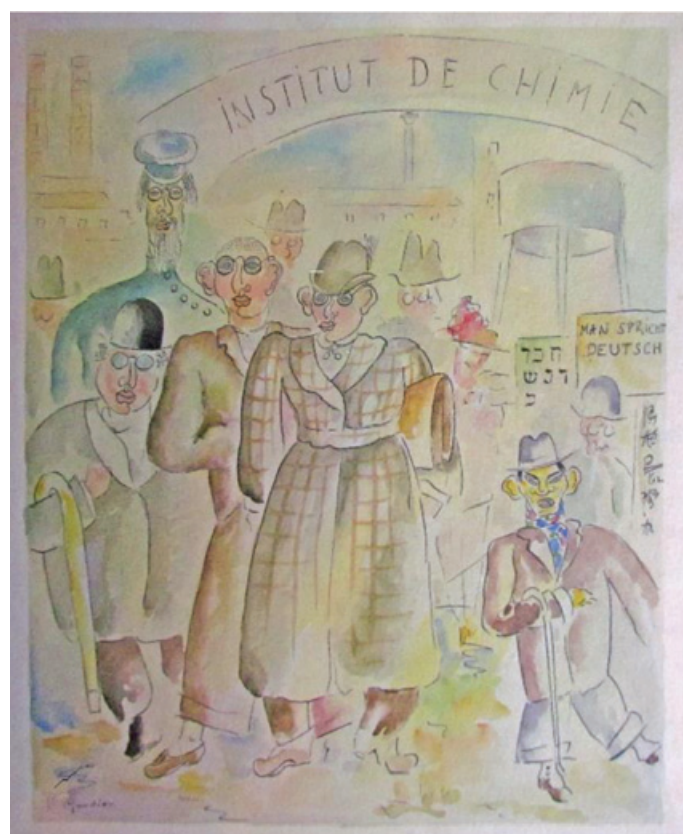


Figure 1 - L'Institut de Chimie de Toulouse vers 1930 (aquarelle et encre) - (coll. part., DR).

Des écritures allemandes et hébraïques donnent des informations sur le caractère cosmopolite de l'Institut, alors qu'on remarque des personnages asiatiques au premier plan, car à cette époque beaucoup d'étudiants venaient d'Extrême-Orient, comme en témoignent les photographies des promotions.

## Le chimiste

Les premiers travaux chimiques de Georges Gaudion ont été réalisés lors de la préparation de la thèse qu'il soutint le 11 juin 1911, qui portait pour titre : « Nouvelle méthode générale de synthèse des amines forméniques par hydrogénation catalytique des éthers nitreux », et dont la plus grande partie fut publiée en 1912 dans le tome 25 des *Annales de Chimie et de Physique* [3]. Le deuxième sujet, obligatoire à cette époque et qui consistait en une recherche bibliographique, concernait « Les travaux récents sur les effets chimiques des rayons radioactifs ».

La présentation du candidat avait été brillante et le président du jury, Paul Sabatier, le complimenta par ces mots : « *Mon cher Gaudion, vous nous êtes venu de la littérature et de la poésie... On a bien pris un chimiste pour en faire un mainteneur des Jeux Floraux... Je suis d'autant plus heureux de la voie que vous avez suivie, que l'on n'arrive aux découvertes que par l'imagination ; c'est la poésie qui vous a amené à découvrir ce que vous nous avez si bien exposé, et à réussir une opération catalytique que moi-même je vous avais déclarée impossible, dans mon cours. Je vous ai cité en témoignage, il y a quelques jours, dans la conférence que j'ai faite à Berlin, à tout ce que l'Allemagne contient de célébrités chimiques, et j'ai signalé la route nouvelle que vous venez d'ouvrir.* » Il devait confirmer cet avis l'année suivante lors du « discours Nobel » qu'il prononça à l'occasion de la remise de ce prix : « *Dès qu'elle a été décrite, cependant, notre méthode a retenu l'imagination de nombreux chercheurs tant en France qu'à l'étranger, et leurs efforts ont contribué à une extension de son utilisation. Il serait trop long d'énumérer leurs œuvres individuelles, mais je dois au moins mentionner les noms de Darzens, Brunel, Godchot, Leroux, Breteau, Willstätter, Padoa et autres, ainsi que ceux de mes élèves Gaudion et Mignonac.* »

Mais quelle était donc cette « opération catalytique » que Gaudion avait réussie alors que Sabatier l'estimait « impossible » ? La réponse est indiquée totalement dans le titre de la thèse : l'hydrogénation des éthers nitreux (nitrites d'alkyles) avait permis d'accéder aux alkyl amines correspondantes. Cette réaction avait fait l'objet d'un grand nombre de travaux en raison de l'intérêt synthétique qu'elle présentait, mais tous les essais mettaient en jeu la seule méthode que l'on connaissait à cette époque : l'utilisation de l'hydrogène naissant. Pour cela, certains systèmes procèdent en milieu alcalin, sodium ou amalgame de sodium au contact de l'eau ou d'un alcool, d'autres sont basés sur l'utilisation d'un milieu acide, zinc fer ou étain réagissant avec de l'acide sulfurique, chlorhydrique ou acétique dilué. En aucun cas ces techniques ne produisaient des amines, mais on isolait essentiellement l'alcool résultant de l'hydrolyse du nitrite accompagné de petites quantités d'ammoniac ou de sel d'ammonium.

Gaudion a eu l'idée d'appliquer aux nitrites d'alkyles la méthode d'hydrogénation directe en présence de métaux divisés de Sabatier et Senderens. Il a alors hydrogéné plusieurs nitrites sur le nickel et sur le cuivre et dans tous les cas il a obtenu les amines avec de bons rendements, observant cependant la formation d'amine secondaire, en quantité plus importante que l'amine primaire, accompagnées d'une très petite quantité d'amine tertiaire. Après avoir étudié et comparé les produits de la réaction dans les cas où le catalyseur est le nickel ou le cuivre, il a vérifié que les facteurs importants de l'évolution du processus étaient, dans le réacteur, la température et les vitesses d'écoulement du liquide et du gaz, pour éviter un entraînement trop rapide des vapeurs



Figure 2.

par l'hydrogène, et par suite un contact limité avec le métal catalyseur.

L'auteur s'est alors livré à une étude, originale pour l'époque, du mécanisme réactionnel. Parmi les différentes hypothèses, il a montré que celle de l'isomérisation du nitrite d'alkyle en son isomère l'hydrocarbure nitré devait être retenue, ce qu'il a vérifié à partir des résultats de Sabatier et Senderens concernant l'hydrogénation catalytique des dérivés nitrés (figure 2).

Par la suite, les travaux de recherche de Gaudion ont d'abord bénéficié des connaissances qu'il avait acquises dans le domaine des amines lors de sa thèse et déjà dans un travail préliminaire où il avait appliqué à la pipéridine la méthode de Sabatier et Mailhe pour la préparation des amines par action de l'ammoniac sur les alcools en présence d'un oxyde catalyseur. Il s'agissait cette fois de réaliser l'alkylation de la pipéridine par les alcools propylique, isoamylique et le cyclohexanol. Dirigés à 350 °C sur une colonne d'oxyde de thorium, les mélanges, molécule à molécule, de pipéridine et d'alcool, ont conduit aux pipéridines N-alkylées correspondantes [4].

Mais surtout, il eut un rôle majeur dans la démonstration de la réversibilité de l'activité catalytique telle que Sabatier l'avait prédite à partir du concept de la formation d'un composé temporaire, concept que ce dernier avait élaboré pour expliquer l'action des catalyseurs. Pour lui, le nickel et les autres métaux actifs (cuivre, cobalt, fer, platine) devaient non seulement être capables de fixer l'hydrogène libre, mais aussi ils devaient pouvoir prendre l'hydrogène de substances susceptibles de l'abandonner et, en conséquence, ils devaient être des catalyseurs de déshydrogénation. C'est en fait le cas : à une température comprise entre 250 et 300 °C, le cuivre en poudre provoque très commodément la déshydrogénation des alcools primaires en aldéhydes et des alcools secondaires en cétones, méthode pratique très utile pour effectuer cette transformation [5].

Ainsi, le concept d'un composé temporaire a incité Sabatier à utiliser des métaux finement divisés, d'abord comme catalyseurs d'hydrogénation, puis comme catalyseurs de déshydrogénation. En ce qui le concerne, Gaudion a réussi à former directement des nitriles, à partir des amines primaires, sur un catalyseur hydratant-déshydratant, comme la thiorine, ou encore à 300-350 °C sur du nickel réduit [6]. Avec ce même nickel, dans les mêmes conditions, il a pu réaliser des réactions de dédoublement en permettant le retour des méthyl et éthyl anilines à l'aniline elle-même [7].

Abandonnant la chimie des amines pour aborder de nouveaux domaines, notre chimiste, travaillant en collaboration avec Alphonse Mailhe, un autre élève de Sabatier, étudia une réaction d'intérêt pratique important qui avait fait l'objet de travaux réalisés par d'illustres savants : la décomposition thermique du pinène [8]. Persuadés que l'intervention de catalyseurs déshydrogénants devait permettre d'abaisser la température nécessaire au bon déroulement du processus, modifiant ainsi les conditions du dédoublement, ils étudièrent

dans un premier temps l'action des métaux divisés sur les vapeurs de pinène, puis appliquèrent leurs résultats à d'autres composés.

Comme ils l'avaient prévu, les métaux divisés – cuivre, nickel, cobalt et fer – permettent d'opérer à températures plus basses ; le cuivre, dans ces conditions, étant le meilleur catalyseur accroissant d'une manière très notable la proportion des hydrocarbures aromatiques formés par le dédoublement pyrogéné du pinène.

Ce dernier résultat incita les chercheurs à réaliser des essais industriels à partir de plusieurs tonnes d'essence de térébenthine traitée à 600-630 °C en présence de cuivre, ce qui leur permit de récupérer avec un rendement supérieur à 20 % divers hydrocarbures aromatiques. L'intérêt industriel ne devait pas échapper à Sabatier qui déposa un pli cacheté, sans doute avec l'intention de protéger cette découverte ! Les observations recueillies au cours de ces premiers travaux permirent de modifier légèrement les conditions expérimentales, et c'est en procédant à des déshydrogénations catalysées par le nickel en présence d'hydrogène que furent obtenus les résultats suivants :

- le pinène conduisit à des hydrocarbures benzéniques (cumène, cymène) accompagnés d'hydrocarbures saturés ;
- le limonène et le camphre produisirent du cumène et du cymène ;
- le cyclohexanol fut déshydrogéné en phénol ;
- la pulégone en crésol et thymol ;
- et l'essence de térébenthine conduisit à la formation d'une quantité importante d'un mélange de benzène, toluène et xylènes.

Un nouveau domaine intéressa aussi Gaudion : celui des relations entre les catalyseurs métalliques et les alcools. Son hypothèse de départ était que les oxydes anhydres, classés comme catalyseurs de déshydratation, devaient permettre la réalisation, dans de bonnes conditions, des réactions de crotonisation des aldéhydes issus de la déshydrogénation des alcools. Il confirma cette hypothèse en travaillant à partir d'alcool éthylique circulant dans un tube comprenant deux parties séparées par un tampon de verre :

- la première partie comportait une couche de cuivre réduit permettant, par un chauffage à 300 °C, la déshydrogénation de l'éthanol en éthanal ;
- la seconde était remplie d'un oxyde catalyseur (oxyde de thorium, de titane ou d'uranium) qui, chauffé à 360 °C, devait réaliser la crotonisation de l'éthanal.

Il put vérifier ainsi la formation de l'aldéhyde crotonique, mais les faibles rendements obtenus l'incitèrent à travailler directement sur l'éthanol en présence d'oxyde d'uranium seulement, à 360-400 °C. Les rendements médiocres obtenus furent améliorés en partant du paraldéhyde et en utilisant un oxyde comme catalyseur à 360 °C, permettant d'isoler essentiellement le crotonaldéhyde et l'hexadiénal dont l'hydrogénation a conduit au butanol et à l'hexanol normaux [9].

L'étude suivante avait pour objectif d'étudier le dédoublement de la glycérine en présence de divers catalyseurs [10] : alumine (catalyseur de déshydratation), le cuivre (déshydrogénant) et l'oxyde d'uranium  $\text{UO}_2$  (catalyseur mixte) :

- l'alumine à 360 °C conduit, comme prévu, à la formation d'acroléine et à des produits de condensation ;
- le cuivre seul à 330 °C donne une suite de réactions débutant par la déshydrogénation de la glycérine en une grande quantité d'acroléine, accompagnée par de l'éthanol et du propanal, tandis que cette même transformation suivie d'une

hydrogénation génère plusieurs alcools : éthanol, propanol et alcools à 5 et 6 atomes de carbone ;

- l'oxyde d'uranium provoque surtout une réaction de déshydrogénation avec formation d'acroléine, ses produits de condensation et ceux résultant de la perte d'oxyde de carbone et de réactions successives, l'éthanol et l'éthanal.

Les travaux chimiques de Gaudion, dont l'essentiel a été présenté ci-dessus, témoignent de ses excellentes qualités de chimiste. Ces qualités, il en faisait également profiter ses élèves de l'Institut de Chimie de Toulouse où il avait été affecté dans le cadre de ses fonctions d'enseignant. C'est comme assistant à la Faculté des sciences, puis chef de travaux pratiques, qu'il exerçait en 3<sup>e</sup> année des études d'ingénieur chimiste de l'ICT.

Ses élèves appréciaient beaucoup ses démonstrations et ses commentaires, montrant la grande culture scientifique qu'il avait acquise au cours de sa carrière. Les responsables de la Faculté, doyen en tête, savaient reconnaître ses mérites et le lui témoignèrent en le proposant comme officier d'Académie, distinction qui lui fut décernée en 1930, et officier de l'Instruction publique en 1937. Enfin, rappelons qu'il fut l'un des deux élèves, avec Georges Mignonac, que Paul Sabatier a cité le 11 décembre 1912 dans le discours qu'il prononça à l'occasion de la cérémonie de réception du prix Nobel de chimie.

Mais Gaudion fut aussi un artiste prolifique – adoptant George (sans s) comme prénom d'artiste –, faisant côtoyer les arts et la science, touchant beaucoup de domaines – peinture, poésie, musique et arts décoratifs –, ayant à cœur de mener à bien toutes ces disciplines dans sa vie. Sa production artistique est enthousiasmante, au carrefour de multiples disciplines, entre critique et création.

### Des dons précoces de musicien

Ayant appris le piano très jeune, Gaudion ne se contente plus très longtemps de jouer les œuvres des autres et, dès l'âge de 17 ans, de 1903 à 1910, il compose des préludes et des mélodies. Cependant, la production musicale qui l'intrigue le plus est celle qui s'apparente aux débuts du jazz. Dès 1909, il écrit des « ragtimes », alors que l'intrusion de ce genre musical dans le paysage français durant les années précédant la guerre de 1914 reste timide. Ceci ajoute de la valeur à sa démarche car seuls quelques artistes français, qui ont parfois eu l'occasion de voyager outre-Atlantique, s'en font l'écho. Gaudion est l'un des premiers Français à composer du jazz.

Créés en 1909, édités en 1910, il composa quelques danses comme *Nicaragua*, *Champagne-cocktail*, et un « cake-walk », *Toronto City*. La même année 1910, une édition de ses œuvres, perforée pour piano mécanique, est réalisée aux États-Unis et il écrit à un ami : « *Ma musique a un succès fou à l'heure actuelle en Amérique. Les éditeurs se la disputent et les mélomanes se l'arrachent.* »

Le thème du jazz se décline dans l'œuvre peinte de Gaudion : nous y retrouvons les musiciens noirs, les clubs où se joue ce style de musique, les danseurs, les instruments de musique, et notamment le banjo (*figure 3*).

Ces talents de compositeur se doublent aussi d'un talent d'analyste : il crée mais il analyse aussi la création, comme en témoigne le traité qu'il écrivit sur *L'esthétique et la technologie musicale* qui est une réflexion sur la portée sociologique de l'art musical et l'évolution de l'École moderne. Quelques-unes de ses œuvres ont été jouées au Théâtre Impérial de



Figure 3 - *Lampes à arc*, pour les *Poèmes* de Paul Morand, 1926, Éditions Richard. Bibliothèque d'Étude et du Patrimoine (DR).

Compiègne, en février 1993, avec Emile Naoumoff. En 2004, un récital de piano lui rendait hommage à Toulouse.

### Création de la revue *Poésie* et production littéraire

Avec Touny-Lérys (alias Marcel Marchandeu), rencontré sur les bancs de la Faculté de droit, ils vont créer ensemble à la rentrée 1904 une revue originale qui s'inscrit à cette époque dans un vaste mouvement national ; on voit en effet dans beaucoup de villes de province émerger des revues qui se consacrent à la poésie. La revue toulousaine se démarque quelque peu en ce qu'elle fut d'une remarquable qualité. Ainsi *Poésie* contiendra non seulement des textes et des poèmes inédits de lettrés méridionaux, mais également beaucoup de grands noms de la poésie contemporaine [11]. Toutes les tendances de la poésie s'expriment ici ; les talents confirmés côtoient des plumes en devenir, de Mistral à Apollinaire, de Maeterlinck à Paul Valéry.

Parallèlement à cette activité, Gaudion publie plusieurs recueils de poèmes : *Les âmes palies*, *La maison d'enfance* (1905), *Des petits pas sur la pelouse*, *Προμύζειν* (1906), *Le jeu docile* (1907), *La prairie fauchée* (1908), ainsi que des textes en prose : *Lampes avant le seuil* (1906), et *Le baguier de la Joconde* (1908). La poésie de Gaudion est post-symboliste, renouvelant de multiples références érudites artistico-littéraires, puis naturaliste, tranchant ainsi avec les valeurs symbolistes, moins positives et très individualistes, le tout sur un terreau d'idée régionaliste et favorable à la décentralisation.

Un article dans la revue *l'Archer* consacré à Gaudion nous renseigne sur la perception par le public de *La prairie fauchée* : « *Les critiques en signalèrent la fraîcheur, la richesse de la musique intérieure, les notations en demi-teintes, la mélancolie qui se cache sous un sourire, le repliement sur soi, tandis que se couchent, comme l'herbe aux fenaisons de la vie, les rêves, les illusions de l'enfance et de l'adolescence.* »

Autre avis, celui de Francis Carco, ami de l'artiste : « *La poésie de Gaudion est de recueillement : elle m'apparaît comme une forme souple et voluptueuse, gardienne d'une terre aux lauriers vivaces, aux cyprès robustes et compacts sur l'azur... Je préfère l'ardente tendresse du Jeu docile, où le symbole, de moins en moins abstrait, revêt la forme savoureuse de l'image* » [12].

Outre cette activité de poète, Gaudion écrivit aussi des essais qui reflètent la pensée de son époque et de son milieu : *Nietzsche décadent* avec Louis Estève en 1905, *Les héritages du romantisme* avec le même collaborateur, et en 1907 *Le sport de l'esthétique et de l'indifférence*, avec Jean Fabre.

### Gaudion, peintre et illustrateur de livres (1920-1938)

L'autre grande rencontre marquante dans la vie de Gaudion est celle de Luce Boyals (1892-1946) qui devint sa femme en 1921. Artiste peintre, elle fréquenta quelque temps la Grande Chaumière, grand atelier où Antoine Bourdelle enseignait à ses disciples, situé dans le quartier Montparnasse, alors haut lieu de la vie nocturne.

Notre chimiste dessine depuis son enfance et peint, entre deux poésies, deux compositions musicales. Cependant, il va devenir dans les années 1910 extrêmement productif jusqu'à en délaisser la plume, comme l'écrit Touny-Lérys qui le lui reproche un peu. Mais pour Georges, « *une chose importait : faire ce qui lui plaisait et la peinture lui plaisait plus que tout le reste* ». Il ajoute qu'il a « *tout sacrifié à la peinture* » ; il entend sûrement par là sa carrière littéraire mais aussi scientifique !

Il est intéressant de considérer un travail grâce auquel Gaudion s'est fait connaître : celui de l'illustration. Car si son style est marqué par les arts graphiques des années 1920, il a également réalisé de véritables illustrations pour des éditions dites de luxe (expression qu'il abhorrait). L'explosion simultanée de l'innovation et de l'intérêt du public pour l'art fournit un terrain favorable à la profusion de livres qui dans tous leurs aspects reflétaient le « modernisme », qui devint l'Art-déco. Dans l'un de ses articles, il partage sa vision de l'illustration : « *Le véritable rôle de l'illustration est, non pas de suivre pas à pas le mot, de suppléer par une mise en scène précise et une grande abondance de détails notre imagination défaillante, mais plutôt de créer l'atmosphère, de baigner l'œuvre dans la lumière qui lui est propre* ».

Les thèmes illustrés par Gaudion sont multiples mais se cristallisent cependant autour de quelques axes majeurs, tel le paysage, sujet de prédilection des peintres régionaux contemporains (figure 4), mais aussi autour de ce que nous nommerons « de la modernité », regroupant ainsi sous cette expression les motifs mettant en scène :

- les progrès techniques ;
- les débuts de l'émancipation des femmes, les loisirs,



Figure 4 - Illustration pour la nouvelle *Le Paradis perdu* de Marius-Ary Leblond, paru dans *Cinq histoires d'Outre-mer*, édité par Roger DaCosta pour le laboratoire de l'Hépatrol, 1939 (DR).



Figure 5 - *Nicht herausle (ne pas sortir)*, pour les *Poèmes* de Paul Morand, 1926, Éditions Richard. Bibliothèque d'Étude et du Patrimoine (DR).

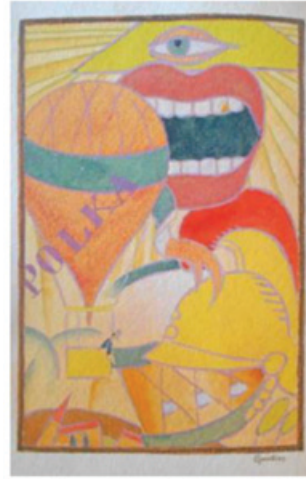


Figure 7 - Pour les *Poèmes* de Cocteau, 1920 (coll. part., DR) : *Polka* ; *A louer* ; *Fonds coralliens* ; *Camaïeu de violets* (de gauche à droite).

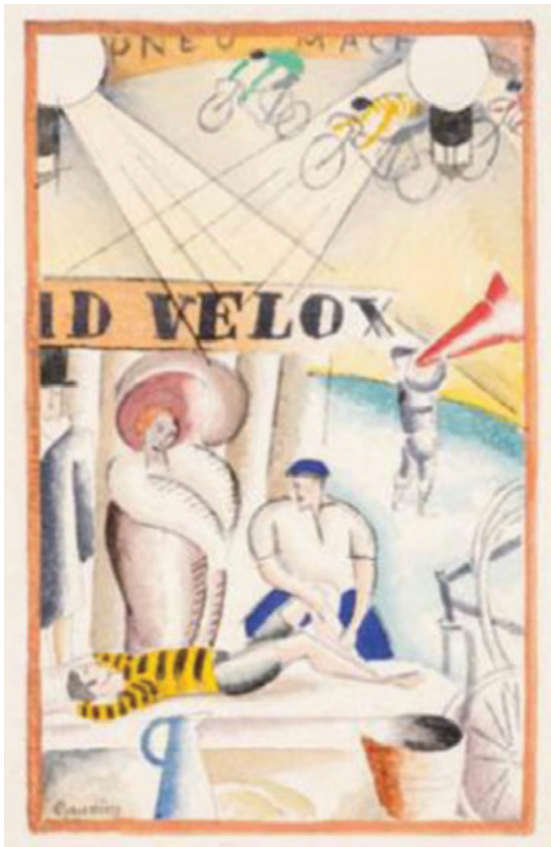


Figure 6 - *La nuit des Six-Jours*, pour *Ouvert la nuit* de Paul Morand, vers 1920 (coll. part., DR).



Figure 8 - *Feuilles de température*, pour les *Poèmes* de Paul Morand, 1926, Éditions Richard. Bibliothèque d'Étude et du Patrimoine (DR).

les sports mécaniques, le tourisme, en un mot : les Années folles (figures 5 et 6).

En 1920, Gaudion choisit de réaliser sept aquarelles pour illustrer une sélection de poèmes de Jean Cocteau, qu'il a assurément croisé du temps de *Poésie*. C'est sa première incursion dans l'univers de l'illustration. Cet ouvrage unique, édité à compte d'auteur par les Éditions de La Sirène à Paris, a une histoire touchante car il le destine à sa fiancée, Luce Boyals. Les aquarelles originales déclinent des thèmes qu'on retrouve

peu dans sa production, en dehors de la musique et du paysage (figure 7) ; les autres sont d'une facture très originale. En 1926, les Éditions Richard de Toulouse font appel à Gaudion pour illustrer de seize aquarelles les *Poèmes 1914-1924* de Paul Morand, ouvrage paru à 400 exemplaires. On y trouve quelques morceaux de bravoure tels *Lampes à arc* (figure 3) ou *Feuilles de température* qui allient un graphisme profondément marqué par le post-cubisme, avec des plans ouverts représentant plusieurs points de vue d'une même scène, et un esprit Art-déco pour le goût du motif décoratif et la simplicité optique (figure 8). Ces illustrations sont très représentatives du style de Gaudion dans les années 1925 avec un traitement post-cubiste du dessin.



Figure 9 - À la manière de Fernand Léger, Frontispice d'À la manière de... pour Reboux et Mueller, Éditions Richard, 1927 (coll. part., DR).

Pour la énième édition du best-seller de Reboux et Müller, *À la manière de...* (1927), les éditions toulousaines Richard font de nouveau appel à lui pour illustrer une vingtaine de pastiches d'écrivains avec des parodies rendant compte de la popularité des artistes ainsi caricaturés. On ne pouvait trouver meilleur choix que Gaudion, lui qui pendant une grande partie de sa vie d'artiste est allé chercher les influences des nombreuses avant-gardes qui avaient marqué la scène artistique française (et mondiale). On retiendra surtout les imitations de Gus Bofa (qui avait fort peu goûté la « plaisanterie », Matisse, Laboureur (que Gaudion admirait beaucoup), Fernand Léger... (figure 9). Le frontispice, très amusant, montre un « autoportrait » de Gaudion en chimpanzé, en train de « singer » les artistes, essayant de reproduire la Vénus de Milo, avec derrière une composition cubiste de Braque ou Picasso.

Après avoir choisi d'illustrer, à compte d'auteur, Cocteau et Morand, il récidive à une date indéterminée (vraisemblablement après 1935) mais cette fois pour une œuvre beaucoup plus personnelle, ses propres poésies. Le recueil *La Prairie fauchée*, paru aux Éditions Poésie en 1909, est certainement celui qui connut le plus de succès dans la carrière d'écrivain de Gaudion. Mais la peinture et le dessin s'étaient emparé de son esprit et de son cœur et à partir de 1910, il abandonna la plume pour le pinceau. Il a réalisé pour ce volume (qui est unique) de nombreuses illustrations, culs-de-lampe et vignettes, avec des thèmes qui lui sont chers : la vie rurale versus la vie urbaine, les toits de la ville, les arbres (figure 10), et d'autres thèmes plus originaux dans son œuvre (enfants, animaux...).

Plus tardivement, les Éditions Dacosta lui demandent en 1939 de créer des illustrations originales pour *Cinq nouvelles d'outre-mer*. Cet ouvrage reprend des légendes des anciennes colonies françaises et Gaudion ne se limite pas cette fois à un style imitatif. L'occasion lui est donnée d'exprimer sa créativité, le thème exotique correspondant aux sujets qu'il aime illustrer.

Ce travail d'illustration sera le dernier pour Gaudion qui meurt des suites d'un accident tragique de montagne en février 1942.



Figure 10 - Deux illustrations pour *La Prairie fauchée*, vers 1935, Galerie Moulins, Toulouse (DR).

Aujourd'hui, l'œuvre de Georges Gaudion est présente dans quelques musées – Paul-Dupuy à Toulouse, Toulouse-Lautrec à Albi – et a une place de choix au musée de Rabastens où une salle lui est dédiée depuis 2010 sous l'impulsion de son conservateur Guy Ahlsell de Toulza. Un cercle de collectionneurs s'est constitué et a pour rendez-vous la Galerie Moulins, rue du Rempart-Saint-Etienne à Toulouse, où ses propriétaires font vivre avec passion ses œuvres. Il y eut aussi dans les années 2000 quelques grandes ventes publiques qui ont fait voyager ses aquarelles. Une partie de ses archives sont conservées au musée du Vieux-Toulouse.

[1] A. de Pérignon, *George Gaudion*, Az'art atelier éditions, 2019.

[2] A. Lattes, *Paul Sabatier, un chimiste visionnaire*, Nouveau Monde Éditions, 2019.

[3] G. Gaudion, Nouvelle méthode générale de synthèse des amines forméniques par hydrogénation catalytique des éthers nitreux, *Ann. de Chim. et de Phys.*, 81<sup>e</sup> série, 25, 1912, p. 125-136, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k9603514z/f147.item.r=Gaudion>

[4] G. Gaudion, Alcoylation catalytique de la pipéridine, *Bull. Soc. Chim.*, 1911, t. 9, p. 417, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k282044r/f421.item.r=Gaudion> (sans l'équation).

[5] P. Sabatier, G. Gaudion, Déshydrogénation catalytique par le nickel en présence d'hydrogène, *C. R. Acad. Sci.*, 1919, t. 168, p. 670-672, Pli cacheté, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3121p/f672.item.r=Gaudion>

[6] P. Sabatier, G. Gaudion, Sur un nouveau cas de catalyse réversible : formation directe des nitriles à partir des amines de même chaîne carbonée, *C. R. Acad. Sci.*, 1917, t. 165, p. 224-227, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3118k/f224.item>

[7] P. Sabatier, G. Gaudion, Sur les divers modes de dédoublement des amines par catalyse : retour à l'aniline des anilines substituées, *C. R. Acad. Sci.*, 1917, t. 165, p. 309-313, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3118k/f309.item#>

[8] P. Sabatier, A. Mailhe, G. Gaudion, Action des métaux divisés sur les vapeurs de pinène., *C. R. Acad. Sci.*, 1919, t. 168, p. 926-930, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3121p/f926.item.r=Gaudion>

[9] P. Sabatier, G. Gaudion, Sur la crotonisation de l'aldéhyde éthylique : formation du butanol et de l'hexanol à partir de l'éthanol, *C. R. Acad. Sci.*, 1918, t. 166, p. 632-636, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3119w/f638.item>

[10] P. Sabatier, G. Gaudion, Sur le dédoublement de la glycérine en présence de divers catalyseurs : formation des alcools éthylique et allylique, *C. R. Acad. Sci.*, 1918, t. 166, p. 1033-1039, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3119w/f1039.item>

[11] *Poésie*, publication trimestrielle parue entre 1905 et 1911 dirigée par G. Gaudion, Touny-Lerys et Marc Dhano. Concernant la revue, Jean-Noël Lalonde en a fait une remarquable et complète étude dans sa thèse de 3<sup>e</sup> cycle : Étude de Poésie 1905-1911, Toulouse II Le Mirail, 1971. Il a notamment eu accès à toute une correspondance entre Gaudion et Touny-Lérys, aujourd'hui en partie perdue, qui nous apprend énormément sur ces années-là.

[12] Cité dans une lettre de Francis Carco.

**Amandine DE PÉRIGNON,**

Assistante de conservation, Musée du Vieux-Toulouse.

**Armand LATTES,**

Professeur émérite des Universités, Université Paul Sabatier, Toulouse.

Courriels : [adeperignon@yahoo.fr](mailto:adeperignon@yahoo.fr) ; [arlattes@yahoo.fr](mailto:arlattes@yahoo.fr)

## Distinctions

### Prix Franklin Lavoisier 2022



#### Appel à candidatures

Créé en 2007 par la Fondation de la Maison de la Chimie et le Science History Institute et décerné tous les deux ans, ce prix d'un montant de 15 000 € récompense une personnalité, un groupe de personnes ou un organisme ayant contribué par leurs actions ou leurs publications à :

- préserver et mettre en valeur le patrimoine scientifique et industriel en France et aux États-Unis dans le domaine de la chimie et de ses applications ;
- promouvoir une meilleure connaissance de l'histoire des sciences et industries chimiques et moléculaires ;
- favoriser le resserrement des liens franco-américains et la promotion d'actions marquantes dans le domaine des sciences et industries de la chimie.

Le prix sera décerné en novembre 2022 au siège du Science History Institute à Philadelphie (États-Unis).

**Date limite de réception des dossiers : 31 mars 2022.**

• <https://actions.maisondelachimie.com/les-prix-de-la-fondation/prix-franklin-lavoisier>

### Création du prix scientifique franco-polonais Marie Skłodowska-Curie et Pierre Curie

L'Académie des sciences a accueilli en septembre dernier la Fondation polonaise pour la science (Foundation for Polish Science) et la Fondation Zygmunt Zaleski pour la signature du protocole d'accord de la création du prix scientifique franco-polonais Marie Skłodowska-Curie et Pierre Curie.

Financé par la Fondation Zygmunt Zaleski (dotation: 30 000 €), ce prix biennuel qui s'inscrit dans la continuité de l'année scientifique franco-polonaise 2019-2020 est destiné

à récompenser l'excellence scientifique de travaux issus d'une coopération scientifique franco-polonaise. Il sera décerné à deux chercheurs, l'un travaillant en France, l'autre en Pologne, pour la première fois en 2022.

• Source : Académie des sciences, 08/09/2021.

## Recherche et développement

### Covid-19 : la recherche se poursuit...

#### Un candidat vaccin efficace dans des modèles précliniques

Plus d'un an après le début de la pandémie de Covid-19, plusieurs vaccins ont été autorisés, grâce à des efforts de recherche sans précédents menés à travers le monde. Ces vaccins de première génération apportent beaucoup d'espoirs et sont un pilier central de la lutte contre le virus. Néanmoins, des questions se posent encore sur la durée de la réponse immunitaire ou la nécessité d'avoir recours à une vaccination de rappel. Par ailleurs, reprendre le contrôle de la pandémie signifie vacciner des milliards d'individus. Fabriquer suffisamment de doses pour protéger l'ensemble de la population mondiale constitue un défi considérable. Pour ces raisons, la recherche vaccinale se poursuit afin de développer des candidats vaccins supplémentaires et continuer de répondre à tous ces enjeux.

Des chercheurs de l'Inserm et de l'Université Paris-Est Créteil à l'Institut de Recherche Vaccinale (VRI), du CEA et de l'Université Paris-Saclay travaillent à la mise au point d'un vaccin composé d'un anticorps monoclonal ciblant des cellules de l'immunité qui circulent dans l'ensemble de l'organisme : les cellules dendritiques. Ces cellules sont clés dans la stimulation du système immunitaire par leur capacité à induire une réponse anticorps et cellulaire, robuste et durable, comme cela a été démontré par l'équipe dans d'autres modèles d'infection. L'anticorps monoclonal est fusionné à une protéine du SARS-CoV-2, qui va venir stimuler les cellules dendritiques.

Celui-ci a montré son efficacité dans des modèles précliniques, induisant une réponse immunitaire protectrice contre le virus. Dans un premier temps, les chercheurs estiment que ce

### Communiqué des Académies nationales de médecine, de pharmacie et de l'Académie des sciences



#### L'ARN messenger : une arme vaccinale sûre et très efficace contre la Covid-19

Dans un communiqué commun\*, les Académies dénoncent les fausses informations qui circulent dans une partie de l'opinion publique concernant les vaccins à base d'ARN messenger. Émises et entretenues par une minorité, ces contre-vérités ne s'appuient sur aucune donnée scientifique mais leur large diffusion, surtout par les réseaux sociaux, entretient le doute et la confusion, et égarent le public qui attend légitimement des données fiables sur la vaccination contre la Covid.

Il est en particulier rappelé que « les scientifiques et les industriels ont élaboré et amélioré depuis plus de trente ans la technologie des plateformes à ARN messenger qui s'est avérée très efficace pour la vaccination contre le SARS-CoV2. Les vaccins à ARN messenger induisent une protection de plus de 90 % contre les formes symptomatiques de Covid-19 et presque totale contre les formes graves ».

• Pour lire l'intégralité du communiqué :

[www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/2021\\_07\\_05\\_vaccins\\_ARNm.pdf](http://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/2021_07_05_vaccins_ARNm.pdf)

## Arkema rachète les adhésifs d'Ashland

Fin août, Arkema a signé un accord pour l'acquisition de l'activité Performance Adhesives d'Ashland, leader des adhésifs de haute performance aux États-Unis (chiffre d'affaires : environ 360 millions US\$).

Ashland Performance Adhesives est un acteur majeur des adhésifs sensibles à la pression (films décoratifs, protection et signalisation pour l'automobile et le bâtiment), des adhésifs structuraux (secteurs du collage de bois dans la construction, des composites et du transport) et des adhésifs pour l'emballage flexible. Avec environ 330 personnes et six unités de production, principalement en Amérique du Nord, Ashland dispose par ailleurs d'un fort potentiel de développement en Europe et en Asie. Associée aux positions mondiales d'Arkema, l'excellente complémentarité technologique, géographique et commerciale de cette acquisition permettra à Bostik (filiale d'Arkema) d'élargir son offre et de se positionner en acteur majeur des adhésifs de haute performance pour l'industrie ; le segment Adhésifs d'Arkema visant un chiffre d'affaires de plus de 3 milliards d'euros en 2024.

Après la cession récente du PMMA et le démarrage des réflexions sur les gaz fluorés, l'acquisition des adhésifs d'Ashland est une formidable opportunité de renforcer la présence du groupe Arkema aux États-Unis et d'accélérer la croissance de Bostik. Ce projet d'acquisition s'inscrit dans la stratégie du groupe, qui ambitionne de devenir à l'horizon 2024 un acteur majeur des Matériaux de spécialités, générant un chiffre d'affaires d'au moins 10 milliards d'euros.

• Source : Arkema, 31/08/2021.

## Enseignement

### Grand oral du bac : quand des chimistes partagent leur expérience avec les lycéens

Comment devient-on chimiste ? Que reste-t-il à découvrir en chimie ? Des lycéennes et lycéens auront l'occasion de poser leurs questions directement à des chimistes au cours de la nouvelle année scolaire. Dans le cadre de l'opération « Étonnante chimie pour un Grand oral percutant », portée par le ministère de l'Éducation nationale, de la Jeunesse et des Sports et le CNRS, élèves et chimistes des différentes régions de France se rencontreront lors de demi-journées d'échanges organisées dans les lycées ou lieux de culture scientifique. Ces interventions s'appuieront sur le livre de vulgarisation scientifique *Étonnante chimie* (voir page 55). À partir d'un exemple tiré de cet ouvrage, les scientifiques partageront leur expérience professionnelle, leur passion pour leur métier et prépareront les futurs bacheliers à la prise de parole orale et à la présentation d'un sujet scientifique. Les élèves qui passent le baccalauréat pourront exploiter le contenu de ces rencontres en vue de l'épreuve du Grand oral du bac, en présentant par exemple une des 54 problématiques traitées dans l'ouvrage : comment la chimie permet de dépolluer les sols ou stocker l'énergie, ou encore réparer le corps humain.

• Source : CNRS, 14/09/2021.

vaccin pourrait être utile pour les personnes convalescentes ou déjà vaccinées dont la réponse immunitaire a commencé à décliner, afin de « booster » leur immunité. Des essais cliniques chez l'Homme doivent démarrer en 2022.

Par ailleurs, cette technologie vaccinale ciblant les cellules dendritiques (« dendritic cell targeting ») est actuellement en phase I d'un essai clinique évaluant la sécurité et l'immunogénicité d'un vaccin préventif contre le VIH.

• Source : Inserm, 30/08/2021.

Réf. : R. Marlin, V. Godot, S. Cardinaud *et al.*, Targeting SARS-CoV-2 receptor-binding domain to cells expressing CD40 improves protection to infection in convalescent macaques, *Nature Communications*, sept. 2021, DOI : 10.1038/s41467-021-25382-0

## Un vaccin 100 % français administrable par voie nasale

Depuis un an, l'équipe de recherche BioMAP de l'UMR INRAE-Université de Tours Infectiologie et Santé publique s'est engagée dans la mise au point d'un vaccin nasal contre le virus SARS-CoV-2, 100 % français, en pleine cohérence avec l'engagement dans la recherche partenariale promue par l'Institut Carnot France Futur Elevage dont INRAE et l'Université de Tours sont cotutelles.

Contrairement aux vaccins intra-musculaires, seuls les vaccins à administration par voie nasale seraient capables d'éviter la présence de virus dans le nez, stade initial de l'infection ; ils induisent en effet une immunité au niveau des muqueuses nasales, porte d'entrée et de lieu de multiplication du virus. Le candidat vaccin développé par l'équipe BioMAP serait le 8<sup>e</sup> vaccin à administration nasale en préparation dans le monde, et le seul français.

Les travaux, qui visent la conception d'un candidat vaccin à base de protéines virales, s'accroissent. Les tests pré-cliniques menés en laboratoire démontrent l'efficacité du vaccin candidat après deux immunisations par voie nasale espacées de trois semaines, tant en termes de réponse immunitaire que de neutralisation précoce du virus original et de ses variants, bloquant tout risque de contamination par un individu vacciné. Pour obtenir ces résultats, l'équipe s'est appuyée sur un consortium formé du groupe pharmaceutique Recipharm, du Bio3 Institute Université de Tours – Groupe IMT et de la biotech Vaxinano, soutenue par un financement ANR, Région Centre-Val de Loire, Université de Tours et INRAE.

Ces résultats très positifs permettront de démarrer dès l'automne 2021 la phase de développement et de production des lots de vaccins en vue d'un passage en phase clinique en 2022, pour une mise sur le marché en 2023.

Techniquement, le vaccin sera administrable à l'aide d'un petit adaptateur placé au bout d'une seringue sans aiguille permettant une diffusion idéale au sein de la cavité nasale. Actuellement, un dispositif de spray adapté à ce vaccin et à l'humain est en cours d'évaluation en collaboration avec le groupe Recipharm/Resyca. Non invasif et nécessitant peu de logistique, ce système simple de vaccination permettrait de diffuser plus largement le dispositif vaccinal en Europe et au-delà. Ce vaccin s'adresserait donc aux populations non vaccinées pour protéger contre les formes graves et modérées de la Covid-19 et servirait également de rappel vaccinal pour la population déjà vaccinée afin d'éviter la transmission de la maladie.

• Source : INRAE, 09/09/21.

Pour en savoir plus :

[www.inrae.fr/actualites/vaccin-100-francais-administrable-voie-nasale-contre-covid-19-resultats-pre-cliniques-positifs](http://www.inrae.fr/actualites/vaccin-100-francais-administrable-voie-nasale-contre-covid-19-resultats-pre-cliniques-positifs)





**L'électricité, au cœur  
de notre futur bas-carbone**  
Sauvegarder notre niche écologique  
Y. Bamberger, H.B. (T.) Püttgen  
347 p., 30 €  
EPFL Press, 2021

Cet ouvrage didactique est divisé en sept sections – Préambule et guide du lecteur ; Pour entrer dans le sujet ; Consommations d'énergie et émissions ; Comment l'électricité est produite ; Une électricité toujours plus présente ; Où nous devrions aller ; Pour conclure – qui regroupent vingt-deux chapitres et des annexes. Il est accompagné d'un document « compagnon » disponible sur le web pour approfondir certains sujets.

Le parti pris de l'ouvrage est de rester accessible au plus grand nombre. Sa longueur permet d'avoir une vue assez détaillée des systèmes énergétiques et de leurs interactions. Les auteurs soulignent que l'objet des accords de Paris est de maintenir le système Terre dans un état compatible avec l'existence humaine. Dans cet ouvrage, l'indice clé de la performance de l'humanité est la diminution des émissions de CO<sub>2</sub>. Cette objectif clair contribue grandement à la lisibilité de l'ouvrage.

« Pour entrer dans le sujet », les auteurs imaginent quatre familles vivant sur quatre continents ayant des mix énergétiques différents pour que chacun puisse comprendre l'origine de ses émissions. Ils imaginent aussi un pays moderne avec une longue histoire : Energia. Enfin ils dressent un bilan des émissions mondiales.

Ils font ensuite un bilan des « Consommations d'énergie et émissions » pour les quatre secteurs macroscopiques de l'économie : logements, transports et déplacements, industrie et agriculture, tertiaire et services. Une fois ce bilan dressé, ils répondent à la question de savoir « Comment l'électricité est produite ». Les méthodes de production ainsi que leur contenu carbone et leur facteur de charge sont analysés. Bien évidemment, ce n'est pas tant l'exhaustivité

qui est cherchée mais plutôt la représentativité actuelle et à venir des moyens de production.

Dans une section intitulée « Une électricité toujours plus présente », les auteurs s'intéressent au stockage de l'énergie (mécanique, électrochimique, chimique, chaleur), aux réseaux électriques et aux systèmes multi-énergies. Cette section permet d'appréhender la complexité d'un système énergétique qui doit composer avec les consommations horaires, journalières, hebdomadaires, saisonnières et annuelles, et les pertes inhérentes à tous systèmes de stockage.

Dans « Où nous devrions aller », les auteurs se font les avocats de la redevance carbone universelle redistribuée (RCUR) qui permettrait de sortir de l'impasse de la taxe carbone, de l'échec des quotas d'émission et de la sensation d'écologie punitive. Pour faire simple, la RCUR est liée au contenu carbone d'un produit et est redistribuée en intégralité aux habitants sous la forme d'un revenu par habitant. Dans cette même section, le devenir de la mutation énergétique de Energia en 2035 est analysé. « Pour conclure », les baisses d'émission liées à la mutation énergétique de nos quatre familles sur quatre continents sont analysées et les auteurs nous enjoignent à embrasser la mutation énergétique dès maintenant avec les technologies d'aujourd'hui sans attendre demain. Au passage, on notera que le réalisme des dirigeants d'Energia les amène à relancer leur programme nucléaire !

Ce livre très complet, et relativement facilement accessible, ne propose pas de recettes magiques mais met en évidence les choix politiques qui doivent être faits pour favoriser l'électrification de nos besoins énergétiques. Les auteurs ne masquent pas les difficultés technologiques liées aux énergies renouvelables et au stockage. Ils insistent sur la nécessité de s'appuyer sur les technologies bas carbone prévisibles et éventuellement pilotables (hydraulique, géothermie, nucléaire) pour offrir un mix électrique bas carbone et fiable qui puisse s'accommoder d'une fraction significative d'éolien et de photovoltaïque. Enfin, pour les pays situés dans la zone tempérée Nord ou Sud, les technologies de stockage et de pompage de la chaleur et de sa distribution doivent être

massivement utilisées afin de réduire nos émissions de CO<sub>2</sub>. Les technologies existent, alors utilisons les ! Un livre à conseiller à nos dirigeants !

**Stanislas Pommeret**



**Étonnante chimie**  
Découvertes et promesses  
du XXI<sup>e</sup> siècle  
C.M. Pradier (dir.)  
F. Teyssandier, O. Parisel (coord.)  
340 p., 22 €  
CNRS Éditions, 2021

Cet ouvrage, destiné au grand public, illustre en cinquante-quatre petits articles de trois à quatre pages chacun les grands thèmes de la chimie : Voyager dans le temps ou l'espace ; Observer et protéger notre environnement ; Créer et stocker l'énergie ; Modéliser et ciseler la matière ; Diagnostiquer et soigner ; Chimie au quotidien. Un index détaillé, et surtout un glossaire de treize pages avec 123 termes définis en facilitent la lecture. Le lecteur plus averti pourra consulter avec profit les références bibliographiques données à la fin de chaque article pour en savoir plus.

À signaler, la bonne idée d'introduire chaque article d'une citation littéraire, y compris humoristique – je ne peux m'empêcher de noter celle de Pierre Desproges : « Sans pile, on perd la face » ! Il est impossible de citer ici tous les auteurs des articles et les sujets évoqués dans cet ouvrage ; aussi je me limiterai à citer quelques points qui ont particulièrement attiré mon attention (que les auteurs me pardonnent cette sélection arbitraire).

Il existe plus de 210 molécules identifiées dans le milieu interstellaire ! La lumière polarisée circulairement en UV a permis de donner un argument sur l'origine de l'asymétrie de acides aminés appartenant à une météorite... Une poudre ophtalmique (la laurionite) était utilisée par les Romains au 1<sup>er</sup> siècle ap. J.-C., mais les fards noirs égyptiens analysés au synchrotron de Grenoble ont montré que déjà 3 000-4 000 ans

av. J.-C., les Égyptiens maîtrisaient déjà la technique de fabrication !

Notons que l'extraction des métaux toxiques par des plantes de sols pollués ou d'eaux résiduaires permet de récupérer des métaux qui sont utilisés en (éco)catalyse pour des réactions de couplage en synthèse organique avec succès ! Des membranes ont été réalisées avec des canaux artificiels d'inspiration biologique ; elles conduisent alors à un alignement de molécules d'eau qui deviennent ainsi chirales et ces membranes peuvent être utilisées pour le dessalement de l'eau de mer. La valorisation du CO<sub>2</sub> permet déjà des transformations conduisant à la fabrication de l'éthylène, source de polymérisation par exemple !

Le CO<sub>2</sub> supercritique permet de régénérer des masques chirurgicaux et FFP2 sans altération mécanique de la structure, tout comme l'eau supercritique est capable de recycler des aimants permanents et d'accélérer la synthèse du talc passant d'une dizaine d'heures à une dizaine de secondes !

L'utilisation d'électrodes au carbone des supercondensateurs et à base d'oxydes dans les batteries permet d'envisager des pseudo-condensateurs alliant les avantages des deux systèmes ! La dynamique moléculaire ab initio explique enfin après plus d'un siècle le mécanisme de la réaction de Grignard...

Les MOF ont une grande aire spécifique de 3 000 m<sup>2</sup>g<sup>-1</sup> et un gaz confiné dans les pores se liquéfie à plus basse température : 1 kg de MOF peut adsorber de l'eau jusqu'à 2,8 litres ! L'exhalomique (science de l'analyse de l'air exhalé) a permis par COV/SM de détecter des produits pouvant cartographier les COV exhalés des malades du Covid-19. L'utilisation du squalène, liquide naturel et biocompatible, a été l'occasion de réaliser des encapsulations chimiques de molécules pharmacologiques actives et la délivrance du principe actif est alors parfaitement contrôlée dans l'organisme. Dans le même ordre d'idée, la création de puces microfluidiques permet d'envisager des nouveaux réacteurs chimiques industriels, mais aussi de réaliser des tumeurs sur puce pouvant être utilisées en immunothérapie.

Par ailleurs, on note que dans une grappe de raisin on peut actuellement identifier mille composés chimiques ! Le fameux goût du bouchon est dû au trichloroanisole, mais l'analyse des bouchons est maintenant suivie par fluorescence avec un ligand issu de l'anthracène complexé dans un MOF !

En cosmétique, les agents tensioactifs de synthèse sont remplacés par des particules dites de Picking, qui sont des microparticules solides peu toxiques, d'argile, cellulose et polymères biodégradables et biocompatibles.

Pour terminer, mentionnons les notes historiques, en particulier sur Marie-Anne Paulze et son rôle important dans les travaux de Lavoisier, son époux ; sur Jean-Baptiste Dumas et le cœur embaumé de Saint-Louis de la Sainte-Chapelle à Paris, et plus surprenant... sur Angela Merkel, d'abord chimiste théoricienne avant de devenir chancelière d'Allemagne !

Si je devais formuler quelques critiques, ce serait le faible nombre de femmes chimistes auteures de l'ouvrage, et l'absence des derniers prix Nobel de chimie français, ne serait-ce qu'Emmanuelle Charpentier...

Pour conclure, l'ouvrage illustre bien l'évolution historique de la chimie, considérée d'abord comme science de progrès puis perçue par l'opinion publique comme dangereuse, mais le renouveau observé ces dernières années avec par exemple « l'écochimie » et la « chémobiologie » y est bien mis en évidence. Par ailleurs, ce livre sera sans doute très utile aux professeurs chargés d'enseignement de la chimie pour illustrer leurs cours.

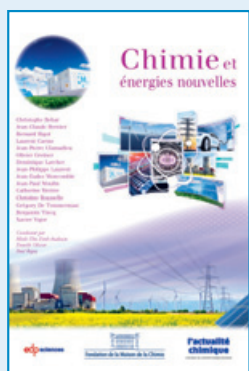
Nul doute que le lecteur appréciera cet ouvrage, source d'étonnements comme son titre l'indique, grâce à la très grande diversité des champs d'applications de la chimie.

**Jean-Pierre Foulon**

## À paraître dans la collection « Chimie et ... »

### Chimie et énergies nouvelles

M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier, P. Rigny (coords.)



Il y a seulement quelques années, les énergies fossiles (charbon pétrole) étaient reines et le nucléaire les complétait par des technologies d'avenir. Tout a changé aujourd'hui : le pétrole s'épuise et disparaîtra, des accidents rares mais terribles discréditent le nucléaire. Alors même que la vie, quotidienne comme économique, repose de plus en plus sur l'électricité ! Et voilà que l'obsession du changement climatique entre en jeu et vient disqualifier notre source privilégiée, le pétrole, puisque les émissions de gaz carbonique dues à la combustion sont principalement dénoncées ! Ce qui était une préoccupation pour les spécialistes au début du siècle mobilise maintenant tout le monde.

Les auteurs de cet ouvrage montrent comment les scientifiques et les ingénieurs modifient les procédés connus pour limiter les émissions de CO<sub>2</sub> et en inventent d'autres. Ils montrent aussi comment se passer de combustibles fossiles, en utilisant l'énergie du vent (les éoliennes) ou celle du solaire (les cellules photovoltaïques), ou encore pour développer des procédés à base de plantes, mieux sécuriser le nucléaire, voire, pour le grand avenir, utiliser la fusion des atomes – le procédé du soleil !

Dans les journaux ou les livres, ces thèmes sont souvent abordés, vu leur importance critique, mais rarement le sont-ils de la façon concrète qu'ont adoptée les auteurs de ce livre. Ici on ne vend pas du rêve, mais on incite au concret : tout (ou beaucoup) est possible, mais rien n'est ni simple ni garanti, il n'y a pas de « tout tout de suite » possible. Le chemin vers les nouvelles énergies comportera des étapes... des déceptions passagères, des espoirs, des choix et des mobilisations avant des succès et des améliorations. Les meilleurs spécialistes des laboratoires et des industries nous transmettent dans ce volume ce qu'il faut savoir pour aborder cette ère techniquement révolutionnaire !

**À commander en ligne sur [laboutique.edpsciences.fr](http://laboutique.edpsciences.fr)**

# Agenda

18 octobre 2021

## Forum Horizon Chimie

Paris

<https://forumhorizonchimie.fr>

27-28 octobre 2021

## HyVolution

*Energie, industrie, mobilité*

Paris

[www.hyvolution-event.com/fr/evenement](http://www.hyvolution-event.com/fr/evenement)

28-29 octobre 2021

## 9<sup>th</sup> Mediterranean young researchers days

Montpellier

Voir n° 465, p. 60.

[www.jmjc2021-montpellier.com/](http://www.jmjc2021-montpellier.com/)

2-4 novembre 2021

## 68<sup>e</sup> Congrès des professeurs de physique et de chimie

Nancy

[www.udppc.asso.fr](http://www.udppc.asso.fr)

4-5 novembre 2021

## 2<sup>nd</sup> International conference on biomolecules and the bioeconomy

Nancy

<https://evento.renater.fr/survey/2nd-international-conference-on-biomolecules-and-bioeconomy-drkmsxp8>

8-9 novembre 2021

## CDCC-2

*2<sup>d</sup> Carbon dioxide conversion catalysis conference*

Virtual conference

[www.fusion-conferences.com/conference/104](http://www.fusion-conferences.com/conference/104)

10 novembre 2021

## Chimie et agriculture durable

Paris

Dans le cadre des colloques « Chimie et... ».

<https://actions.maisondelachimie.com/colloque/chimie-et-agriculture-durable>



15-19 novembre 2021

## GFP 2021

*50 ans du Groupe français des polymères*

Lyon & webconférence

Voir p. 61.

<http://gfp2021.univ-lyon1.fr>

15-19 novembre 2021

## Journées de la division Chimie du solide

Visioconférence

Voir p. 62.

<https://dcs-2021.sciencesconf.org>

16 novembre 2021

## Valorisation et recyclage des plastiques

Romainville

<https://asso.adebiotech.org/valorisation-et-recyclage-des-plastiques>

16-19 novembre 2021

## Science & You

Metz

[www.science-and-you.com/fr](http://www.science-and-you.com/fr)

22-24 novembre 2021

## XXI EuroFoodChem

Online

<https://xxieurofoodchem.events.chemistry.pt>

22-26 novembre 2021

## ChemBio 2021

*Méthodes et concepts en chimobiologie*

Le Touquet

<https://ecole-chemobiologie2021.cnrs.fr>

23-25 novembre 2021

## C'Nano

*The nanoscience meeting*

Toulouse

<https://cnano2020.sciencesconf.org>

25-26 novembre 2021

## GFSV 2021

*Journées du Groupe français de spectroscopie vibrationnelle*

Online

<https://uclouvain.be/en/research-institutes/imcn/news/25-26-nov-2021-journees-gfsv-2020.html>



25-26 novembre 2021

## Hydrogen markets Europe

*Hydrogen and its critical role*

*in the decarbonization of Europe*

Virtual conference

[www.spglobal.com/platts/en/events](http://www.spglobal.com/platts/en/events)

25-26 novembre 2021

## Polymères et construction durable

Paris

<https://sfip-plastic.org/evenements/1733>

29 novembre-1<sup>er</sup> décembre 2021

## 20<sup>e</sup> Journées de formulation

Compiègne

Voir p. 62.

<https://jf2021.utc.fr>

29 novembre-2 décembre 2021

## ElecMol

*10<sup>th</sup> International conference*

*on molecular electronics*

Lyon

Voir p. 62.

<https://elecml20.sciencesconf.org>

1<sup>er</sup> décembre 2021

## The lithium element

*Enabler of the energy transition*

Webinar

[www.euchems.eu/lithium-element-webinar](http://www.euchems.eu/lithium-element-webinar)

7 décembre 2021

## Colloque Énergie du CNRS

Paris

[abdelilah.slaoui@cnrs-dir.fr](mailto:abdelilah.slaoui@cnrs-dir.fr)

23-24 mars 2022

## Conference on CO<sub>2</sub>-based fuels and chemicals

Hybrid event & Cologne (Allemagne)

<http://co2-chemistry.eu>

En raison des mesures sanitaires liées au Covid-19, certaines manifestations peuvent être annulées et/ou reportées. Vous trouverez de nombreuses autres manifestations sur le site de la SCF : [www.societechimiquedefrance.fr](http://www.societechimiquedefrance.fr), rubrique Évènements.

## En direct du Bureau

### Reprise des animations scientifiques

La SCF anticipe et encourage la reprise des activités d'animation scientifique en soutenant plusieurs événements. Trois initiatives sont ainsi accompagnées en réponse à l'appel d'offres « Actions innovantes » :

- l'organisation par la section régionale Bretagne & Pays de Loire d'une nouvelle édition des Journées scientifiques régionales (30 septembre-1<sup>er</sup> octobre), qui incluait une journée franco-polonaise en l'honneur de Marek Samoc, lauréat du prix franco-polonais ;
- la mise en place par la section régionale PACA d'une opération d'envergure à l'occasion du renouvellement de son Bureau pour promouvoir la SCF auprès d'un large public et ainsi renforcer son ancrage dans les différents sites de la région ;
- la première École thématique de chémobiologie (22-26 novembre, Le Touquet – voir p. 62), organisée par la division Chimie organique et le groupe thématique Chémobiologie, une action qui contribue à dynamiser une communauté scientifique en pleine structuration.

Et une subvention de soutien est accordée aux sections régionales Occitanie-Méditerranée et PACA pour l'organisation des 9<sup>e</sup> Journées méditerranéennes des jeunes chercheurs (JMJC) (28-29 octobre, Montpellier - voir n° 465, p. 60).

### SCF info : nouveau format

Le premier numéro d'une nouvelle version de notre newsletter est paru en septembre dernier. Réorganisée en rubriques repensées et clairement identifiées, elle fait suite au lancement du nouveau site Internet et participe à la poursuite de la modernisation de nos outils de communication. Dans ce cadre, Nathalie Bourgis\* a été recrutée en juillet dernier en tant que chargée de communication et du secrétariat général.

\*nbourgis@societechimiquedefrance.fr

## Prix des divisions 2021

### Chimie organique

#### Prix de la division



#### • Gilles Guichard

Gilles Guichard est directeur adjoint de l'Institut de chimie et de biologie des membranes et des nano-objets (CBMN, Université de Bordeaux), directeur du département Sciences et technologies pour la santé (STS) de l'Université de Bordeaux et membre de la section 16 du Comité national de la recherche scientifique (2017-2021). Il est également cofondateur d'Ureka Pharma, une biotech visant au développement thérapeutique des peptides.

### Chemistry Europe Fellows

Chemistry Europe  
FELLOWS

Call for Nominations  
Open through December 3, 2021

[www.chemistryviews.org/view/fellows.html](http://www.chemistryviews.org/view/fellows.html)

Inspirée par les structures et les fonctions des macromolécules biologiques, son activité de recherche porte sur la chimie biomimétique des peptides et des protéines et ses applications en lien avec la biologie (développement de molécules bioactives et d'outils moléculaires pour interférer avec les processus biologiques). La chimie des foldamères, avec la conception et la synthèse de brins moléculaires artificiels aux propriétés de repliement contrôlées, constitue un axe fort de ses travaux. On citera notamment la découverte que des oligomères aliphatiques à jonctions urée se replient pour former des structures secondaires hélicoïdales apparentées aux hélices polypeptidiques. Une partie essentielle de ces travaux repose sur la caractérisation structurale des objets seuls ou en complexes avec des (macro)molécules d'intérêt. Les développements actuels visent à exploiter ces systèmes pour des applications en reconnaissance moléculaire : création d'architectures auto-assemblées, reconnaissance spécifique de surfaces de protéines, transport d'actifs, et catalyse. Il a reçu en 2019 le prix Grammaticakis-Neuman de l'Académie des sciences pour ses travaux dans le domaine des foldamères.

#### Prix Jean-Marie Lehn

*Ce prix est destiné à une chercheur-se et enseignant-e-chercheur-se ayant 8 à 15 ans de carrière.*



#### • Samir Messaoudi

Samir Messaoudi a intégré le CNRS en 2007 en tant que chargé de recherche au sein de l'unité BioCIS (UMR 8076, Université Paris Saclay, Faculté de Pharmacie, Châtenay Malabry). Ses activités de recherche étaient principalement centrées sur la fonctionnalisation de « châssis moléculaires » hétérocycliques via des couplages organométalliques. Il s'est intéressé également à des projets de chimie médicinale, notamment aux inhibiteurs de la protéine de choc thermique Hsp90, des composés antimétaboliques ou des modulateurs de la protéine TCTP pour le traitement des cancers. Il a reçu en 2012 le Prix d'encouragement à la recherche en chimie thérapeutique de la Société de Chimie Thérapeutique. Depuis 2013, il a initié une nouvelle thématique autour de la glycochimie et de ses applications. Ses principaux objectifs consistent à étudier et comprendre la réactivité des sucres en présence des métaux de transition afin de développer des approches catalytiques innovantes pour leur fonctionnalisation. Plus récemment, il s'est lancé dans l'exploration de nouveaux espaces chimiques tels que les glycopeptides ou les glycopolymères, ainsi que dans le design de glycomimétiques bioactifs.

Promu directeur de recherche en 2017, il co-anime depuis janvier 2020 l'équipe CosMIT (Conception et synthèse de molécules d'intérêt thérapeutique).

### Prix Jean-Pierre Sauvage

*Les prix Jean-Pierre Sauvage et Jean Normant sont destinés à de jeunes chercheurs et enseignants-chercheurs ayant moins de 8 ans de carrière.*



#### • Davide Audisio

Après une maîtrise de chimie pharmaceutique à Turin (Italie), Davide Audisio a rejoint la France en 2007 pour préparer un doctorat en chimie médicinale à l'Université Paris-Sud (Châtenay-Malabry), au cours duquel il a développé de nouveaux dérivés de la novobiocine comme inhibiteurs potentiels de Hsp90 sous la supervision de Mouâd Alami et Samir Messaoudi. En 2010, il rejoint le groupe de Nuno Maulide au Max-Planck-Institut für Kohlenforschung (Mülheim an der Ruhr, All.), où il s'est impliqué dans la catalyse asymétrique et le développement de la synthèse énantio- et diastéréosélective de cyclobutènes substitués. En 2012, il entre au département de chimie d'Éli Lilly & Co (Windlesham, R.-U.), pour travailler sur le développement de candidats cliniques pour les maladies neurodégénératives. Il rentre au CEA (Saclay) en 2014 et rejoint le groupe de Frédéric Taran pour développer des thématiques autour de la chimie des hétérocycles mésoioniques et les réactions « click & release ». Depuis 2016, il dirige au CEA le Laboratoire de radiomarquage au carbone 14. Ses intérêts de recherche couvrent divers domaines de la chimie organique, notamment les méthodologies de marquage isotopique du carbone, la chimie des composés héliènes et poly-aromatiques, et le développement de nouveaux outils pour la chimie bio-orthogonale. En 2017, il a obtenu le prix Jeune chercheur en chimie médicinale de la SCT et une bourse ANR-JCJC sur l'utilisation des composés mésoioniques pour la synthèse de molécules poly-aromatiques complexes. En 2019, il a bénéficié d'un financement européen « ERC Consolidator Grant » pour développer un projet de « late-stage radiocarbon labeling ».

### Prix Jean Normand



#### • William Erb

Après sa thèse à l'Institut de Chimie des Substances Naturelles (ICSN) dans l'équipe de Jieping Zhu, où il a principalement travaillé sur le développement de différentes approches vers un antibiotique, la lipiarmycine A3, ainsi que sur la mise au point de réactions pallado-catalysées, William Erb a effectué plusieurs postdoctorats dans les équipes de Varinder Aggarwal (Bristol), Janine Cossy (Paris), Jacques Rouden (Caen) et Géraldine Gouhier (Rouen) sur différents sujets tels que l'application de réactions organocatalysées à la synthèse de prostaglandines, la synthèse totale de triterpènes, la chimie des acides boroniques ou encore celle des cyclodextrines. Il est recruté en 2015 comme maître de conférences de l'Université de Rennes 1, dans la nouvelle équipe Chimie organique & interfaces, où il a soutenu son habilitation à diriger des recherches en 2020. Il y travaille notamment sur les thématiques phares de l'équipe de Florence Mongin concernant l'emploi de réactifs

bimétalliques et de réactions catalysées par des complexes de cuivre pour accéder à des composés biologiquement actifs. Il y développe également un axe de recherche dédié à la chimie du ferrocène dans le but d'accéder à de nouveaux dérivés pour des applications notamment en catalyse ou à l'interface avec la biologie. Il s'intéresse ainsi au développement de nouvelles méthodologies de synthèse et à l'étude de nouvelles familles de ferrocènes présentant soit des groupes fonctionnels originaux, soit des motifs de substitution peu voire non étudiés.

### Prix Marc Julia

*Le prix Émergence Marc Julia est destiné à des jeunes ayant moins de 6 ans de métier de la recherche après la thèse.*



#### • Sophie Feuillastre

Titulaire d'un diplôme d'ingénieur en chimie organique et d'un master 2 Recherche de l'Université de Lyon en 2011, Sophie Feuillastre a préparé une thèse de doctorat à l'Université de Lyon (dir. Olivier Piva). Ses travaux ont porté sur la synthèse totale de molécules à forte valeur ajoutée (nhatrangine A et (+)-guaymasol) et sur le développement de nouvelles méthodes de synthèse basées sur des réactions de métathèse et de chimie radicalaire. Après l'obtention de son doctorat en 2014, elle effectue un postdoctorat au CEA (dir. Bernard Rousseau et Grégory Pieters) pour travailler dans le domaine du marquage isotopique avec les isotopes de l'hydrogène et sur le design de nouvelles molécules pour l'énergie. Début 2016, elle rejoint la société Cortecnet pour concevoir la synthèse de molécules marquées au carbone 13 et deutérium pour des applications en imagerie médicale. Elle intègre ensuite le CEA fin 2016 en tant qu'ingénieur chercheur dans l'équipe de Grégory Pieters pour développer de nouvelles méthodes de deutération/tritiation de molécules d'intérêt biologique mais aussi dans le domaine des matériaux. Elle est impliquée dans des projets collaboratifs nationaux et internationaux et coordonne le projet FET-OPEN FLIX n° 862179 (2020-2023) portant sur le marquage isotopique en flux continu.

### Prix Henri Kagan

*Les prix Henri Kagan et Dina Surdin récompensent des travaux de thèse.*



#### • Johanna Frey

Johanna Frey a réalisé sa thèse (soutenue en 2020) intitulée « Couplages C-N atroposélectifs catalysés au cuivre par utilisation d'iodes hypervalents » à l'Université de Strasbourg, encadrée par Joanna Wencel-Delord et Sabine Choppin. Ses travaux ont permis de mettre au point le premier couplage C-N atroposélectif métallo-catalysé, grâce aux sels de diaryliodonium en tant que partenaires de couplage « super électrophiles ». Dans un premier temps, l'utilisation de sulfoxydes chiraux comme inducteur de chiralité a permis de réaliser un couplage atropodiastéréosélectif catalysé au cuivre, puis une version atropoénantiosélective a été mise au point grâce à l'utilisation d'un complexe chiral de cuivre, portant un ligand chiral de la famille des bisoxazolines, et à l'ajout d'un acide de Lewis. Elle effectue actuellement un postdoctorat en Allemagne dans l'équipe de Lutz Ackermann à l'Université de Göttingen.

## Prix Dina Surdin



### • Charlotte Lorton

Charlotte Lorton a effectué sa thèse en chimie organique au sein de l'Institut de Chimie des Substances Naturelles (ICSN, Gif-sur-Yvette), sous la direction d'Arnaud Voituriez. Ses travaux s'articulaient autour du développement de nouvelles méthodologies

en organocatalyse asymétrique redox par les phosphines pour la synthèse de composés cycliques d'intérêt. Au cours de ces trois années, de nombreux substrats ont été investigués afin de mettre au point la première réaction tandem « addition de Michael/réaction de Wittig » catalytique en phosphine et hautement énantiosélective. Il s'est avéré que des dérivés trifluoropentane-2,4-diones couplés aux phosphines chirales HypPhos permettent d'allier réactivité et induction chirale. Ainsi, le premier procédé redox P(III)/P(V)=O hautement asymétrique a pu être développé pour la synthèse de cyclobutènes et de spiro-cyclobutènes fluorés isolés avec des excès énantiomériques atteignant 95 %. Après avoir soutenu sa thèse en 2020, elle a intégré l'équipe de John F. Bower à Liverpool afin de synthétiser de nouveaux complexes d'or(III) chiraux.

## Chimie physique

### Prix chercheur confirmé



### • Olivier Maury

Olivier Maury est directeur de recherche au CNRS au Laboratoire de Chimie de l'ENS-Lyon (UMR 5182). Il travaille sur la conception de colorants organiques et de complexes de lanthanides luminescents pour l'étude de

leurs propriétés spectroscopiques linéaires et non linéaires en partenariat étroit avec des chimistes théoriciens. Les applications ciblées par ces colorants sont variées, allant de l'imagerie profonde et la thérapie à la limitation optique dans le proche infrarouge, en passant par la cristallisation des protéines. De manière plus fondamentale, il étudie les processus photophysiques élémentaires (croisement inter-système, sensibilisation des lanthanides, polarisation des orbitales f, effets de symétrie, de modulation et de champ cristallin, corrélation magnétisme-fluorescence...). Ce positionnement à l'interface de la chimie, de la physique et de la biologie n'est possible que grâce à de nombreuses collaborations transverses.

### Prix Jeune chercheur



### • Jean-Nicolas Dumez

Jean-Nicolas Dumez est chercheur au Laboratoire Chimie et interdisciplinarité : synthèse, analyse, modélisation (CEISAM/Université de Nantes-CNRS).

Ses travaux de recherche ont pour objectif de développer de nouvelles méthodes de spectroscopie de résonance magnétique nucléaire (RMN), afin d'accéder à de nouvelles informations sur les mélanges hors équilibre et de permettre de nouvelles applications. La RMN présente plusieurs avantages pour l'analyse de mélanges, mais elle fait face également à un certain nombre de défis, tels

que la complexité des spectres de mélanges, la durée des expériences RMN multidimensionnelles et la sensibilité de la méthode. Pour répondre à ces défis, il a par exemple contribué au développement de la RMN diffusionnelle ultrarapide (UF DOSY) qui permet, en moins d'une seconde, de séparer les spectres RMN des composés d'un mélange, sans séparation des composés eux-mêmes. Ces travaux ont ainsi permis d'accroître l'information structurale obtenue par cette méthode, de travailler dans des solvants organiques, de rendre plus performante la séparation des spectres et d'analyser des substrats hyperpolarisés, pour un suivi plus riche des réactions chimiques et l'analyse plus complète de mélanges variés.



### • Marco Faustini

Marco Faustini est chercheur au Laboratoire de chimie de la matière condensée (LCMCP). Ses activités de recherche se situent dans le domaine des nanosciences, à l'interface entre la chimie et la physique de la matière condensée. Il combine des procédés « chimiques » – sol-gel, dépôt liquide, auto-assemblage, synthèse en solution de nanoparticules, etc. – et « physiques » (techniques de lithographie et de microfabrication) pour la nanofabrication de matériaux inorganiques et de MOF (« metal-organic frameworks ») pour des applications dans les domaines de la photonique et de l'électrocatalyse. Ce couplage permet de bénéficier des avantages des deux approches pour obtenir des dispositifs multi-échelles et multi-fonctionnels. Un autre axe majeur de ses recherches concerne l'étude de la réactivité et de l'évolution des matériaux par spectroscopie optique *in situ*. Pour ce faire, il contribue au développement d'une plateforme d'outils spectroscopiques tels que l'ellipsométrie UV-vis, l'ellipsométrie IR et la microscopie hyperspectrale équipée de chambres environnementales pour caractériser de façon dynamique les nanomatériaux.

### Prix de thèse



### • Suvasthika Indrajith

Diplômée de l'Université de Paris Saclay et titulaire d'un doctorat de chimie à l'Université de Caen Normandie (2020), Suvasthika Indrajith a consacré trois ans de recherches sur la croissance moléculaire des agrégats d'hydrocarbures linéaires induites par la collision avec des ions et des électrons, au sein du laboratoire CIMAP à Caen. Elle effectue actuellement un postdoctorat au sein du département de physique à l'Université de Stockholm (Suède), où elle réalise des travaux de physique expérimentale avec ions atomiques et moléculaires stockés dans l'infrastructure DESIREE (« Double electrostatic ion ring experiment »).

## Chimie du solide

### Prix Jeune chercheuse



### • Sophie Carencu

Sophie Carencu travaille dans le domaine des nanomatériaux et de la nanochimie\*. Au sein de l'équipe Nano du Laboratoire de Chimie de la Matière Condensée de Paris à Sorbonne Université, elle conçoit

des voies de synthèse pour la fabrication de nanoparticules contenant un ou plusieurs métaux ainsi que des éléments légers (carbone, phosphore, soufre). Elle s'intéresse particulièrement aux phases contenant des métaux réduits et présentant un caractère covalent ou iono-covalent (phosphures, carbures, oxysulfures). Son projet de long terme est de comprendre les restructurations de cœur et de surface des nanoparticules exposées à des stimuli extérieurs, tels qu'un changement d'environnement (chauffage, atmosphère...) ou une réaction chimique (réactivité). Cette approche permet d'aborder la question de la stabilisation de surface des nanoparticules dans leurs conditions d'usage (notamment via l'emploi de ligands organiques). C'est ainsi l'objet « nanoparticule » dans toutes ses dimensions qui est conçu, analysé et utilisé dans les applications, tant du côté du cœur inorganique que de la surface, dans des processus dynamiques.

\*Elle a également reçu cette année le prix Jeune chercheur DivCat-Arkema (voir n° 465, p. 58).

## Prix de thèse



### • Theodosios Famprakis

Theodosios Famprakis a réalisé ses travaux de thèse dans le domaine des électrolytes solides pour les batteries en collaboration entre le Laboratoire de réactivité et chimie des solides (LRCS-CNRS, Amiens), l'Université de Bath (R.-U.) et l'Université Justus Liebig (Giessen, All.), sous la codirection de C. Masquelier et M.S. Islam et financés par le réseau ALISTORE.

Ses travaux se sont concentrés sur le tétra-thio-orthophosphate de sodium ( $\text{Na}_3\text{PS}_4$ ), un composé très prometteur pour les applications dans les batteries solides au sodium. Ses résultats de diffraction (neutron et RX; Bragg et «total scattering») et spectroscopie (Raman, neutrons et impédance) en température ont mis en évidence l'existence d'un nouveau polymorphe de  $\text{Na}_3\text{PS}_4$ , existant entre  $500 < T < 750$  °C. En dépit de son comportement local caractéristique d'un liquide, le comportement à l'échelle macroscopique reste celui d'un solide, ce qui est la caractéristique d'un matériau mésophasique, c'est-à-dire un état de matière intermédiaire entre les états liquide et solide classiques. Il a aussi étudié l'effet de la synthèse mécano-chimique sur les propriétés de conduction de  $\text{Na}_3\text{PS}_4$ . Des mesures originales de conductivité en fonction de la pression appliquée ont permis de calculer le

volume d'activation pour la migration des ions  $\text{Na}^+$ . Ce critère, peu utilisé dernièrement dans le domaine, est caractéristique de l'expansion locale du réseau cristallin et dépend de ses propriétés mécaniques, apportant de nouveaux éléments et renforçant la connaissance des mécanismes fondamentaux de la conduction ionique dans l'état solide.

Il effectue actuellement un postdoctorat à l'Université de technologie de Delft (Pays-Bas).

## Manifestations

15-19 novembre 2021

GFP 2021

50 ans du Groupe français des polymères

Lyon & webconférence

Pour s'affranchir des aléas sanitaires, le 49<sup>e</sup> Colloque national du Groupe français des polymères se déroulera quasi intégralement en format virtuel. Au-delà du programme de conférences à distance (conférences invitées, communications orales), plusieurs sessions poster interactives seront organisées et tout sera mis en œuvre pour encourager les échanges entre participants.

Le programme scientifique reste quasiment le même que celui proposé en 2020, autour de sept thèmes : Ingénierie macromoléculaire : chimie et procédés ; Physique des polymères, physique avec des polymères ; Polymères pour la santé ; Polymères pour la transition énergétique ; Polymères et environnement ; Polymères et industrie ; Histoire(s) des polymères : 50 ans du GFP.

Conférenciers invités : Renaud Bouchet (LEPMI Grenoble), Alexandra Chaumonnot (IFPEN Solaize), Nicolas Giuseppone (ICS Strasbourg), Ruxandra Gref (ISMO Orsay), Alba Marcellan (Sorbonne Université - ESPCI Paris), Nida Othman (LAGEP Villeurbanne).

Les deux dernières sessions consacrées à l'histoire et l'anniversaire du GFP et aux applications industrielles des polymères seront organisées le 17 novembre ; il sera possible de s'inscrire uniquement à cette journée. La session de l'après-midi (Polymères et industrie) sera organisée en semi-présentiel (conférences retransmises en direct avec un public plus ou moins limité selon la situation sanitaire).

• <http://gfp2021.univ-lyon1.fr>

## Nouveau témoignage de chimistes

### À la rencontre de chimistes au Genoscope d'Évry, Centre national de séquençage (CEA)



Le Genoscope est un centre de recherche pluridisciplinaire dont l'objectif est l'étude des génomes des êtres vivants et de leur métabolisme.

Trois étudiants en chimie, Océane Touré (doctorante), Laurine Ducrot (doctorante) et Josemarco Mendoza Avila (master 2), présentent leurs recherches au sein du Laboratoire de biocatalyse, biorémédiation et métabolisme synthétique (UMR Génomique métabolique), sous la direction d'Anne Zaparucha. Ils développent des réactions chimiques catalysées par des enzymes issues de la biodiversité des micro-organismes étudiés au Genoscope par les biologistes.

• <https://youtu.be/hlCbN308vbE>

Retrouvez l'ensemble des vidéos sur la chaîne YouTube de la SCF : [www.youtube.com/user/SocChimFrance](http://www.youtube.com/user/SocChimFrance)

15-19 novembre 2021

## Journées de la division Chimie du solide

Visioconférence

Suite au report du congrès SCF 2021, les journées de la division se tiendront en distanciel lors de cinq matinées, avec pour objectif de favoriser les échanges interdisciplinaires et intergénérationnels dans le domaine très riche de la chimie du solide. Elles offriront tout particulièrement aux jeunes chercheurs (doctorants et postdoctorants) l'opportunité de présenter leurs travaux les plus récents.

Conférenciers invités : Angel M. Arevalo-Lopez (UCCS, Lille), Sophie Carencio (LCMCP, Paris), Géraldine Dantelle (Institut Néel, Grenoble), Manuel Gaudon (ICMCB, Bordeaux) et Gwenaëlle Rousse (UPMC, Paris).

• <https://dcs-2021.sciencesconf.org/>

22-26 novembre 2021

## ChemBio 2021

Le Touquet

Le nouveau groupement de recherche ChemBio propose une première école sur la thématique « Méthodes et concept en chémobiologie : utilisation d'outils moléculaires pour l'étude du vivant. »

Au programme: Chimie bioorthogonale: concepts et réactions; Chimie dans les cellules – chimie in vivo; Bio-conjugaison; Outils génétiquement encodés et approches chémogénétiques hybrides; Caractérisation de cibles et partenaires biologiques.

Intervenants : Christophe Biot (Univ. Lille), Eric Defrancq (Univ. Grenoble Alpes), Mélanie Etheve Quelquejeu (Paris), Arnaud Gautier (ENS-Sorbonne Université Paris), Florence Mahuteau-Betzer (Institut Curie, Orsay), Oleg Melnyk (Institut Pasteur Lille), Pierre-Yves Renard (Univ. de Rouen), Raphaël Rodriguez (Institut Curie, Paris), Sandrine Sagan (ENS-Sorbonne Université Paris), Frédéric Taran (CEA Saclay), Boris Vauzeilles (ICSN Gif-sur-Yvette), Alain Wagner (Faculté de pharmacie, Strasbourg).

• <https://ecole-chemobiologie2021.cnrs.fr>

29 novembre-1<sup>er</sup> décembre 2021

## 20<sup>e</sup> Journées de formulation

Compiègne

Ces journées sont co-organisées par le groupe Formulation de la SCF, l'unité de recherche « Transformations intégrées de la matière renouvelable » (TIMR UTC-ESCOM), le GdR Cosm'actifs du CNRS, en partenariat avec la SFR Condorcet et IAR, le Pôle de la bioéconomie, avec le concours financier de l'Université de Technologie de Compiègne (UTC), la SCF et la Région Hauts-de-France.

Sur la thématique « Substitution et reformulation - défis d'aujourd'hui, produits de demain », l'objectif de ces journées est de mettre en avant la transversalité des outils, des méthodes et des compétences permettant de lever les verrous scientifiques et techniques rencontrés dans la démarche de substitution de matières premières et du travail de reformulation des produits et des matériaux qui en découle. La conférence d'ouverture sera donnée par Jean-Marie Aubry, professeur émérite, École Nationale Supérieure de Chimie de Lille.

• <https://jf2021.utc.fr>

## « Le courant passe, faites de l'électrochimie à la maison »



### Prix de la Médiation scientifique 2021 de la SCF-IdF

C'est pendant le premier confinement, en 2020, que la division Chimie physique a proposé de mettre en place des expériences d'électrochimie à faire à la maison, en utilisant au maximum du matériel recyclé ou disponible en supermarché, magasin de bricolage, voire pharmacie. La série a ainsi été créée à des fins pédagogiques et scientifiques en cherchant à « revenir aux sources », pour mieux comprendre les concepts sous-jacents aux expériences d'électrochimie\*. Depuis, les épisodes se sont enchaînés, et les enseignants comme les étudiants (du L1 au M2, voire lycée) sont invités à participer !\*\*.

\* Retrouvez l'interview de ses fondateurs, Emmanuel Maisonhute et Dodzi Zigah : [https://youtu.be/zAU\\_d3x7slw](https://youtu.be/zAU_d3x7slw)

\*\* Contact : [emmanuel.maisonhute@sorbonne-universite.fr](mailto:emmanuel.maisonhute@sorbonne-universite.fr)

Retrouvez l'ensemble des épisodes sur la chaîne

YouTube de la SCF :

[www.youtube.com/user/SocChimFrance](http://www.youtube.com/user/SocChimFrance)

29 novembre-2 décembre 2021

## ElecMol

10<sup>th</sup> International conference on molecular electronics  
Lyon

La conférence rassemblera des chercheurs du monde entier autour de conférenciers invités de haut niveau pour échanger sur les avancées récentes dans le domaine de l'électronique moléculaire. Cette réunion est l'occasion de développer des collaborations nationales et internationales entre partenaires académiques et privés.

La conférence se concentrera sur les avancées récentes en électronique moléculaire et organique autour de huit domaines: Single molecule junctions, Memories & switches; Large area junctions, memories & switches; Organic electronics, optoelectronics & photonics: materials & device; 2D materials, nanotubes & nanowires; Self-assembly & supramolecular architectures; Scanning probe microscopies & near field approaches; Molecular theoretical modelling; Bioinspired approaches & biomimetic devices.

• <https://elecsmol20.sciencesconf.org>

Suivez les actus  
de la SCF, du RJ-SCF  
et de la chimie

Facebook Société Chimique de France

Twitter@reseauSCF

Facebook Réseau des Jeunes Chimistes-SCF

Twitter@RJ\_SCF



## Des matériaux qui stockent de l'hydrogène sans effort

L'hydrogène est aujourd'hui un élément clé de la transition énergétique [1]. Il est très abondant dans l'Univers avec 75 % en masse. Sur Terre, il se trouve principalement sous forme atomique dans les hydrocarbures et surtout dans l'eau. Pour l'obtenir sous forme moléculaire, le dihydrogène ( $H_2$ ) doit être produit par reformage du  $CH_4$  ou, plus vertueusement pour l'environnement, par électrolyse de  $H_2O$  grâce aux énergies renouvelables. L'hydrogène possède l'énergie massique la plus élevée de tous les combustibles : 120 MJ/kg, trois fois celle de l'essence. Son utilisation dans une pile à combustible avec l'oxygène comme comburant ne forme que de l'eau, sans émission de polluants.

Malgré ces avantages, le déploiement massif de l'hydrogène comme vecteur énergétique est freiné entre autres par le développement de moyens de stockage efficaces et compacts. Dans les conditions standards de température et de pression (CSTP : 25 °C, 1 bar), l'hydrogène est un gaz très léger avec une masse volumique de 0,081 kg/m<sup>3</sup>, soit 9.10<sup>4</sup> fois moins que l'essence (750 kg/m<sup>3</sup>). Pour atteindre des masses volumiques utiles, il faut rapprocher les molécules d'hydrogène éloignées de 3,45 nm dans les conditions CSTP par des méthodes physiques ou chimiques (voir *tableau*). Physiquement, on peut comprimer l'hydrogène jusqu'à 700 bar dans des réservoirs à haute résistance mécanique, ou encore le refroidir en dessous de -252 °C pour sa liquéfaction dans des réservoirs super-isolés thermiquement. Cependant, ces méthodes hyperbares et cryogéniques ont un coût énergétique important et posent des contraintes de sécurité.

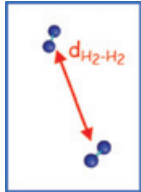
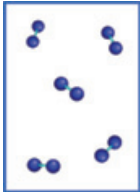
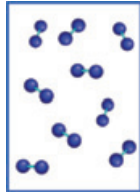
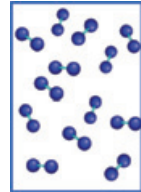
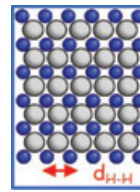
Une alternative intéressante à ces problématiques est de stocker l'hydrogène dans des matériaux, à l'état solide. Grâce au partage de son électron avec les atomes du matériau hôte, des distances interatomiques H-H très courtes (0,21 nm) sont accessibles, permettant théoriquement selon le critère de Switendick [2] d'atteindre des masses volumiques très

élevées (255 kg/m<sup>3</sup>). Ce critère résulte d'une compétition entre les forces répulsives H-H entre atomes d'hydrogène et les interactions attractives H-M avec des atomes métalliques. De plus, ce stockage solide dans les conditions CSTP constitue un avantage majeur en termes de sûreté par rapport aux stockages hyperbares et cryogéniques.

### Des composés capables d'absorber l'hydrogène sans effort

De nombreux matériaux peuvent stocker l'hydrogène à l'état solide sous forme atomique. Ils ont la propriété de dissocier spontanément le dihydrogène à leur surface, puis d'insérer les atomes d'hydrogène au sein de leur volume pour former des composés hydrogénés communément appelés hydrures. En fonction du type de liaison, ces composés peuvent se classer en trois familles d'hydrures ayant des énergies de liaison et des propriétés de stockage très différentes : ioniques, iono-covalents et métalliques.

Les métaux alcalins et alcalino-terreux forment des liaisons ioniques de forte énergie avec l'hydrogène. Des réservoirs à base de  $MgH_2$  ont été développés en France par l'Institut Néel de Grenoble (CNRS) et commercialisés par l'entreprise McPhy [3]. Toutefois, la décomposition de  $MgH_2$  requiert une température élevée (300 °C), ce qui réduit l'efficacité énergétique du système. Les hydrures iono-covalents sont formés de cations alcalins ou alcalino-terreux dont la charge est compensée par un complexe de coordination au sein duquel l'hydrogène est associé par liaison covalente à des éléments *p* (Al, B ou N). Parmi ces composés, l'alanate du sodium  $NaAlH_4$  reste le composé le plus intéressant grâce à des capacités réversibles massiques et volumiques notables ( $\rho_m = 5,6$  m.% et 70 kg/m<sup>3</sup>, respectivement) proches des CSTP. L'utilisation d'hydrures iono-covalents dans des réservoirs de stockage reste toutefois limitée à des études de laboratoire en raison de la difficulté

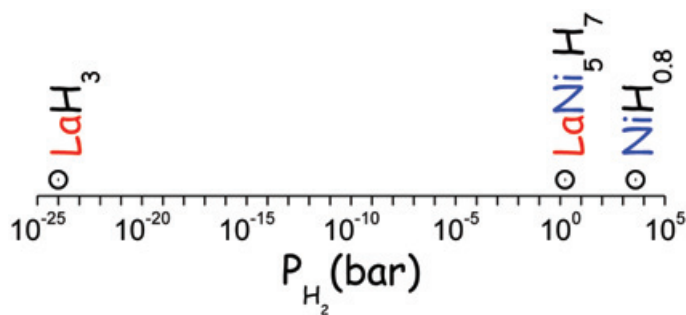
Méthodes	Gaz			Liquide	Solide**
Pression (bar)	1	350	700	1	1
Température (°C)	25	25	25	-253	25
Distance* (nm)	3,45	0,53	0,44	0,36	> 0,21
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	0,08	23	39	71	< 255
Distribution qualitative des molécules et atomes d'hydrogène***					

Masse volumique et distance caractéristique de l'hydrogène aux pressions et températures d'opération de différentes méthodes de stockage.

\*Distance intermoléculaire pour le stockage gaz et liquide ; distance interatomique pour le stockage solide.

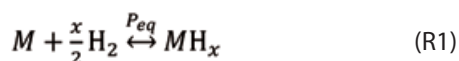
\*\*Stockage réversible en conditions CSTP pour certains composés intermétalliques.

\*\*\*Les sphères bleues et grises représentent respectivement les atomes d'hydrogène et de métal.



Pressions de formation des hydrides de lanthane, de nickel et de l'intermétallique LaNi<sub>5</sub> à 25 °C.

à adapter leurs propriétés thermodynamiques aux applications spécifiques [4]. Enfin, de très nombreux métaux de transition, les lanthanides ou encore les actinides, réagissent avec l'hydrogène pour former par réaction solide-gaz (R1) des hydrides métalliques MH<sub>x</sub> [5] :



Lors de la formation de ces hydrides binaires, les atomes d'hydrogène occupent des sites interstitiels du métal et transfèrent une partie de leur charge électronique aux métaux pour contribuer à la liaison métallique. Ils sont souvent non stœchiométriques ( $x$  non entier) et on peut les voir comme une solution solide de l'hydrogène dans le métal. Toutefois, pour des applications pratiques, très peu de métaux purs répondent aux critères de réversibilité CSTP. Seuls le palladium et, dans une moindre mesure, le vanadium y répondent, mais ce sont des métaux chers et critiques, peu accessibles. Avantagusement, la chimie du solide permet de combiner les métaux sous forme d'intermétalliques ou d'alliages et d'adapter ainsi leurs propriétés physico-chimiques. Ce principe se vérifie particulièrement bien dans le cas des hydrides métalliques. Pris séparément, les hydrides de lanthane et de nickel ont des pressions d'équilibre ( $P_{eq}$ ) très différentes à l'ambiante ( $\sim 10^{-24}$  et  $4 \cdot 10^3$  bar, respectivement). En dessous du point de fusion congruente (1 622 °C), ils s'allient pour former l'intermétallique LaNi<sub>5</sub>, dont la pression d'équilibre avec H<sub>2</sub> est alors de 1,7 bar à 25 °C. Ce résultat, bien que spectaculaire, s'explique facilement par une règle des leviers appliquée aux pressions relatives des éléments purs sur une échelle logarithmique (voir figure). De même, les quantités d'hydrogène absorbé par LaNi<sub>5</sub> ( $\sim 7$  H/mol) peuvent se déduire de la combinaison linéaire des capacités d'absorption des éléments purs (3 et 0,8 H/mol pour La et Ni, respectivement).

Ainsi, en variant les compositions des alliages, il est possible de former sans effort des hydrides métalliques offrant des propriétés thermodynamiques particulièrement bien adaptées aux conditions d'opération des applications visées [6].

## Une méthode de choix pour la gestion des énergies renouvelables

Compte tenu de leur aptitude à réagir spontanément et rapidement avec H<sub>2</sub> pour former des hydrides de grande capacité, les intermétalliques sont très largement étudiés pour des applications de stockage [7]. S'ils présentent des capacités volumiques très élevées,  $\rho_v \sim 120$  kg/m<sup>3</sup>, ils offrent des capacités massiques plus limitées,  $\rho_m < 3$  m.%, en raison du poids de la charpente métallique. De ce fait, leur usage est mieux adapté pour des applications stationnaires.

Plusieurs démonstrateurs, mais aussi des systèmes commerciaux, ont permis de démontrer les avantages des hydrides métalliques pour la gestion du stockage de l'énergie. Au Japon, Toshiba a mis sur le marché le système H2One™ [8], un dispositif combinant un électrolyseur alimenté par des énergies renouvelables, un stockage solide d'H<sub>2</sub> et une pile à combustible produisant de l'électricité, de la chaleur et... de l'eau. L'unité permet de stocker 200 Nm<sup>3</sup> d'H<sub>2</sub>, d'alimenter une pile à combustible de 3,5 kW et un ballon d'eau chaude de 200 L. L'Europe n'est pas en reste et propose également ses démonstrateurs. Ainsi, le projet européen HyCARE [9] développe un système capable de stocker 50 kg/H<sub>2</sub> dans un réservoir d'hydride métallique. Le projet est basé sur un concept innovant associant le stockage d'H<sub>2</sub> et de chaleur pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire l'empreinte du système complet. Ce démonstrateur sera mis en service en 2022 sur le site d'Engie Lab CRIGEN à Stains dans le nord francilien.

En conclusion, les hydrides métalliques permettent de développer des réservoirs très sûrs aux conditions ambiantes, fonctionnant sans apport d'énergie (au contraire de la compression ou la liquéfaction), et permettant de répondre à des besoins de stockage adaptés pour une gestion efficace des énergies renouvelables.

[1] F. Cuevas, J. Zhang, M. Latroche, *Engineering*, **2021**, 7, p. 715-718.

[2] A. Borgschulte, J. Terreni, E. Billeter, L. Daemen, Y. Cheng et al., *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, **2020**, 117, p. 4021-26

[3] M. Jehan, D. Fruchart, *J. Alloys Compd.*, **2013**, 580, p. S343-S348.

[4] B.A. van Hassel, D. Mosher, J.M. Pasini, M. Gorbounov, J. Holowczak et al., *Int. J. Hydrog. Energy*, **2012**, 37, p. 2756-66.

[5] K. Sköld, M.H. Mueller, T.O. Brun, in *Treatise on Materials Science & Technology*, G. Kostorz (ed.), Elsevier, **1979**, p. 423-460.

[6] *Hydrogen Storage Materials, Landolt-Börnstein: Numerical Data And Functional Relationships In Science And Technology, New Series (8)*, E. Burzo (ed.), **2018**.

[7] G. Sandrock, *J. Alloys Compd.*, **1999**, 293-295, p. 877-888.

[8] « Hydrogen-based Autonomous Energy Supply System » (H2One™), [www.toshiba-energy.com/en/hydrogen/product/h2one.htm](http://www.toshiba-energy.com/en/hydrogen/product/h2one.htm)

[9] « Hydrogen Carrier for Renewable Energy Storage » (HyCARE), **2019**, <https://hycare-project.eu/project>

Cette fiche a été réalisée par **Fermín CUEVAS** et **Michel LATROCHE**, directeurs de recherche, Université Paris Est Créteil, CNRS, ICMPE, Thiais (cuevas@icmpe.cnrs.fr ; michel.latroche@cnrs.fr).

Les fiches « Un point sur » sont coordonnées par Jean-Pierre FOULON (jpfoulon@wanadoo.fr). Elles sont regroupées et en téléchargement libre sur [www.lactualitechimique.org](http://www.lactualitechimique.org).

## Abonnez-vous pour un an (numéros spéciaux inclus)

Cochez la case qui correspond à l'abonnement auquel vous voulez souscrire :

	Abonnement papier + électronique*			Abonnement électronique seul*
	France métropolitaine	DROM-COM / Zone 1**	Zone 2**	
Particuliers	<input type="checkbox"/> 105 €	<input type="checkbox"/> 145 €	<input type="checkbox"/> 160 €	Particuliers <input type="checkbox"/> 55 €
Lycées	<input type="checkbox"/> 120 €	<input type="checkbox"/> 160 €	<input type="checkbox"/> 175 €	Lycées <input type="checkbox"/> 70 €
Institutions	<input type="checkbox"/> 205 €	<input type="checkbox"/> 245 €	<input type="checkbox"/> 260 €	Institutions <input type="checkbox"/> 155 €

\* Courriel obligatoire \*\* Zone 1 : Union européenne, Royaume-Uni et Suisse ; Zone 2 : reste du monde.

## Complétez votre collection

Les sommaires de tous les numéros peuvent être consultés sur notre site [www.lactualitechimique.org](http://www.lactualitechimique.org)

Tous les articles et numéros de plus de cinq ans sont téléchargeables gratuitement

**Numéros spéciaux** également disponibles en **version électronique** sur le site à un tarif préférentiel

### Dernières parutions :

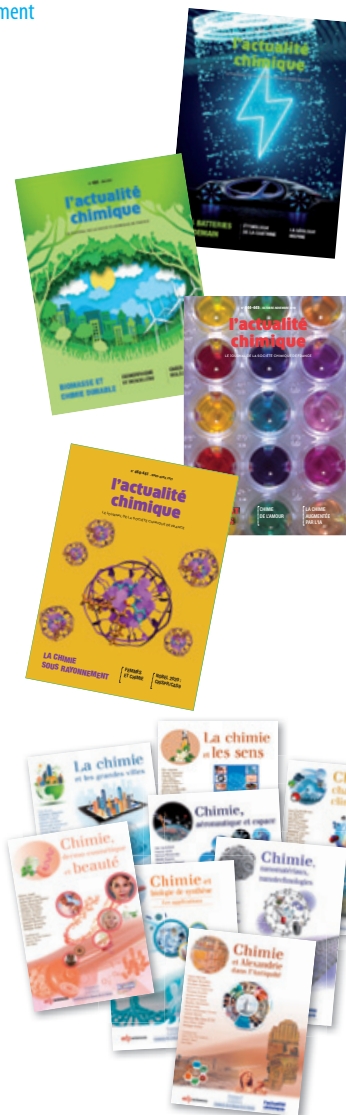
- De la chimie du solide aux batteries de demain (juillet-août 2021) : 20 €
- Substances naturelles et chimie durable (mai 2021) : 20 €
- Radiochimie et chimie sous rayonnement (mars-avril 2021) : 32 €
- Le jubilé du Groupe Français d'Études & d'Applications des Polymères (nov.-déc.-janv. 2020-2021) : 32 €
- Pigments et colorants (oct.-nov. 2019) : 32 €
- La montée en puissance de la RPE (sept. 2019) : 20 €
- Les applications actuelles de la calorimétrie (juin 2019) : 20 €
- Quelles réponses aux menaces chimiques, biologiques et radiobiologiques ? (mai 2019) : 20 €
- Les startups de la chimie (mars-avril 2019) : 32 €
- La chimie supramoléculaire (juin-juil.-août 2018) : 32 €
- Chimie et développement durable (mars-avril 2018) : 32 €
- Polymères de demain, boosters d'innovations (oct.-nov. 2017) : 32 €
- Chimie et miniaturisation (mai-juin 2017) : 32 €
- La sonochimie, ou comment les ultrasons font vibrer la chimie ! (sept. 2016) : 20 €
- Chimie et transition énergétique (juin-juil.-août 2016) : 32 €
- L'électrochimie au cœur des sciences (oct.-nov. 2015) : 32 €
- La chimie fête la lumière (juin-juil. 2015) : 32 €
- Chimie organique et moléculaire : les défis du XXI<sup>e</sup> siècle (fév.-mars 2015) : 32 €

### Collection "Chimie et...", co-éditée et diffusée par EDP Sciences

#### Dernières parutions :

- Chimie et lumière (janv. 2021) : 25 €
- Chimie et nouvelles thérapies (sept. 2020) : 25 €
- Chimie et Alexandrie dans l'Antiquité (janv. 2020) : 25 €
- Chimie, nanomatériaux, nanotechnologies (sept. 2019) : 25 €
- Chimie et biologie de synthèse - Les applications (janv. 2019) : 25 €
- Chimie, aéronautique et espace (sept. 2018) : 25 €
- La chimie et les sens (janv. 2018) : 25 €
- La chimie et les grandes villes (sept. 2017) : 25 €
- Chimie, dermo-cosmétique et beauté (janv. 2017) : 25 €
- Chimie et changement climatique (sept. 2016) : 25 €
- Chimie et expertise : santé et environnement (janv. 2016) : 25 €

À commander  
chez votre libraire  
ou directement sur  
[laboutique.edpsciences.fr](http://laboutique.edpsciences.fr)



## Bon de commande

Nom ..... Prénom .....

Adresse (pour les particuliers, préciser l'adresse personnelle) .....

Code postal ..... Ville ..... Pays .....

Tél ..... Courriel .....

Adresse IP (pour l'abonnement multiple).....

**Montant total de la commande (frais de port inclus) :**

### Mode de règlement

- sur facturation (joindre obligatoirement le bon de commande)
- par chèque bancaire ou postal libellé à l'ordre de la SCF  souhaite recevoir une facture acquittée
- par virement bancaire ou postal  
France Société Générale Paris Seine Amont, 03081/00037265820/87 CCP Paris 30041 Compte 070786U020/90  
Étranger IBAN FR7630003030810003726582087 Swift.Sogefrpp
- par carte bancaire (Visa, Eurocard Mastercard)   Validité   
Cryptogramme visuel (les trois derniers chiffres du numéro imprimé au dos)

L'Actualité Chimique

SCF, Service Abonnement, 250 rue Saint-Jacques, 75005 Paris - Tél. : 01 40 46 71 66/60.

[abonnement@lactualitechimique.org](mailto:abonnement@lactualitechimique.org) - [www.lactualitechimique.org](http://www.lactualitechimique.org)

