

Hydrogène : Énergie du Futur, Réalités d'Aujourd'hui

Extrait du numéro

- **Les enjeux de la décarbonation de l'hydrogène**
Edouard Sauvage
- **1970-2024 : l'émergence d'un écosystème de hydrogène décarboné**
Pascal Bain
- **Perspectives de l'hydrogène dans l'industrie en France et dans le monde**
Franck Avedissian
- **Hydrogène, sidérurgie et décarbonation : relocaliser ou importer massivement**
Alice Vieillefosse
- **Fabrication de stations à hydrogène et maillage du réseau**
Rémi Marthelot
- **Décarboner la production d'hydrogène : un enjeu majeur**
Marie Amory
- **L'hydrogène dans le monde**
Lamis Aljounaidi
- **ASSOCIATION : le groupe Ponts Energies**
- **ECOLE : Ponts Ambition 2030**

K E R I N G



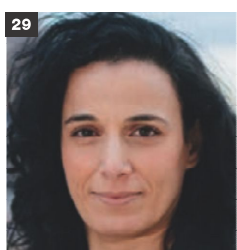
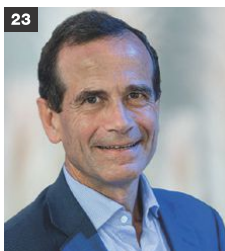
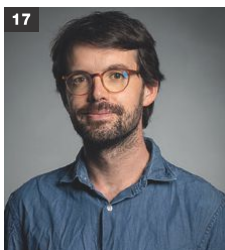
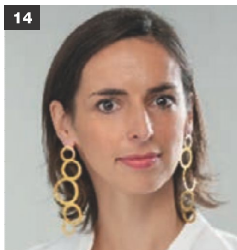
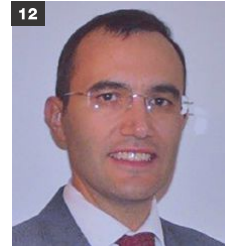
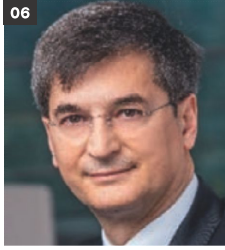
FAÇONNER LE LUXE DE DEMAIN

Kering s'engage à réduire ses émissions absolues de gaz à effet de serre de 40 % d'ici à 2035. Cet objectif représente une étape clé pour accélérer la mise en œuvre de sa vision d'un Luxe moderne.

Kering est le seul groupe de Luxe à avoir reçu la notation AAA du CDP pour 2023, qui reconnaît ses efforts en matière de réduction d'émissions carbone, de gestion de l'eau et de protection des forêts dans sa chaîne d'approvisionnement.

Gucci, Saint Laurent, Bottega Veneta, Balenciaga, Alexander McQueen, Brioni,
Boucheron, Pomellato, Dodo, Qeelin, Ginori 1735,
Kering Eyewear, Kering Beauté

[kering.com](https://www.kering.com)



SOMMAIRE

pam 25

Ponts Alumni Magazine

05 | **EDITO** Boris Rowenczyn

06 | **DOSSIER**

HYDROGÈNE : ÉNERGIE DU FUTUR, RÉALITÉS D'AUJOURD'HUI

06 | LES ENJEUX DE LA DÉCARBONATION DE L'HYDROGÈNE
Edouard Sauvage

08 | 1970-2024 : L'ÉMERGENCE D'UNE ÉCONOMIE DE L'HYDROGÈNE-ÉNERGIE
Pascal Bain

12 | PERSPECTIVES DE L'HYDROGÈNE DANS L'INDUSTRIE EN FRANCE
ET DANS LE MONDE
Franck Avedissian

14 | HYDROGÈNE, SIDÉRURGIE ET DÉCARBONATION : RELOCALISER
OU IMPORTER MASSIVEMENT
Alice Vieillefosse

17 | FABRICATION DE STATIONS À HYDROGÈNE ET MAILLAGE DU RÉSEAU
Rémi Marthelot

19 | CENTRALE ELECTRIQUE DE L'OUEST GUYANAIS, UNE SOLUTION POUR
DÉCARBONER LES MOYENS DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ
Fadi Selwan

23 | L'HYDROGÈNE DANS L'HISTOIRE DU GAZ: RUPTURE OU RETOUR
AUX SOURCES ?
Didier Holleaux

25 | DÉCARBONER LA PRODUCTION D'HYDROGÈNE : UN ENJEU MAJEUR
Marie Amory

27 | LES RÉSEAUX DE TRANSPORT D'HYDROGÈNE : UN ATOUT POUR
LA COMPÉTITIVITÉ DE L'INDUSTRIE FRANÇAISE DANS SA DÉCARBONATION
Anthony Mazzenga

29 | L'HYDROGÈNE DANS LE MONDE
Lamis Aljounaidi

31 | **VIE DES ENTREPRISES**

34 | **UN NOUVEAU BUREAU POUR LE GROUPE PONTS ÉNERGIES**

36 | **ASSOCIATION**

40 | **VITA COMMUNITATIS**



PAM
Ponts Alumni
Magazine
N°25
Avril 2024

RÉDACTRICE EN CHEF :
Camille Laborie

PHOTO DE COUVERTURE
ISTOCK

DIRECTEUR DE LA PUBLICITÉ :
Patrick Sarfati
Responsables de la publicité :
Laurent Fournier
Responsable Technique : Yael Sibony

**Nous ne nous
contentons
pas d'imaginer
un avenir
durable, nous le
construisons.**



**INDUSTRIEL DE PILES
À COMBUSTIBLE**



Dès 2025, notre usine française produira en série des piles à combustible hydrogène de forte puissance pour décarboner la mobilité lourde ferroviaire et maritime, ainsi que la production d'électricité pour les réseaux dans le monde entier.

www.hdf-energy.com

L'heure des paris

ÉDITO

Boris Rowenczyn

Le développement de la production et de l'usage de l'hydrogène est l'occasion, pour les alumni des Ponts, de relever de nouveaux et nombreux paris : paris technologiques (pour la production, le transport et l'utilisation de cette énergie), paris liés à l'aménagement du territoire (pour l'implantation des unités de production de l'hydrogène et des usines de fabrication des nouveaux moteurs et des nouveaux véhicules), paris environnementaux... Une fois de plus, l'occasion nous est donnée d'être au cœur de l'action et à tous les niveaux. À nous d'être au rendez-vous de cette nouvelle révolution industrielle.

De nouveaux paris, l'École des Ponts ParisTech s'en est elle aussi lancés : avec le projet « Les Ponts Ambition 2030 », qui vise à jeter les bases de ce qu'elle sera demain, ce ne sont pas moins de 12 chantiers qui ont été ouverts. La nouveauté de ce plan pour faire évoluer l'École

est que non seulement il concerne le projet éducatif, le cursus, les enseignements et le recrutement des élèves, mais qu'il vise aussi à « revivifier un collectif épanoui, solidaire et agile » ; il est vrai que l'implication du personnel, l'organisation interne, les processus et les outils dont l'École se dotera sont essentiels ; le facteur humain sera le paramètre de réussite clé de la transformation de cette belle institution dont nous pouvons être fiers. Nous profitons bien évidemment de ces lignes pour saluer l'ambition de l'École dans cet exercice de refonte en profondeur, et pour remercier son Directeur, Anthony Briant, pour avoir voulu impliquer Ponts Alumni dans la définition des profils de sortie, que nous serons amenés à recruter et qui accompagneront les futurs défis économiques.

Enfin, pour relever les défis qui se présentent à elle, Ponts Alumni s'est dotée d'une charte (disponible sur

ponts.org, rubrique L'association). Notre priorité est de renforcer les liens avec l'ensemble de notre communauté, que chacun puisse se reconnaître dans nos actions. Cette charte constitue la feuille de route de notre association pour les années à venir. Accompagner la transition vers un monde décarboné, jouer un rôle de premier plan dans tous nos secteurs d'expertise concernés par cette transition, mais aussi promouvoir les formations scientifiques rigoureuses qui seront indispensables pour nous orienter vers la sobriété et une plus grande solidarité sociale et entre les nations. Prenons le pari que nous réussirons ensemble !

Boris Rowenczyn (CIV 03)
Directeur général adjoint @Ginger
Vice-président de Ponts Alumni

Les enjeux de la décarbonation de l'hydrogène



Edouard Sauvage

Alors que nous vivons mois après mois des records historiques de température et constatons toujours plus d'événements climatiques extrêmes, nous sommes nombreux dans nos différents secteurs d'activités et tout spécialement au sein du groupe Ponts-Energie à œuvrer pour une économie toujours moins intensive en carbone. Et nous sommes également nombreux à être conscients de l'impérieuse nécessité de poursuivre les recherches dans tous les domaines, de déployer toutes les solutions accessibles à un coût acceptable et en matière énergétique de décarboner les vecteurs existants et de déployer de nouveaux vecteurs énergétiques décarbonés.

De par sa composition, son utilisation et sa production actuelle, l'hydrogène doit relever ces deux derniers défis et tout à la fois réduire son empreinte carbone actuelle et ouvrir le potentiel de nouveaux usages décarbonés.

Selon l'Agence Internationale de l'Energie, 95 millions de tonnes d'hydrogène sont actuellement consommées annuellement dans le monde principalement dans le raffinage de carburants et la

production d'ammoniac. Produites par vapo-réformage du gaz naturel ou gazéification du charbon, ces tonnes d'hydrogène émettent environ 900 millions de tonnes de CO₂ par an soit plus que les émissions cumulées de la France et de l'Allemagne. Capturer et stocker le carbone produit par vapo-réformage ou pyrolyse du méthane, produire de l'hydrogène par électrolyse avec une électricité bas-carbone ou par photolyse de l'eau, exploiter le potentiel d'hydrogène naturel issu de réactions chimiques dans les roches souterraines : autant de pistes concrètes sur lesquelles se mobilisent de nombreux acteurs en France et dans le monde.

Décarboner la production d'hydrogène permettra d'en développer les usages et de l'utiliser comme vecteur énergétique notamment dans l'industrie et les transports avec de nouveaux défis pour relier zones de production et lieux de consommation de l'hydrogène avec la possibilité de transformer des gazoducs existants pour ce nouvel usage et la nécessité de réaliser un maillage efficace de points de livraison pour développer l'usage dans les Transports. Mener en

parallèle projets de production décarbonée, déploiement d'infrastructures y compris internationales et développement des usages est un immense défi sur lequel se mobilisent pouvoirs publics et acteurs privés.

Je remercie vivement tous les contributeurs à ce numéro du PAM25 sur l'hydrogène et j'espère que la lecture de ces articles vous éclairera sur les espoirs et les défis liés à l'économie de l'hydrogène.



Edouard Sauvage (X-Ponts 89)
Directeur général adjoint @Engie
Co-animateur du groupe Ponts
Énergies



Fondation
des
Monastères

UN DÉFI PLEIN D'AVENIR

**Sauvegarder le patrimoine
des communautés monastiques
avec la Fondation des Monastères**

Tout don ouvre droit à des réductions fiscales, dans le cadre de l'IR, de l'IS et de l'IFI
Legs, donations et assurances vie sont exonérés de droits de mutation

01 45 31 02 02

www.fondationdesmonasteres.org

**Fondation des Monastères - 14 rue Brunel - 75017 Paris
fdm@fondationdesmonasteres.org**

Fondation reconnue d'utilité publique par décret du 21 août 1974,
exclusivement financée par la générosité de donateurs privés ou d'entreprises.
Ses comptes sont certifiés par le Cabinet Mazars.

1970-2024 : l'émergence d'une économie de l'hydrogène-énergie

R&D

Pascal Bain

Si les perspectives de déploiement d'une économie de l'hydrogène dans le cadre du mix énergétique sont fortement soutenues depuis quelques années par l'Etat dans le cadre de la stratégie nationale sur l'hydrogène décarboné du plan France 2030, cela n'a pas toujours été le cas, et le domaine de l'hydrogène-énergie¹ a connu un certain nombre de cycles d'engouement puis de désillusions, au gré des avancées scientifiques et technologiques.

Pascal Bain (X-Ponts 96),
Responsable du département
Sciences physiques, Ingénierie,
Chimie et Energie (SPICE)
de l'Agence Nationale de la
Recherche (ANR)

■ Une histoire chaotique où la recherche a joué un rôle majeur

L'hydrogène-énergie est même longtemps apparu comme une curiosité qui se cantonnerait à des applications de niches spécifiques, comme l'utilisation de piles à combustible dans les missions spatiales Gemini et Apollo. Cependant, à partir de 1973, suite au premier choc pétrolier, ce point de vue change et des programmes de recherche sur les piles à combustible sont soutenus de manière importante aux Etats-Unis, au Japon et en Europe. Mais dès le début des années 80, en raison de désillusions techniques et de verrous que la recherche n'a pas réussi à lever aussi rapidement qu'espéré (coût excessif des catalyseurs et des membranes, faible durée de vie, volume et poids trop importants pour l'utilisation dans les véhicules), on rentre dans une période de dépression, notamment en France, où les programmes sont arrêtés en 1981, au profit d'investissements dans la R&D sur le stockage électrochimique.

Les recherches sont vraiment relancées au début des années 90, suite

à des progrès technologiques ainsi qu'à la prise de conscience des enjeux de réduction des émissions de gaz à effet de serre, tout d'abord au Japon avec la mise en place d'un programme ambitieux de soutien à la R&D (*New Sunshine*), démarré en 1992, puis par le Canada et les Etats-Unis, suivis en 1999 par la création en France du réseau technologique PACo (Piles A Combustible), doté d'un budget de 10 millions d'euros. Ce réseau PACo est mis en place par le comité interministériel sur la recherche, en partie à la demande des constructeurs automobiles nationaux, déçus par les performances atteintes alors par les batteries, afin de fédérer les acteurs, publics et privés, de la R&D du secteur et de « remettre à niveau » la France sur ce sujet.

Au moment de cette relance mondiale de la R&D, au milieu des années 90, l'ambition affichée était de 100 000 voitures à pile à combustible vendues

¹ L'hydrogène, obtenu principalement à partir du gaz naturel, est depuis longtemps massivement utilisé dans certains secteurs industriels comme la pétrochimie. Ici, on parle de l'hydrogène vu comme vecteur énergétique (et produit à partir de sources d'énergie non carbonées).

à l'horizon 2005. L'idée qui prévalait et qui a prévalu jusqu'à la fin des années 2000, était que l'hydrogène et les piles à combustible allaient se substituer, à terme, au couple pétrole-moteur à combustion interne pour l'ensemble des véhicules routiers.

Au réseau PACo a succédé le programme PAN-H (Plan d'Actions National sur l'Hydrogène), mis en œuvre par l'Agence Nationale de la Recherche dès sa création en 2005. Ce programme faisait partie d'un ensemble d'actions destinées à soutenir massivement la recherche pour le développement des « nouvelles » technologies de l'énergie en France (bioénergies, solaire photovoltaïque, hydrogène et piles à combustible) ainsi que l'efficacité énergétique dans les transports et les bâtiments. Il a permis de financer 89 projets entre 2005 et 2010, pour une aide financière totale attribuée par l'Agence d'environ 100 millions d'euros, permettant d'explorer des solutions couvrant l'ensemble de la chaîne de valeur, depuis la production d'hydrogène par électrolyse jusqu'à ses usages dans des piles à combustible à haute ou basse température, en passant par différents modes de stockage (liquide, gazeux, solide).

Malheureusement, le changement de stratégie des constructeurs automobiles et leur désengagement, à partir de 2008, a constitué un nouveau coup de frein à cette dynamique. Le domaine n'a plus fait l'objet d'un programme dédié à l'ANR à partir de 2011, et les financements qui y ont été accordés se sont progressivement étiolés. Heureusement, le soutien européen via le programme *Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking* (FCH JU), lancé en 2008, a permis de continuer à soutenir des travaux de recherche d'équipes françaises et ne pas perdre totalement les acquis et compétences développés dans la période précédente. Après cette période de repli au niveau national, ce domaine a de nouveau

connu un regain d'intérêt de la part des entreprises et des pouvoirs publics à partir de 2015, pour culminer avec l'annonce le 1^{er} juin 2018 d'un Plan Hydrogène par Nicolas Hulot, alors ministre de la Transition Ecologique et Solidaire. A ce Plan a succédé la stratégie nationale d'accélération actuelle, accompagnée d'un fort soutien budgétaire. Ce regain d'intérêt pour les technologies de l'hydrogène s'est aussi manifesté du côté de la recherche amont, avec davantage de projets financés par l'ANR depuis 2018 et, depuis 2022, la mise en place d'un Programme et Equipement Prioritaires de Recherche (PEPR) « hydrogène décarboné », associé à la stratégie nationale d'accélération.

■ De la recherche amont à des technologies matures, un long fleuve loin d'être tranquille

L'idée même d'une économie de l'hydrogène-énergie a toujours eu ses détracteurs. Il est vrai que la vision d'un hydrogène qui se substituerait massivement au pétrole, telle que portée par Jeremy Rifkin, pouvait apparaître démesurément ambitieuse et irréaliste à moyen terme et prêter aux critiques. Les reports des échéances et des calendriers de mise sur le marché et de déploiement massif ont évidemment donné des arguments à ces détracteurs ou sceptiques, qui mettaient en avant les très nombreux défis à relever, technologiques, de sécurité, économiques mais surtout la complexité d'un tel déploiement². La stratégie nationale actuelle, qui

² Un argument souvent utilisé dans ces controverses sur l'hydrogène-énergie est celle de la poule et de l'œuf : en effet, le déploiement d'une économie basée sur l'hydrogène suppose qu'on puisse, quasi concomitamment, couvrir toute la chaîne de valeur, depuis sa production à partir des énergies renouvelables, jusqu'à son utilisation en passant par son stockage et sa distribution alors qu'aucun de ces maillons n'existe déjà à large échelle.

BIO

Ingénieur en Chef des Ponts, Eaux et Forêts (ICPEF), Pascal Bain est diplômé de l'Ecole Polytechnique (X91), de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et titulaire d'une thèse en physique théorique effectuée au Laboratoire de Physique Théorique de l'Ecole Normale Supérieure de Paris. Après un post-doctorat à Cambridge, il poursuit sa carrière au Ministère en charge de l'Equipement pendant cinq ans (2002-2007) puis à l'ANR qu'il rejoint en 2008 pour mettre en œuvre le programme thématique « Villes et Bâtiments durables » en 2011. Il occupera respectivement les postes de Responsable de ces programmes thématiques (2008-2013), Responsable-adjoint du département scientifique « Energie durable » (2010-2014), puis Responsable-adjoint du département scientifique « Sciences Physiques, Ingénierie, Chimie et Energie » à partir de 2014. Il est également, depuis 2017, référent thématique pour le domaine de l'énergie au sein de la Direction des Grands Programmes d'Investissements de l'État (DGPIE).





fiabilité ou de longévité) ou faute d'intérêt d'industriels pour prendre le relais.

Dans d'autres cas, c'est la réduction des efforts de soutien à la R&D, notamment dans les années 2010, qui a conduit à d'importantes réductions des budgets de recherche au niveau national, retardant ainsi ce développement. Un exemple typique est celui de l'électrolyse et des piles à combustible basées sur les matériaux céramiques à conduction protonique. Deux projets successifs soutenus par l'ANR entre 2006 et 2008 (TECTONIC et CONDOR³) qui avaient permis d'aboutir à une preuve de concept convaincante n'ont pu être soutenus au niveau national suite à l'arrêt du programme Pan-H. Des compétences de plusieurs des équipes impliquées dans ces projets ont été perdues ou réservées et ont pu être récemment remobilisées avec le financement du projet PROTEC⁴ dans le cadre du PEPR

POUR POURSUIVRE LA LECTURE et être assuré de recevoir les prochains numéros

adhère dès maintenant à Ponts Alumni!

Tarifs d'adhésion 2024

j'adhère en ligne

« Il est nécessaire d'investir sur des temps longs en recherche pour permettre à une technologie d'émerger »

visé à un déploiement progressif en domaines spécifiques qui ne pourront pas s'appuyer seulement sur des batteries comme le transport... ent, privilégie les batteries pour les... mais risquées, qui échoueront dans un nombre significatif de cas,

Les échecs peuvent être de différentes natures : certains travaux... projets ont permis de démontrer la faisabilité en laboratoire, à petite échelle, dans des conditions particulières mais, au final, la technologie n'a pas été développée car elle n'a pas réussi à faire ses preuves en termes de maturation technologique et de passage à des échelles plus réalistes de mise en œuvre ou d'utilisation (par exemple, par rapport à des enjeux de fabrication, de coûts, de

des équipes impliquées dans ces projets... réservés et ont pu être récemment remobilisées avec le financement du projet PROTEC⁴ dans le cadre du PEPR... avec des premiers résultats très prometteurs.

Cet exemple souligne d'une part la nécessité d'investir sur des temps longs en recherche pour permettre à une... d'augmenter et, d'autre part, la valeur des compétences acquises au cours de ces travaux, potentiellement réutilisables pour d'autres développements fondés sur cette expertise.

Un aspect important de ces recherches concerne le paysage industriel actuel du domaine, en phase de consolidation, qui serait vraisemblablement très différent sans les investissements en recherche passés : en effet, beaucoup des jeunes entreprises aujourd'hui visibles et prometteuses dans ce domaine ont émergé

3 <https://anr.fr/Projet-ANR-08-PANH-0004>
4 <https://www.pepr-hydrogene.fr/projets/protec/>