

L'HYDROGÈNE DÉCARBONÉ



Un défi pour la transition énergétique

L'hydrogène décarboné

Un défi pour la transition énergétique

Lavoisier
TEC & DOC

editions.lavoisier.fr

Images de couverture :
Sandrine Boisleux
Claire Buisson
Sullyvan Compte
Sandrine Dyèvre
Eloïse Huard
EIFER

© 2019, Lavoisier, Paris
ISBN : 978-2-7430-2477-2

Auteurs

Cet ouvrage est le fruit d'un travail collaboratif de 6 chercheurs et spécialistes du domaine à EDF. Il se veut le reflet pédagogique de leur savoir et expérience.

Fabien Bricault

Fabien Bricault occupe les fonctions de chargé d'étude économique et de chef de projet à la Direction Recherche et Développement d'EDF. Il est diplômé de l'Université Paris-Saclay en Économie de l'Innovation et des Réseaux. Depuis 2007 à la R&D d'EDF, ses travaux couvrent l'analyse stratégique et la définition de modèles économiques pour l'entreprise, spécifiquement pour l'intégration des Smart Grids et du stockage de l'énergie. Il a participé à plusieurs chantiers externes dont le plan Réseaux Électriques Intelligents. Il est également enseignant rattaché à l'Université Paris-Saclay (Master Ingénierie de l'Innovation) sur les questions d'analyse stratégique.

Annabelle Brisse

Après sa thèse en électrochimie au Commissariat aux énergies alternatives et énergie atomique avec l'université Joseph Fourier, Grenoble (2006), Annabelle Brisse intègre l'Institut européen de recherche sur l'énergie (EIFER), premier centre R&D d'EDF à l'international situé à Karlsruhe, en Allemagne. Elle y développe l'activité de caractérisation expérimentale des systèmes céramiques d'électrolyse et

de pile à combustible. Après 2 ans de contributions dans des projets à financement publics nationaux et européens, elle prend la gestion du projet R&D dédié aux technologies de l'hydrogène. De 2008 à 2018, l'envergure du projet s'élargie en intégrant aux développements technologiques, des projets de démonstrations ayant pour usage final de l'hydrogène l'industrie, le transport ou le stockage d'énergie. En 2018 elle est nommée expert EDF des technologies hydrogène de pile à combustible et d'électrolyse de l'eau et prend en parallèle la gestion du projet R&D sur la mobilité électrique à hydrogène visant à analyser les coûts de possession de ces différents modes de transport, terrestres et non terrestres, et leurs schémas de développement.

David Colomar

Passionné par la transition énergétique, David Colomar travaille depuis 10 ans dans le secteur de l'hydrogène. Il est diplômé de l'INSA Lyon et a étudié l'énergétique et l'environnement en France, en Allemagne et au Royaume-Uni. Il est responsable de projets chez EIFER (Karlsruhe), au cœur de la recherche industrielle franco-allemande. Il a réalisé de nombreuses analyses technico-économiques pour de grands comptes de l'énergie, et piloté des projets de recherche et de démonstration dans la mobilité hydrogène, la micro-cogénération et le « power-to-gas ». Il coordonne plusieurs projets de recherche collaboratifs internationaux et représente EIFER au sein d'associations et de groupes de travail nationaux et européens, tels que l'AFHYPAC et le FCH-JU.

Dominique Lafond

Dominique Lafond est chef de projet à la Direction Recherche et Développement d'EDF. Elle est diplômée de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris. Embauchée à la R&D d'EDF en 1997, depuis 2009 elle travaille sur la modélisation des systèmes énergétiques européens et français et les potentiels technico-économiques de décarbonation de ces systèmes.

Mathieu Marrony

Diplômé en 2004 d'un Doctorat en Chimie des Matériaux de l'Université de Montpellier (France), Mathieu MARRONY possède plus de 15 ans de travaux et d'expertise scientifique sur les technologies de l'électrolyse et de la pile à combustible à portée nationale et internationale (plus de 30 articles scientifiques publiés, 2 brevets, plus de 40 interventions, dont une dizaine en tant qu'invité, au sein de Conférences internationales, coordinateur de projets à financement publics nationaux, membres de jurys de thèses, membres de Comités décisionnels à l'échelle européenne...). Arrivé à l'institut EIFER en 2004 en tant qu'Ingénieur de Recherche, il a depuis mené et orienté les travaux de recherches liés à l'usage de l'hydrogène dans la pile à combustible pendant plus de 10 ans. Il occupe désormais la fonction de Chef de Groupe coordonnant toutes les activités R&D d'EIFER et du groupe EDF liées à la thématique Hydrogène.

Christelle Rouillé

Diplômée de l'École Supérieure des Sciences Économiques et Commerciales d'Angers et de l'Université Économique de Vienne (Wirtschaftsuniversität), Christelle Rouillé travaille au sein du groupe EDF depuis plus de 20 ans. Elle a débuté sa carrière à la Direction Internationale et a rejoint en tant que Key Account Manager la Direction Commerce. En 2009, elle rejoint la filiale EDF Renouvelables (anciennement EDF Energies Nouvelles), entité du groupe EDF en charge des énergies renouvelables où elle occupe d'abord le poste de Directrice des Partenariats puis ensuite de Directrice Business Development de l'Europe et de l'Asie pour la filiale Exploitation et Maintenance d'EDF Renouvelables. En Septembre 2017, Christelle Rouillé intègre la toute nouvelle entité créée par le Groupe, EDF Pulse Croissance (anciennement EDF Nouveaux Business), en charge de développer les futures et nouvelles activités du Groupe et en faire des leviers de

croissance. Elle y occupe la position de Directrice Stratégie et Coordination métiers. En 2018, Christelle Rouillé développe un projet intrapreneurial pour la création d'une nouvelle filiale dédiée à l'hydrogène bas carbone. Christelle Rouillé devient la Directrice Générale de cette filiale 100 % EDF, Hynamics, créée en 2019.

Table des matières

Auteurs	III
Introduction	1
1. L'hydrogène, un acteur de la transition énergétique ?	5
1.1. Économie actuelle, marchés et acteurs	7
1.2. Le rôle possible de l'hydrogène dans la décarbonation de l'économie.....	9
1.3. La place de l'hydrogène électrolytique dans les politiques publiques.....	13
2. Les systèmes de production d'hydrogène décarboné	19
2.1. Pureté de l'hydrogène	21
2.2. Production décarbonée à partir d'eau et d'électricité.....	24
2.2.1. <i>Production d'hydrogène par thermolyse</i>	24
2.2.2. <i>Production d'hydrogène par photocatalyse</i>	26
2.2.3. <i>Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau</i>	28
2.3. Production décarbonée à partir de biomasse.....	40
2.3.1. <i>Production par pyrolyse et gazéification de biomasse</i>	41
2.3.2. <i>Reformage de biogaz</i>	43
2.3.3. <i>Production d'hydrogène par la filière thermochimique</i>	44
2.3.4. <i>Production d'hydrogène par les procédés biologiques</i>	45
2.4. Production carbonée à partir d'hydrocarbures, avec captage et stockage du CO ₂	47
2.4.1. <i>Quand la décarbonation passe par le captage et le stockage géologique du CO₂</i>	48

2.4.2. Production d'hydrogène par reformage d'hydrocarbures à associer au captage et stockage du CO ₂	50
2.4.3. Autres procédés de production d'hydrogène carboné à associer au captage et stockage du CO ₂	57
3. Conditionnement de l'hydrogène	61
3.1. Sécurité.....	61
3.1.1. Spécificités de l'hydrogène.....	61
3.1.2. Normalisation	63
3.1.3. Réglementation.....	66
3.2. Stockage.....	72
3.2.1. Stockage physique de l'hydrogène	73
3.2.2. Stockage de l'hydrogène en utilisant des matériaux... ..	76
3.2.3. Stockage de l'hydrogène en cavités géologiques.....	79
3.3. Distribution	80
3.3.1. Transport par canalisations.....	81
3.3.2. Transport routier ou ferroviaire	82
3.3.3. Transport par bateaux.....	84
4. Comparaison des différentes filières de production	87
4.1. Consommation d'énergie pour produire l'hydrogène.....	87
4.2. Émissions de CO ₂ pour produire l'hydrogène	88
4.3. Compétitivité des différentes filières.....	90
4.3.1. L'hydrogène à partir d'hydrocarbures et biomasse	90
4.3.2. L'hydrogène à partir d'électricité.....	93
5. Quels usages pour l'hydrogène décarboné ?	97
5.1. L'hydrogène pour décarboner l'industrie.....	100
5.1.1. L'hydrogène marchand	102
5.1.2. L'hydrogène captif	102
5.2. L'hydrogène pour décarboner les transports.....	103
5.2.1. La mobilité électrique zéro émission à pile à combustible	103
5.2.2. La mobilité légère	108
5.2.3. La mobilité lourde	111
5.2.4. Stations-service et prix de vente de l'hydrogène pour la mobilité.....	123
5.3. L'hydrogène pour décarboner les bâtiments ?	125
5.4. Apport de l'hydrogène au système électrique.....	128
5.4.1. Les systèmes électriques isolés	129
5.4.2. La flexibilité du système électrique, un intérêt pour l'électrolyseur ?	131

5.4.3. Le stockage de l'électricité et l'hydrogène	137
5.4.4. Autres apports de l'hydrogène au système électrique.....	140
5.4.5. Que retenir des perspectives économiques ?.....	142
Conclusion	143
Glossaire	147

Introduction

Mis en évidence à la fin du 18^e siècle par Lavoisier, l'hydrogène est désormais un gaz largement utilisé dans l'industrie. Il représente aujourd'hui un marché mondial de plus de 60 millions de tonnes par an, dont plus de 900 000 tonnes par an en France. A la fois vecteur énergétique, carburant, matière première, stockable et transportable, près de 96 % de cet hydrogène est actuellement produit à partir de matières premières d'origine fossile : ce sont entre 10 et 15 kilogrammes de CO₂ qui sont émis par kilogramme d'hydrogène. Dans le contexte de la lutte contre le changement climatique et de la décarbonation de l'économie, un enjeu est donc de « décarboner » l'hydrogène. Et le moyen le plus prometteur pour produire de l'hydrogène non carboné est de dissocier la molécule d'eau par un procédé d'électrolyse à l'aide d'une source d'électricité elle-même décarbonée.

Il est donc essentiel de privilégier ce moyen de production d'hydrogène produit par électrolyse à partir d'électricité décarbonée. L'Europe et la France possèdent de nombreux atouts pour contribuer à cette ambition tant académique qu'industrielle. En France, le CEA, le CNRS et plusieurs industriels, avec le soutien de la Banque Publique d'Investissement, ont initié la structuration d'une plateforme pour coordonner les compétences, moyens d'essais et plateformes expérimentales disponibles en

France. En parallèle, le Groupe EDF dispose d'une expertise et d'un savoir-faire de longue date dans le domaine de l'hydrogène. En Allemagne, une équipe investigate les technologies de l'hydrogène électrolytique, tant pour la production que pour les usages, depuis plus de quinze ans au sein d'EIFER, un institut de recherche commun entre EDF et le Karlsruhe Institute of Technology. Les équipes la Recherche et Développement d'EDF ont développé des compétences dans l'intégration des outils de production d'hydrogène par électrolyse dans les systèmes électriques.

En complémentarité de ces travaux, EDF entend s'appuyer sur des partenariats technologiques forts à l'instar de McPhy, entreprise française basée dans la Drôme, qui fabrique et commercialise des électrolyseurs et des stations de recharge hydrogène en France, en Europe et en Chine.

En outre, le Groupe EDF a franchi début 2019 une nouvelle étape dans son engagement en faveur de l'hydrogène bas carbone par la création d'une nouvelle filiale 100 % EDF dédiée à l'hydrogène décarboné : Hynamics. Son objectif est de développer ses activités sur les deux pans de l'économie les plus émetteurs de carbone : l'industrie (raffineries, verreries, industrie de l'agro-alimentaire...) d'une part et les transports, à travers la mobilité publique et professionnelle (bus, trains, navettes fluviales, bennes à ordures ménagères...) d'autre part. Cela dans une démarche territoriale et de construction d'écosystèmes alliant les investisseurs publics et privés, ainsi que des collectivités territoriales.

En cohérence avec la loi de Transition Energétique Croissance Verte (LTECV), le Plan Hydrogène proposé par N. Hulot en 2018 pour le déploiement de l'hydrogène bas carbone, et dans le cadre de la Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE), EDF s'engage ainsi dans la création d'une filière forte, européenne et d'excellence

pour promouvoir ce nouveau domaine industriel : l'hydrogène bas carbone.

C'est le thème de ce livre qui s'appuie sur les connaissances et le savoir-faire d'un collectif de chercheurs d'EDF pour ouvrir des pistes et livrer des clés d'analyse. Il présente les spécificités de l'hydrogène et dresse un panorama détaillé des technologies de production d'hydrogène décarboné, en marquant une distinction claire entre les systèmes de production nécessitant la captation du CO₂, les systèmes dits « neutres en carbone » et les systèmes de production décarbonée.

Remerciements à l'ensemble des auteurs :

Cet ouvrage est le fruit d'un travail collaboratif de chercheurs d'EDF spécialistes du domaine : Fabien Bricault, Annabelle Brisse, David Colomar, Dominique Lafond et Mathieu Marrony, ainsi que de la participation de Christelle Rouillé.

Il a été coordonné par Etienne Brière, Jean-Paul Chabard, Sandrine Dyèvre, François Molho et Bernard Salha.



À la fois vecteur énergétique, carburant, matière première, stockable et transportable, l'hydrogène est aujourd'hui produit à 96 % à partir de matières premières d'origine fossile. Produite à partir d'électricité décarbonée, il devient un enjeu de la transition énergétique.

L'hydrogène, ses modes de production et son conditionnement, sa distribution, ses usages et ses limites sont présentés dans ce livre. Un ouvrage facilement accessible pour tout savoir sur ce combustible d'aujourd'hui et de demain.

