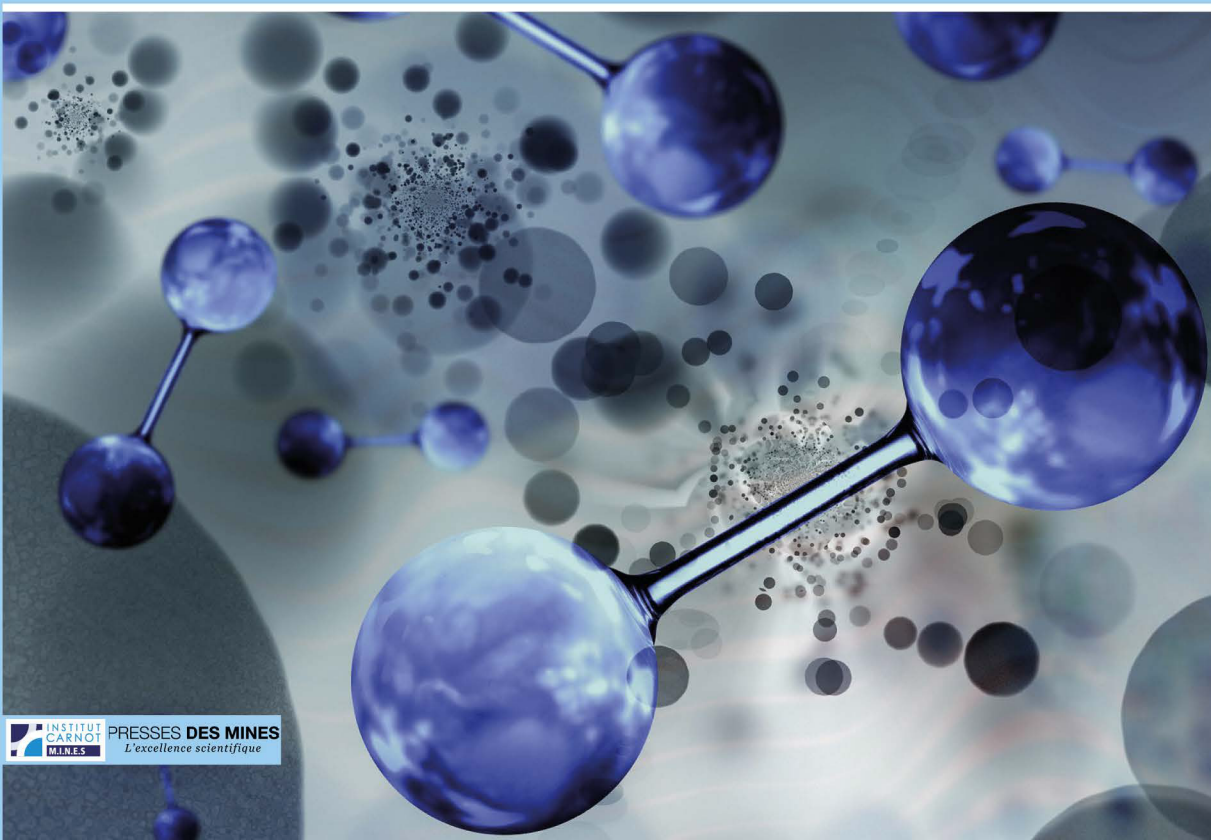


Produire, stocker et utiliser l'hydrogène

Synthèse du projet HyTREND

Sous la direction de Christian Beauger



Sous la direction de Christian Beauger, *Produire, stocker et utiliser l'hydrogène. Synthèse du projet HyTREND*, Paris, Presses des Mines, collection DISSÉM.I.N.E.S, 2025.

© Presses des MINES – TRANSVALOR, 2025.
60, boulevard Saint-Michel – 75272 Paris Cedex 06.
presses@minesparis.psl.eu
www.pressesdesmines.com

ISBN : 978-2-38542-728-3
Dépôt légal : 2025
Achevé d'imprimer en 2025 (Paris)

Photo de couverture : © Pixabay

Cette publication a bénéficié du soutien de l'Institut Carnot M.I.N.E.S.
Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et d'exécution réservés pour tous les pays.

Produire, stocker et utiliser l'hydrogène

Sous la direction de Chistian Beauger

Produire, stocker et utiliser l'hydrogène

Synthèse du projet HyTREND



PRESSES **DES MINES**
L'excellence scientifique

• Table des matières •

Abréviations	15
Chapitre I – La filière hydrogène.....	17
Chapitre II – Production d’hydrogène bas carbone	27
Électrolyse de l’eau à basse température : nouveaux matériaux d’électrodes	31
<i>Centre PERSEE, Mines Paris – PSL</i>	
Production d’hydrogène à partir de déchets biomasse : nouveaux catalyseurs pour le reformage de biogaz	35
<i>Centre RAPSODEE, UMR CNRS 5302, IMT Mines Albi</i>	
Production d’hydrogène à partir de déchets de plastiques : études de procédés de thermoconversion	39
<i>Centre RAPSODEE, UMR CNRS 5302, IMT Mines Albi</i>	
Contrôle des procédés de production : plateforme multi-capteurs de détection et caractérisation de gaz	45
<i>Centre SPIN – UMR CNRS 5307, UMR CNRS 5600 – MINES Saint-Etienne</i>	
Chapitre III – Stockage d’hydrogène	49
Stockage d’hydrogène en cavités salines : aspects thermodynamiques et géomécaniques.....	53
<i>Centres GEOSCIENCES et CTP, Mines Paris – PSL</i>	
Nouvelles formes de stockage pour les applications stationnaires : évaluation du stockage H ₂ par adsorption	61
<i>Laboratoire GEPEA, UMR 6144, IMT Atlantique</i>	
Chapitre IV – Usage et valorisation de l’hydrogène et de ses co-produits	67
Captage de CO ₂ dans les fumées de combustion : régénération de solvant par procédé micro-ondes	71
<i>Laboratoire GEPEA, UMR 6144, IMT Atlantique</i>	
<i>Centre CTP, Mines Paris – PSL</i>	
Conversion de CO ₂ en méthane par méthanation biologique	77
<i>Laboratoire LSR, IMT Mines Alès</i>	

Aide à la décision pour le déploiement de l'hydrogène comme vecteur énergétique à l'échelle d'un territoire.....	81
<i>Centre PERSEE, Mines Paris – PSL</i>	
Valorisation de l'oxygène co-produit par électrolyse pour couvrir des besoins locaux	87
<i>Équipe Eau, Ressources, Territoires (ERT), Hydrosiences Montpellier, UMR CNRS 515, IMT Mines Alès</i>	
Vers de nouvelles perspectives de collaboration.....	99
Former les ingénieurs de demain.....	103
Coordination	109

Les laboratoires du Carnot M.I.N.E.S ont de tout temps mené des recherches dans le domaine de l'énergie. Au plus près des préoccupations de leurs partenaires privés et publics, ils développent des compétences dans des disciplines aussi variées que le génie des procédés, l'efficacité énergétique, les géosciences, les matériaux ou encore l'économie et l'analyse du cycle de vie. C'est cette approche holistique qui a permis au Carnot M.I.N.E.S de se positionner ces dix dernières années en tant qu'acteur reconnu à différents endroits de la chaîne de valeur de l'hydrogène, vecteur énergétique clé pour la décarbonation de l'industrie et des transports. C'est aussi ce qui l'a conduit dès 2019 à mobiliser un ressourcement scientifique d'ampleur au travers du projet HyTREND pour donner corps à une offre structurée de recherche et de formation au bénéfice de l'innovation des entreprises du secteur.

Car c'est bien aux utilisateurs de la recherche que s'adresse le Carnot M.I.N.E.S.

Ce livre blanc en est l'illustration. Il vient compléter les publications et conférences de ses chercheurs, ainsi que les journées d'échanges avec ses partenaires industriels. Il vise à présenter aux parties prenantes de la filière les sujets sur lesquels se penchent les équipes de recherche et les réponses qu'elles y apportent, au regard des enjeux technologiques, économiques et de souveraineté nationale qui sous-tendent le déploiement de l'hydrogène.

Nouveau format de dissémination des recherches du Carnot M.I.N.E.S, cet ouvrage est construit sur la base des productions scientifiques, d'entretiens et d'ateliers collectifs. Les experts de Dowel Innovation ont orchestré le recueil et la structuration de l'information pour en restituer les résultats saillants et les perspectives de poursuite. Autant d'éléments qui, nous l'espérons, vous donneront envie de consulter les publications source et de contacter les équipes à l'origine des résultats pour initier de nouvelles collaborations de recherche partenariale.

Agnès Laboudigue

Professeur à Mines Paris – PSL

Directrice du Carnot M.I.N.E.S

• Avant-propos •

Le label Carnot, créé en 2006, est un label d'excellence décerné par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche à des établissements de recherche en France. Il vise à favoriser la recherche partenariale. Les établissements labellisés, appelés instituts Carnot, reçoivent des financements destinés à renforcer leur offre de recherche. Ces instituts favorisent ainsi le rapprochement des acteurs de la recherche publique et du monde socio-économique, notamment des entreprises, afin d'accélérer le passage de la recherche à l'innovation et d'accroître le transfert de technologies vers les acteurs économiques¹.

L'institut Carnot M.I.N.E.S, labellisé depuis 2006, regroupe les équipes de recherche de Mines Paris – PSL et de cinq écoles de l'Institut Mines Télécom (IMT Atlantique, IMT Mines Albi, IMT Mines Alès, IMT Nord Europe et Mines Saint-Étienne) auxquelles s'ajoutent des laboratoires de l'École polytechnique, de l'ENSTA Paris et de Clermont Auvergne INP, dont de nombreuses UMR CNRS. L'association Armines et la Fondation Mines Paris sont également membres du Carnot M.I.N.E.S².

Au sein du groupe H₂MINES, l'institut rassemble les expertises R&D et les activités de formation pour la filière hydrogène. À travers cette initiative, ce sont les compétences pluridisciplinaires et complémentaires de 21 centres de recherche issus de 8 écoles membres qui sont mobilisées pour accompagner les acteurs industriels et institutionnels de la filière sur le développement de leurs innovations.

Afin de fédérer le groupe, le Carnot M.I.N.E.S a soutenu le projet de recherche HyTREND – Hydrogène pour une transition énergétique décarbonée – pour une durée de 3 ans. Coordonné par le centre PERSEE de Mines Paris – PSL, le projet HYTREND a une vocation de structuration scientifique autour de la chaîne de valeur de la filière hydrogène-énergie. Alliant des compétences de recherche sur les enjeux technologiques (production, stockage-distribution, usages) aux expertises transversales en développement durable, le projet s'est achevé en 2023.

Le présent livre blanc s'adresse aux industriels du secteur et aux décideurs, et se veut donc accessible aux publics avertis mais non spécialistes de la filière hydrogène. Il vise à promouvoir les résultats marquants du projet afin de donner une impulsion au développement de nouvelles solutions pour la filière hydrogène-énergie.

Ce livre a été élaboré grâce à une série d'entretiens avec les porteurs d'actions de recherche, en collaboration avec la société de conseil en innovation, Dowel Innovation. L'objectif était

1 <https://www.lereseauDESCARNOT.fr/fr/le-label-carnot>

2 Les ressources du groupe H₂MINES sont disponibles sur <https://www.carnot-mines.eu/h2mines-ressources-documentaires/>

d'identifier les faits marquants et les perspectives de recherche. Cette série d'entretiens s'est clôturée par un atelier collectif visant à valider les perspectives de recherche, à identifier les synergies et à explorer les opportunités de collaboration, au sein du groupe H₂MINES mais également avec les acteurs industriels de la filière hydrogène et les collectivités territoriales.

Après une présentation de la filière hydrogène et de la transformation qui s'opère sur les plans politiques et industriels, le chapitre 1 présente de manière synthétique les problématiques étudiées et les résultats obtenus dans le cadre du projet HyTREND par les douze centres de recherche impliqués.

Le chapitre 2 est dédié à la production d'hydrogène bas carbone, où les chercheurs se sont intéressés au développement de nouveaux matériaux d'électrodes pour l'électrolyse et catalyseurs pour le reformage du biogaz, à la production d'hydrogène à partir de déchets plastiques et au contrôle des procédés de production.

Le chapitre 3 s'intéresse quant à lui au stockage d'hydrogène à différentes échelles d'intérêt selon l'application visée, dans des cavités salines ou piégé au sein de matériaux solides.

Enfin, le chapitre 4 se concentre sur l'usage et la valorisation de l'hydrogène et de ses co-produits : intégration des énergies renouvelables grâce au vecteur H₂, capture et conversion de CO₂ et synergies éco-industrielles. Les études menées sur les dimensions économique, sociétale et environnementale sont également présentées.

Le livre blanc se termine par une présentation des perspectives de collaborations au sein du Carnot M.I.N.E.S, des interactions avec le monde industriel et de l'offre de formation autour de la filière hydrogène à laquelle contribuent les enseignants-chercheurs du groupe.

• Centres de recherche •

Mines Paris – PSL

*Centre Procédés, Énergies Renouvelables
et Systèmes Énergétiques – PERSEE*
Christian Beauger, Pedro Affonso Nobrega,
Anaëlle Jodry

Centre Géosciences
Faouzi Hadj Hassen

*Centre Thermodynamique des Procédés – CTP
(nouvellement Centre Énergie, Environnement,
Procédés)*
Elise El Ahmar

Centre Observation, Impacts, Énergie – O.I.E
Paula Pérez-López, Joanna Schlesinger

*Centre de Sociologie de l'Innovation,
UMR CNRS 7185 – CSI*
Madeleine Akrich, Alexandre Mallard

Centre des Matériaux, UMR CNRS 7633 – MAT
Yazid Madi

IMT Mines Albi

*Centre de Recherche d'Albi en génie des
Procédés des Solides Divisés, de l'Énergie
et de l'Environnement,
UMR CNRS 5302 – RAPSODEE*
Doan Pham Minh, Javier Escudero,
Christophe Coquelet

IMT Mines Alès

*Équipe Eau, Ressources, Territoires,
Hydrosciences Montpellier, UMR CNRS 515 – ERT*
Guillaume Junqua

Laboratoire de Sciences des Risques – LSR
Frédéric Heymes, Luc Malhautier

IMT Atlantique

*Laboratoire Génie des procédés,
Environnement – Agroalimentaire,
UMR CNRS 6144 – GEPEA*
Pascaline Pré

MINES Saint-Étienne

Institut Henri FAYOL, EVS UMR 5600
Valérie Laforest

*Centre SPIN – UMR CNRS 5307,
UMR CNRS 5600*
Riadh Lakhmi

Clermont Auvergne INP

*Équipe Génie des Procédés, Énergétique
et Biosystèmes, Institut Pascal,
UMR CNRS 6602 – GEPEB*
Jean-François Cornet

Institut Carnot M.I.N.E.S

Agnès Laboudigue
et Jean-Clément Guisiano

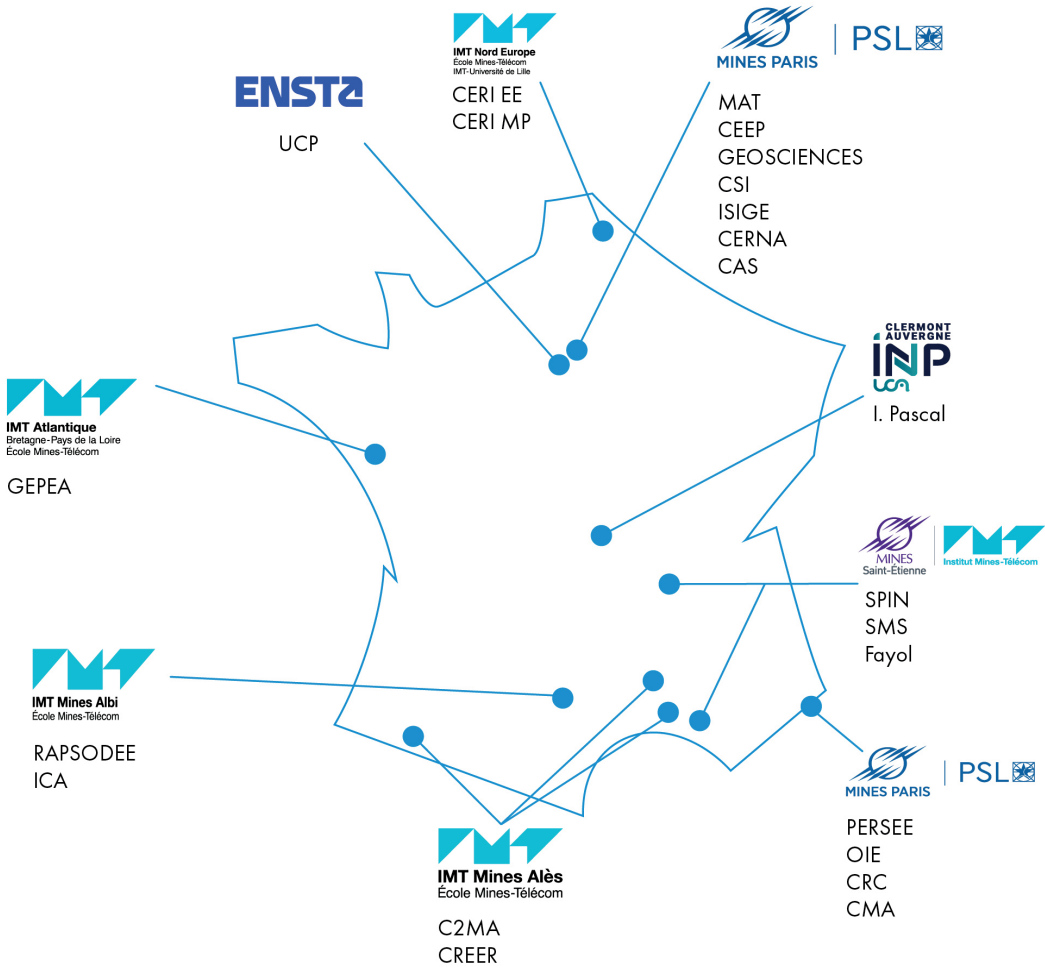


Figure 1. Les centres du groupe H₂MINES

• Abréviations •

ACV	Analyse de cycle de vie
AEM	<i>Anionic Exchange Membrane</i> (Membrane échangeuse d'anions)
AME	Assemblage membrane électrodes
ANR	Agence Nationale de la Recherche
CH ₄	Méthane
CO ₂	Dioxyde de carbone
COV	Composés Organiques Volatiles
CCUS	<i>Carbon Capture, utilisation and sequestration</i> (Capture, utilisation et stockage de carbone)
ENR	Énergies renouvelables
GES	Gaz à effet de serre
H ₂	Hydrogène
MOF	<i>Metal Organic Frameworks</i> (Réseaux organo-métalliques)
PEHD	Polyéthylène haute densité
PEMFC	<i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i> (Pile à combustible à membrane échangeuse de protons)
PEMWE	<i>Proton Exchange Membrane Water Electrolysis</i> (Électrolyse de l'eau par membrane échangeuse de protons)
R&D	Recherche et développement
SAC	<i>Single Atom Catalyst</i>
SOEC	<i>Solid Oxide Electrolysis Cell</i> (Cellules électrolytiques à oxyde solide)
TRL	<i>Technology Readiness Level</i> (Niveau de maturité technologique)

• CHAPITRE I •

La filière hydrogène

Une filière industrielle à l'aube d'un grand bouleversement

En 2022, la consommation mondiale d'hydrogène atteignait le chiffre record de 94 millions de tonnes¹. Cette consommation sert en grande majorité au raffinage pétrolier et à la production d'ammoniac et d'engrais, et plus minoritairement à des industries comme le spatial, l'électronique ou la métallurgie.

À ce jour, l'hydrogène mondial est essentiellement produit à partir de gaz naturel (62 %) et de charbon (21 %), le reste étant issu de sous-produits pétroliers. Les procédés de fabrication sont fortement émetteurs de carbone : le vaporeformage du méthane génère 9 kg de CO₂ par kg d'hydrogène produit, et la gazéification du charbon 19 kg. Les technologies de captage de CO₂ permettent de réduire cette intensité carbone, à un certain coût cependant, qui inclut le transport et le stockage du CO₂. Si le coût moyen est estimé entre 0,5 et 1,7 \$/kg pour la production d'hydrogène à partir de gaz naturel, il monte entre 1 et 2 \$/kg quand on inclut la capture de CO₂.

D'autres voies technologiques existent pour la production d'hydrogène bas carbone, telles que l'électrolyse de l'eau ou la production à partir de biomasse ou de déchets, par des processus de gazéification et/ou traitement à très haute température, qui sont encore à de faibles niveaux de maturité.

Le panorama actuel de la production/consommation d'hydrogène est amené à fortement évoluer dans les années à venir, du fait des objectifs politiques en matière d'énergies renouvelables. En effet, l'électrolyse, qui permet entre autres de stocker l'électricité sous forme d'hydrogène, est appelée à se développer largement afin de gérer les surplus de production d'électricité renouvelable et de servir de nouveaux usages comme la mobilité hydrogène.

Si l'électrolyse représente seulement 0,1 % de l'hydrogène produit aujourd'hui, la capacité installée et les projets d'investissements connaissent une croissance très rapide (+20 % en 2022 par rapport à 2021, pour un total de 700 mégawatts (MW) installés). La Chine a récemment dépassé l'Europe en matière de déploiement d'électrolyseurs, et compte aujourd'hui la moitié de la capacité installée dans le monde. Elle est également leader dans leur fabrication. En termes de technologies, le marché a été dominé jusqu'en 2019 par l'électrolyse alcaline², la plus mature, mais l'électrolyse à membrane échangeuse de protons (PEMWE) est en forte croissance depuis, car plus adaptée au couplage avec

1 Les chiffres mentionnés dans l'ensemble de cette section proviennent des rapports de l'Agence internationale de l'énergie: IEA (2021), Global Hydrogen Review 2021, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021> ; IEA (2023), Global Hydrogen Review 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>

2 Chatenet *et al.*, Water electrolysis: from textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments, Chem. Soc. Rev., 2022, 51, 4583 DOI: 10.1039/d0cs01079k.

des sources d'énergie intermittentes comme l'éolien ou le solaire. En termes de coût, la fabrication de l'hydrogène par électrolyse est estimée entre 3 et 8 \$/kg, bien au-dessus du coût de production à partir du gaz naturel mentionné plus haut.

Une ambition européenne soulevant de nombreux défis

L'hydrogène fait partie intégrante du plan REPowerEU adopté en 2022 par l'Union européenne³ en vue d'accroître l'indépendance énergétique du continent. Afin de soutenir la décarbonation dans l'industrie, les transports et la production d'électricité, ce plan vise la production sur le sol européen de 10 millions de tonnes d'hydrogène d'ici 2030. Le Net Zero Industry Act approuvé par le Parlement européen en avril 2024⁴ fixe une cible d'au moins 100 GW d'électrolyseurs installés pour produire de l'hydrogène à partir d'énergie renouvelable.

Cet objectif implique un passage à l'échelle de l'unité ou la dizaine de MW par électrolyseur actuellement, à celle du gigawatt (GW). Des projets de l'ordre de 50 à 200 MW sont en cours de préparation⁵. D'autre part, produire les 10 millions de tonnes visées avec des électrolyseurs fabriqués en Europe nécessiterait d'augmenter de 40% par an les capacités de fabrication européennes⁶. Cela impliquerait également de résoudre les difficultés d'approvisionnement en métaux rares et chers importés d'Afrique du Sud, Russie et Chine, et les risques de stress hydrique selon les contraintes des territoires (produire 1 kg d'hydrogène nécessite 20 L d'eau dont 9 L sont réellement consommés⁷).

Cette production d'hydrogène à grande échelle nécessite également d'y associer des moyens de stockage et d'acheminement depuis les zones à fort potentiel en énergies renouvelables vers les lieux de consommation. Un projet de réseau paneuropéen (European Hydrogen Backbone⁸) est en cours d'élaboration afin de structurer le ravitaillement en hydrogène et son transport longue distance, en s'appuyant sur le réseau gazier existant qui pourrait être partiellement adapté à cette nouvelle utilisation.

3 REPowerEU Plan, COM(2022) 230 final.

4 Communiqué de Presse du Parlement européen « Une loi pour stimuler la production de technologies à émission nette zéro », avril 2024.

5 France Hydrogène, Newsletter Hynovations, novembre 2023 : <https://www.france-hydrogene.org/magazine/electrolyseurs%E2%80%AF-siemens-energy-et-air-liquide-passent-a-lechelle/>

6 Hydrogen Europe, Clean Hydrogen Monitor, novembre 2023.

7 Dolci, F. *et al.*, Clean Energy Technology Observatory: Water Electrolysis and Hydrogen in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, DOI:10.2760/7606, JRC130683.

8 L'initiative European Hydrogen Backbone, <https://www.ehb.eu/>

En termes de stockage hydrogène à grande échelle, si l'Europe n'a pas encore de sites opérationnels, une cinquantaine de projets pilotes sont en préparation à l'horizon 2040⁹, la majorité en cavités salines, considérées comme la solution la plus prometteuse, avec des capacités allant du mégawatt.heure (MWh) à plus de 30 gigawatt.heure (GWh). Cependant leur capacité cumulée est très en deçà des besoins estimés (45 TWh à 2030).

D'autre part, la Commission européenne estime qu'atteindre l'objectif de neutralité climat nécessitera de capter 300 à 500 millions de tonnes de CO₂¹⁰ d'ici 2050, et de le stocker ou le revaloriser dans différentes industries. Aujourd'hui il existe une centaine de projets d'installations de capture et stockage de CO₂ en Europe¹¹, à des niveaux de maturité plutôt bas.

Enfin, côté consommation, il faudra adapter des secteurs d'utilisation finale à la consommation d'hydrogène et aux combustibles dérivés de l'hydrogène (industries lourdes, transport routier, etc.).

Une stratégie française qui s'appuie sur les territoires

En 2018 puis 2020, la France présentait deux stratégies nationales successives d'ampleur pour l'hydrogène, visant à faire émerger une filière française de l'électrolyse, et à déployer l'hydrogène pour décarboner l'industrie et la mobilité *via* le financement de projets territoriaux, de programmes de recherche et de développements technologiques. Sur la mobilité, l'ambition est de 20 000 à 50 000 véhicules légers à hydrogène d'ici 2028, 800 à 2 000 véhicules lourds, ravitaillés par 400 à 1 000 stations-service¹².

Fin 2023, les nouvelles orientations stratégiques nationales fixaient un objectif de capacité d'électrolyse de 6,5 GW en 2030 (et 10 GW en 2035), le développement d'un réseau au sein de hubs hydrogène comme ceux de Fos-sur-Mer, Dunkerque, Havre-Estuaire de la Seine, et Lyon Vallée de la Chimie, et leur connexion aux infrastructures de stockage, soit 500 km de canalisations à court terme¹³.

La dimension territoriale se révèle donc essentielle dans le déploiement de l'hydrogène, et les régions Auvergne-Rhône-Alpes, Occitanie et Pays de la Loire ont élaboré leur propre feuille

9 H₂art for Europe, *The role of underground hydrogen storage in Europe*, January 2024.

10 Commission européenne, Sustainable Carbon Cycles, COM/2021/800 final.

11 Global CCS Institute, *CCS in Europe: Regional Overview*, November 2023.

12 Programmation pluriannuelle de l'énergie 2019-2028 <https://www.ecologie.gouv.fr/programmations-pluriannuelles-lenergie-ppe>.

13 Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, *Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France*, décembre 2023.

de route en la matière. Parmi les grands projets lancés ces dernières années sur le territoire national, on peut citer, de la production au transport, stockage et à la consommation :

- Jupiter 1000 à Fos-sur-Mer, premier démonstrateur de « Power-to-Gas »¹⁴ à échelle industrielle raccordé au réseau de transport du gaz, qui vise à convertir le surplus d'électricité renouvelable en hydrogène (1 MW d'électrolyseurs) et en méthane pour l'injecter dans le réseau de GRTgaz et le stocker.
- HYCAUNAI¹⁵ à Auxerre, qui couple un électrolyseur (1 MW) à une installation de stockage de déchets produisant du biogaz. Une partie de l'hydrogène produit alimente une flotte de bennes à ordures, le reste converti en gaz de synthèse alimente le réseau.
- FenHYx, plateforme de recherche pour tester l'injection d'hydrogène dans les infrastructures gazières¹⁶.
- MOSAHYC, projet franco-allemand visant à créer un réseau de transport 100 % hydrogène en adaptant 70 km de canalisations existantes entre la Sarre allemande, le Grand Est français et la frontière luxembourgeoise¹⁷.
- HyPSTER, premier projet de stockage d'hydrogène en cavité saline situé dans l'Ain, qui va d'abord tester le stockage sur 2 à 3 tonnes d'hydrogène, avant passage à l'échelle pour exploiter la capacité totale de la cavité, soit 50 tonnes¹⁸.
- Zero Emission Valley en Auvergne-Rhône-Alpes sur la mobilité hydrogène sur flottes captives, qui prévoit une vingtaine de stations, 500 véhicules et deux électrolyseurs de 2 MW (soit une capacité de production de 2 t/jour)¹⁹.

On notera qu'une stratégie de capture, stockage et utilisation du CO₂ (CCUS) a également été présentée par le gouvernement en 2023²⁰. Elle fixe une trajectoire de déploiement qui donne la priorité aux grands ports industriels sur le court terme.

14 Processus consistant à utiliser de l'électricité décarbonée (nucléaire et renouvelable) pour produire, par électrolyse de l'eau, de l'hydrogène qui lui-même peut être converti en méthane de synthèse (source CEA).

15 <https://www.europe-bfc.eu/beneficiaire/hycaunais/>

16 <https://www.grtgaz.com/medias/actualites/3e-revolution-du-gaz-est-marche-alfortville>

17 <https://grande-region-hydrogen.eu/fr/projets/mosahyc-francais/>

18 <https://hypster-project.eu/>

19 <https://www.auvergnerhonealpes.fr/actualites/ademe-10-millions-deuros-supplementaires-pour-le-projet-mobilite-lourde-hydrogene>

20 Dossier de presse – Conseil national de l'Industrie et Stratégie de capture, stockage et utilisation du carbone (CCUS).

L'expertise du Carnot M.I.N.E.S pour la filière hydrogène

Le Carnot M.I.N.E.S place la recherche partenariale au service de l'innovation des entreprises et des collectivités. Il regroupe les équipes de recherche des Écoles des mines et de l'IMT auxquelles s'ajoutent des laboratoires de l'École polytechnique, de l'ENSTA Paris et de Clermont Auvergne INP, dont de nombreuses UMR CNRS.

Fort de son excellence académique et de sa capacité à apporter des solutions concrètes et opérables dans l'Entreprise, le Carnot M.I.N.E.S se distingue par sa pluridisciplinarité scientifique et son ouverture pluri-thématique aux filières stratégiques renforçant la compétitivité nationale.

Sous le groupe H₂MINES, l'institut rassemble les expertises R&D et les activités de formation de la filière hydrogène. À travers cette initiative, ce sont les compétences complémentaires de 21 centres de recherche issus de 8 écoles membres qui sont mobilisées pour accompagner les acteurs de la filière sur le développement de leurs innovations.

Les activités du groupe H₂MINES sont positionnées sur l'ensemble de la chaîne de valeur de la filière hydrogène: production, stockage, transport, distribution, utilisation d'hydrogène, risques et développement durable. Elles couvrent les aspects matériaux/composants, procédés/systèmes et modélisation/simulation et sont identifiées dans la cartographie ci-après.

HyTREND – Hydrogène pour une transition énergétique décarbonée, un projet phare du Carnot M.I.N.E.S

HyTREND est un projet phare du Carnot M.I.N.E.S, financé pour une durée de 3 ans (2020-2023) par le ressourcement Carnot à hauteur de 1 M€, auquel ont participé 12 des 21 centres de recherche du groupe H₂MINES sous la coordination de Christian Beauger, Directeur de Recherche au centre PERSEE de Mines Paris – PSL.

Le projet adresse les problématiques liées au développement de technologies propres et durables pour la production d'hydrogène et de méthane et leur stockage, la capture et conversion de CO₂, dans le cadre d'une application Power to Gas.

Outre l'intérêt porté aux briques technologiques, les interactions des procédés avec les réseaux électriques (en particulier électricité renouvelable), ainsi que les infrastructures souterraines de stockage des gaz produits sont également considérées.

En complément, le périmètre du projet s'étend aux dimensions sociétales, économiques et écologiques et mobilise des expertises transverses. Il intègre ainsi l'établissement de diagnostics portant sur la perception des enjeux liés au développement de ces technologies

et des débats qu'il suscite au sein de la société, mais aussi l'analyse de risques et de cycles de vie des procédés. Il prend également en compte l'impact de ces nouvelles filières et de leurs interactions sur les activités industrielles à l'échelle d'un territoire, sur le développement d'applications de niche ou compétitives à grande échelle pour le déploiement de solutions de stockage d'électricité renouvelable.

« La complémentarité des expertises au sein du Carnot M.I.N.E.S nous a permis d'explorer plusieurs sujets très pointus et de couvrir l'ensemble de la chaîne de valeur de la filière hydrogène. HyTREND a ouvert les portes à de nombreuses perspectives de collaboration. »

Christian Beauger

Coordinateur H₂MINES, PERSEE, Mines Paris – PSL

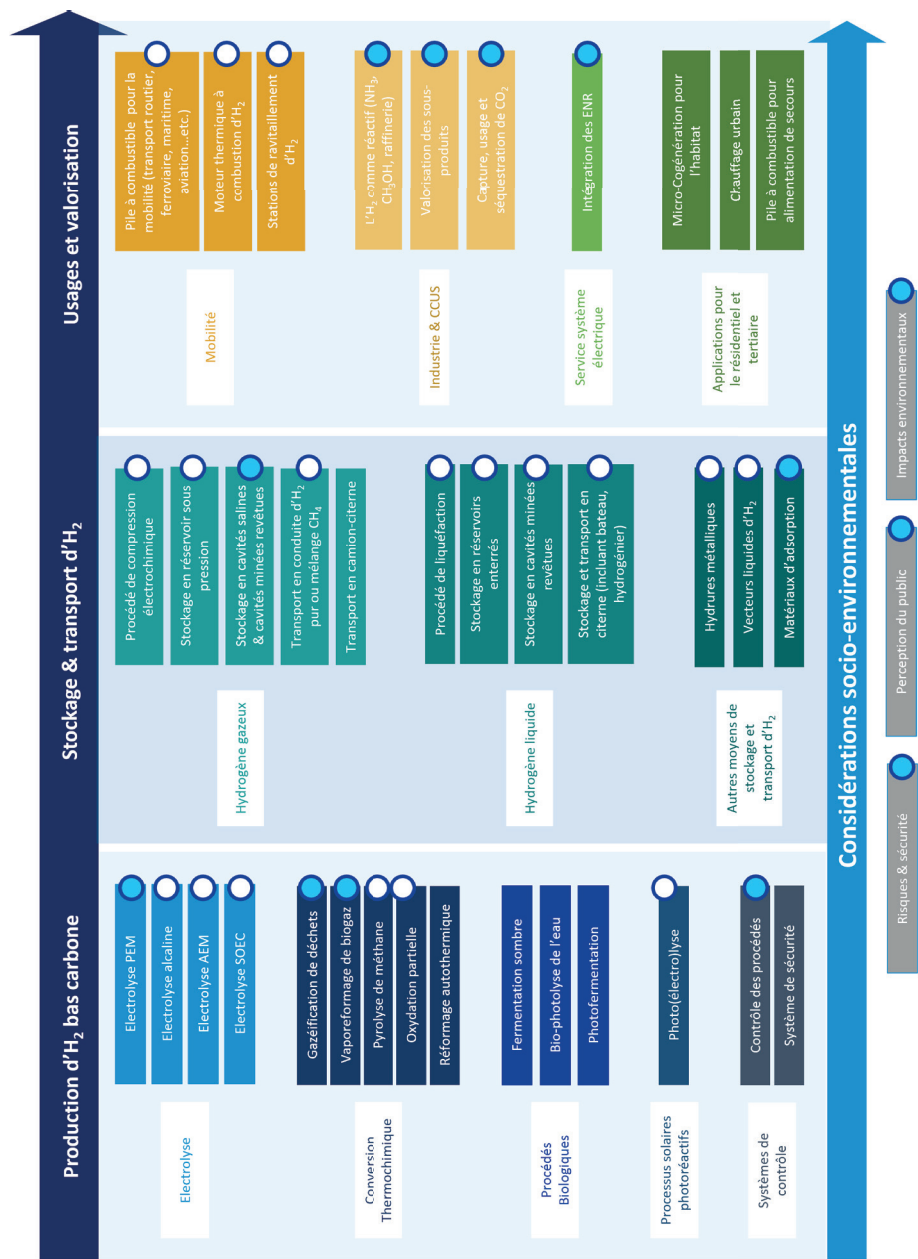


Figure 2. Cartographie globale de la chaîne de valeur de la filière hydrogène et identification des activités de recherche du groupe H₂MINES et des sujets spécifiquement étudiés dans HyTREND