

DOMAINE ÉNERGIE

PRODUIRE DE L'HYDROGÈNE BAS CARBONE À GRANDE ÉCHELLE

Développer la production d'électrolyseurs afin d'accroître la production d'hydrogène bas carbone à grande échelle et à faible coût (en dessous de 2€/kg pour les technologies à échelle, déployées à plus de 500 MW de puissance installée)

01 La France dispose d'atouts majeurs pour le développement d'une filière hydrogène bas carbone et compétitive

L'hydrogène ne peut être un vecteur de décarbonation qu'à deux conditions : qu'il soit compétitif et produit de manière décarbonée.

La France jouit d'un atout avec son mix électrique décarboné à 93% qui lui permet de produire de l'hydrogène bas carbone de façon maîtrisée et économique. En outre, la France dispose d'un tissu industriel solide pour le développement de la filière.

Le Gouvernement français s'est engagé en faveur du développement de l'hydrogène bas carbone (objectif de 6,5 GW de capacités installées d'électrolyse d'ici 2030, mécanismes de soutien public de 8,9 milliards d'euros), soutenu par des engagements ambitieux au niveau européen.

03 Une filière hydrogène très dépendante des capacités d'électricité renouvelable disponibles, qui doit affirmer sa compétitivité économique

Le prix de l'hydrogène bas carbone est incertain, car majoritairement lié au prix de l'électricité.

Au regard du contexte actuel, il y a un risque d'une absence de sécurisation d'approvisionnement en électricité décarbonée pour répondre aux objectifs de production d'ici 2030. Le rythme d'installation des capacités ENR additionnelles est insuffisant (projet de loi qui vise à accélérer le développement des énergies renouvelables).

Les compétences doivent être sécurisées dans un contexte de forte croissance de ce marché (près de 80 métiers sont aujourd'hui en tension).

Les investissements publics doivent être ciblés, notamment sur le soutien CAPEX pour les usages de mobilité.

02 Un maillage stratégique est nécessaire entre producteurs d'hydrogène bas carbone et les usages à fort enjeux de décarbonation

Augmenter les volumes produits est nécessaire pour réduire les coûts et accroître la compétitivité de l'hydrogène bas carbone. L'Alliance européenne annoncée en mai 2022, vise à multiplier par 10 la capacité de production d'électrolyseurs en mutualisant les efforts au niveau européen.

L'offre d'hydrogène produite doit être sécurisée par les usages (industries, mobilités notamment) à travers leur agrégation dans des bassins géographiques identifiés.

Ce maillage doit être soutenu par des capacités de stockage importantes et le développement d'infrastructures de distribution.

04 Prioriser la sécurisation des approvisionnements en électricité bas carbone, l'adaptation de la réglementation au développement de la filière et la stimulation de la demande

Le soutien de l'État et des pouvoirs publics est nécessaire pour accélérer le déploiement des renouvelables et des capacités nucléaires mais aussi pour légiférer afin d'accélérer les processus administratifs.

La réglementation doit également évoluer pour accompagner le développement de ce marché : cadre d'échange de l'hydrogène transparent et non discriminatoire, système de traçabilité de l'hydrogène bas carbone.

Les financements doivent être accompagnés d'une stimulation importante de la demande : favoriser les subventions aux usages industriels et de la mobilité.

UNE FILIÈRE FRANÇAISE AMBITIEUSE QUI RÉPOND À DES ENJEUX DE DÉCARBONATION IMPORTANTS TOUT EN APPORTANT DE LA FLEXIBILITÉ AU SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE

Périmètre technologique

Description : plusieurs technologies d'électrolyseurs sont disponibles à des stades de maturité variés. Les technologies les plus matures sont les électrolyseurs alcalins et PEM.

Il existe des technologies de rupture (Électrolyseurs haute température dont SOEC, AEM), qui manquent de maturité pour répondre aux enjeux de production d'ici 2030.

Des investissements importants sont dirigés vers les électrolyseurs SOEC afin d'accélérer leur déploiement industriel (Genvia)

Maturité technologique

- Stade : **Accélération et passage à l'échelle**

Électrolyseurs alcalins (AWE, Alkaline Water Electrolysis)	TRL 9
PEM (Proton Exchange Membrane)	TRL 7-9
SOEC (électrolyse à oxyde solide)	TRL 5-9
AEM (Anion Exchange Membrane)	TRL 4-6

ETAT DES LIEUX

- Engagement politique :** un engagement politique fort soutenu au niveau européen
Fort engagement manifesté par la publication de la Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène bas carbone en France en septembre 2020. Investissements d'environ 9 milliards d'euros d'ici 2030, pour favoriser la R&D et développer 6,5 GW⁽¹⁾ de capacité installée d'électrolyse, dans le but de décarboner l'industrie et la mobilité. Objectifs européens : 40 GW de capacité installée d'électrolyse d'ici 2030⁽²⁾ par rapport à des besoins estimés à 120GW d'électrolyse pour répondre aux objectifs hydrogène de *REPower EU*⁽³⁾. Aujourd'hui, la production d'hydrogène industriel représente plus de 900 000 tonnes par an en France, produit à **94% à partir d'énergies fossiles et responsable d'environ 3 % des émissions nationales**⁽⁴⁾.
- Acceptabilité :** une technologie nouvelle suscitant pour lors peu de contestations, mais une éducation des populations à réaliser pour assurer une acceptabilité sociétale sur le long terme
Pas d'impact négatif majeur identifié. Cependant un accident pourrait renverser cette tendance. Il est donc important d'éduquer aux risques pour permettre une pénétration durable de l'hydrogène dans nos usages. L'installation de gros projets peut engendrer des conflits au niveau du foncier.
- Compétences & savoir-faire :** des producteurs français d'électrolyseurs qui se développent dans un contexte de forte concurrence internationale
Leaders français sur les technologies alcalines (McPhy), PEM (Elogen) et positionnement naissant sur le SOEC avec Genvia. Ces acteurs sont encore de taille modérée dans un contexte de grandes ambitions françaises et européennes (*REPower EU*). Il y a un enjeu de formation sur les métiers en tension pour répondre aux besoins énormes.
- Réseau existant de partenaires :** un réseau structuré au niveau européen, français et régional
Réseau important d'acteurs industriels que l'on retrouve au sein de France Hydrogène. Au niveau européen, alliance créée par la Commission européenne pour multiplier par dix les capacités de construction d'électrolyseurs d'ici 2025.
- Structuration macro de la chaîne de valeur et du territoire :** une forte présence française sur toute la chaîne de valeur qui capitalise sur les infrastructures des usages ciblés
Les sites de production d'hydrogène bas carbone s'insèrent dans les territoires auprès des usages industriels et de la mobilité.
- Voies de commercialisation :** un maillage stratégique entre producteurs d'hydrogène bas carbone et les usages à fort enjeux de décarbonation, soutenu par des capacités de stockage importantes et un fort réseau de distribution
Création de larges clusters régionaux, où se côtoient la production et les activités industrielles et/ou de mobilités fortement émettrices. Usages prioritaires pour l'hydrogène bas carbone : réduction du minerai de fer et intrants agricoles (fort potentiel de décarbonation et peu d'alternatives décarbonées, cf. Clean Hydrogen Ladder). **La France pourrait tirer parti de son parc nucléaire pour produire de l'hydrogène bas carbone de façon maîtrisée et économique** (émissions carbone de la France à 51,1g CO₂/kWh en 2020 contre 230.7g CO₂/kWh pour l'Union Européenne)⁽⁵⁾.
- Leviers de déploiement et voies d'industrialisation :** une production d'électrolyseurs à grande échelle lancée mais des projets de production d'hydrogène bas carbone à intensifier
Nécessité d'augmenter les volumes pour réduire les coûts et accroître la compétitivité de l'hydrogène bas carbone en déployant des gigafactories de production d'électrolyseurs ainsi que des gigafactories de production d'hydrogène bas carbone. Production accélérée pour les électrolyseurs alcalins, PEM et SOEC (1 projet de gigafactory de production d'électrolyseurs annoncé par type d'électrolyseur avec pour objectif d'atteindre une capacité de 1 GW/an à horizon 2028).
En revanche peu de projets d'une capacité supérieure à 400 MW concernant la production d'hydrogène bas carbone (Projet Air Liquide Dunkerque avec une usine de production d'hydrogène bas carbone prévoyant jusqu'à 400 MW d'électrolyseurs en 2027, principalement destiné à fournir la future ligne de production d'acier DRI d'ArcelorMittal).

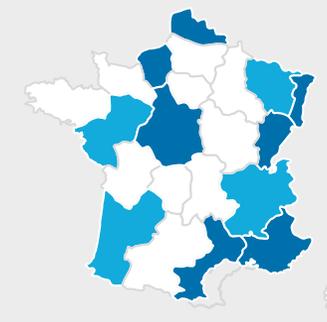
Capacité installée d'électrolyse en France

Ambition FR : **6,5 GW⁽¹⁾** de capacité installée d'électrolyse **d'ici 2030**

Capacité installée d'électrolyse actuelle : **< 10 MW**

Zones d'implantation privilégiées

Grands bassins industriels dans une logique de regroupement avec les usages



■ Projets de gigafactory de production d'électrolyseurs existants

■ Bassins industriels à forte demande existants

ÉVALUATION DE L'ÉCOSYSTÈME

FOCUS PRODUCTION D'ÉLECTROLYSEURS

4 projets PIIEC ont été sélectionnés pour la construction de gigafactories d'électrolyseurs en France.

Organisation de l'écosystème - 2 typologies d'acteurs se démarquent dans la production d'électrolyseurs à grande échelle :

Acteurs de premier plan qui disposent de la technologie et développent leurs projets

- **McPhy** : acteur historique de l'électrolyse alcaline en France qui développe sa future gigafactory à Belfort.
- **Elogen** : premier producteur français d'électrolyseurs PEM, qui s'appuie sur l'ingénieur gazier GTT pour développer son projet à Vendôme.
- **John Cockerill** : ingénieur belge qui a acquis la JV créée avec la société chinoise Jingli pour maîtriser la technologie d'électrolyseurs alcalins et développe une gigafactory en France.

Consortiums d'acteurs qui mutualisent leur compétences

- **Genvia** : société conjointe fondée par le CEA (compétence technologique), Schlumberger (savoir-faire industriel), VINCI Construction, Vicat et l'Agence Régionale Énergie Climat Occitanie, société d'investissement de la Région Occitanie.

FOCUS PRODUCTION D'HYDROGÈNE BAS CARBONE

3 PIIEC concernent des projets de production d'hydrogène bas carbone (Air Liquide, Engie).

A ce jour, aucun projet d'une capacité de 1GW n'a été annoncé en France.

Organisation de l'écosystème : sur la production d'hydrogène bas carbone à grande échelle, les projets sont développés par des consortiums d'acteurs : collectivités locales, promoteurs d'installations renouvelables, entreprises de services publics, exploitants de réseaux de gaz, les producteurs d'électrolyseurs, acteurs des usages.

	Production d'électrolyseurs	Production d'hydrogène bas carbone	Conditionnement (stockage et reconversion, transport, distribution)	Usages (priorité industrie et mobilité)		
	<p>La France dispose d'acteurs clés dans le secteur de la production d'électrolyseurs, et cela pour chaque type de technologie : McPhy (alcalin), Elogen (PEM), Genvia (SOEC).</p> <p>Beaucoup sont des entreprises d'une dizaine d'années voire moins (start-ups, scale-ups) parfois intégrées par des grands industriels.</p> <p>Les producteurs français d'électrolyseurs se démarquent dans un contexte de forte concurrence internationale.</p>	<p>Les producteurs français d'hydrogène bas carbone affichent de fortes ambitions européennes / internationales d'ici 2030.</p> <p>On observe deux typologies d'acteurs : les grands groupes énergétiques historiques et de nouveaux acteurs qui se lancent dans la production à grande échelle.</p> <p>A date, les projets français de production d'hydrogène bas carbone annoncés concernent des capacités inférieures à 500MW (contre des projets plus importants au niveau européen : NorthH2 1GW, HyDeal España 7.4 GW)</p>	<p>Les acteurs de la partie aval de la chaîne de valeur sont extrêmement variés selon l'activité.</p> <p>La France dispose d'acteurs leaders positionnés sur chacune des grandes sous-activités de la chaîne de valeur : stockage, transport, distribution, mobilité hydrogène, industrie (raffinage, sidérurgie). On observe un essor de nouveaux acteurs, notamment sur les activités liées au conditionnement et sur les usages liés à la mobilité.</p> <p>Dans un contexte d'explosion du marché de l'hydrogène bas carbone, la concurrence européenne et internationale est très forte sur ces activités.</p>			
+ ↑ Taille de l'entreprise ↓ -	<p>Concurrents majeurs internationaux : Nel (NO), Cummins (USA), John Cockerill (BE), SinoHy Energy (CN), ITM Power (UK), Asahi Kasei (JP), ThyssenKrupp (DE), Plug Power (US), Sunfire (DE), Haldor Topsoe (DK), Green Hydrogen System (DK) etc.</p> <p>Leaders français :</p> <ul style="list-style-type: none"> • McPhy (technologie alcaline) • Elogen (technologie PEM), Ex-Areva H2Gen, acquise en 2020 par l'ingénieur GTT <p>Start-ups françaises en croissance :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Genvia (électrolyse haute température, SOEC) • Ergosup (hydrogène sous pression) 	<p>Acteur historique de l'hydrogène :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Air Liquide <p>Grands énergéticiens qui se positionnent sur l'hydrogène :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Engie, EDF (Hynamics), Total Energies - ambitions de capacité supérieures à 3GW d'ici 2030 <p>Nouveaux acteurs qui se lancent dans la production à grande échelle</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lhyfe, scale-up nantaise créée en 2017 qui affiche des ambitions très forte (capacité > 3GW d'ici 2030) • H2V, filiale du groupe industriel français SAMFI, multiplie les annonces de projets (400 MW à Thionville). Ambition de capacité > 3GW d'ici 2030 • ? consortium de production de fer et d'acier à base d'hydrogène bas carbone 	<ul style="list-style-type: none"> • Air Liquide (stockage liquide, transport, distribution) • Engie (stockage, transport) • GRTgaz (transport gazoduc) • Storengy (stockage sous forme gazeuse, transport, distribution) • McPhy (stockage, distribution) • Start-ups françaises : <ul style="list-style-type: none"> • HySiLabs (stockage liquide, transport) • Sylfen (stockage) • Ergosup (stockage) • HRS (stockage, distrib) • Ataway (stockage, distrib) • Hydrogène de France (stockage / production d'élec.) 	<p>Usages actuels priorités : l'industrie (chimie, métallurgie, raffinerie)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Arcelor Mittal • Total Energies 	<p>Usages anticipés d'ici à 2025 : mobilité lourde terrestre, ferroviaire et maritime</p> <ul style="list-style-type: none"> • Air Liquide • Alstom • CMA CGM • Carrefour 	<p>Usages anticipés d'ici à 2035 / 2040 : aviation</p> <ul style="list-style-type: none"> • Airbus • Beyond Aero • Avionéo

Acteurs transverses : investisseurs divers (dont des fonds de capital risque, des banques d'investissement), accélérateurs et incubateurs.

UNE PRODUCTION ACCÉLÉRÉE D'ÉLECTROLYSEURS ALCALINS, PEM ET SOEC, MAIS DES PROJETS DE PRODUCTION D'HYDROGÈNE BAS CARBONE QUI NE DÉPASSENT PAS UNE CAPACITÉ DE 400 MW

Production d'électrolyseurs à grande échelle

McPhy – gigafactory d'électrolyseurs alcalins

Parties prenantes	McPhy, Bpifrance.
Localisation	Belfort (Bourgogne-Franche-Comté).
Jalons	Objectif de débuter la production début 2024 avec une montée en charge progressive pour atteindre 1 GW par an.
Chiffres clés	<ul style="list-style-type: none">Investissement de 30 à 40 M€ pour la construction du site.Création de 400 emplois en France.⁽⁶⁾
Sources de financement	<ul style="list-style-type: none">Aide de l'État : 140 M€ (soutien IPCEI, France Relance).Levée de fond de 180 millions d'euros pour lancer la gigafactory (EDF et Bpifrance : 14 M€, Chart International Holdings : 30 M€ et Technip Energies : 15 M€)

Elogen - gigafactory d'électrolyseurs PEM

Parties prenantes	Elogen, GTT (société mère), Bpifrance
Localisation	Vendôme (Loir-et-Cher)
Jalons	Mise en service prévue pour 2025 avec pour objectif d'atteindre une capacité de 1 GW par an rapidement (horizon 2028).
Chiffres clés	<ul style="list-style-type: none">Investissement de l'ordre de 50 M€.Création de 200 emplois en France.⁽⁷⁾
Sources de financement	Aide de l'État (Projet PIIEC) de l'ordre de 100 M€.

Production d'électrolyseurs à grande échelle

Lhyfe – production d'hydrogène bas carbone à grande échelle

Parties prenantes	Lhyfe, Nel (électrolyseurs).
Localisation	Un site actif à Bouin (Vendée).
Jalons	Premier site de Lhyfe, connecté directement aux éoliennes de Vendée Énergie, et producteur d'hydrogène bas carbone depuis 2021. Capacité de 300 à 1000 kg d'H2 par jour. Les 93 projets en cours devraient représenter 4,8 GW dès 2028.
Chiffres clés	<ul style="list-style-type: none">1 MW pour le site de Bouin.⁽⁸⁾93 projets on-shore en discussion.projets annoncés à 100 MW (hors France).
Sources de financement	Entrée en bourse en mai 2022 (110 M€).
Parties prenantes	Lhyfe, Nel (électrolyseurs).

Air Liquide Normand'Hy – électrolyseur de 200 MW pour production à grande échelle

Parties prenantes	Air Liquide, H2V (développeur), Siemens Energy (technologie PEM), Total Energies (PPA), Esso Raffinage et ExxonMobil Chemical France, BPI France.
Localisation	Port-Jérôme-sur-Seine (Seine-Maritime).
Jalons	Projet initial H2V Normandy. Air Liquide porte à 100% sa participation dans H2V Normandy en Octobre 2021. Mise en service en 2025, pour des usages industriels (raffinerie normande Total Energies) et mobilité locaux.
Chiffres clés	<ul style="list-style-type: none">électrolyseur de 200 MW.production de 28 000 tonnes/an d'hydrogène.250 000 tonnes d'émissions annuelles de CO2 évitées.Création de 70 emplois directs.⁽⁹⁾
Sources de financement	190 M€ d'aide de l'État (PIIEC).

UN SAVOIR-FAIRE TECHNOLOGIQUE MAÎTRISÉ MAIS UNE DÉPENDANCE NOTABLE EN TERMES DE RESSOURCES, QUI VARIE CONSIDÉRABLEMENT SELON LA TECHNOLOGIE D'ÉLECTROLYSEUR

EVALUATION DU POTENTIEL FRANÇAIS

Positionnement de la France : des producteurs français d'électrolyseurs qui se développent dans un contexte de forte concurrence internationale, notamment chinoise, et des producteurs d'hydrogène bas carbone qui affichent de fortes ambitions européennes / internationales

Positionnement international sur la technologie alcaline avec McPhy et sur la technologie PEM avec Elogen face à une forte concurrence internationale (Nel (NO), Cummins (USA), John Cockerill (BE), SinoHy Energy (CN), ITM Power (UK), Asahi Kasei (JP), ThyssenKrupp (DE), Plug Power (US), Sunfire (DE), Haldor Topsoe (DK), Green Hydrogen System (DK) etc.).

Concernant la production d'hydrogène bas carbone, acteur historique (Air Liquide), grands énergéticiens (EDF, Engie) et nouveaux acteurs (Lhyfe, H2V) se lancent dans la production à grande échelle avec des ambitions internationales.

Potentiel de décarbonation : un potentiel fort si on cible les usages prioritaires, à savoir l'industrie et la mobilité

Émissions CO2 évitées :

- **Etat des lieux** : chaque année, presque 9 millions de tonnes de CO2 sont émises en France pour la production d'hydrogène carboné, soit environ 3% des émissions nationales (ADEME, 2021).
- **Prévisions 2030** : 6 millions de tonnes de CO2 évitées par an à horizon 2030 pour la filière hydrogène⁽¹⁰⁾ (France Hydrogène Livre blanc pour l'élection présidentielle 2022).

Potentiel de création de valeur : le développement intensif du marché de l'hydrogène bas carbone sera fortement créateur de valeur

PIB - valeur du marché généré :

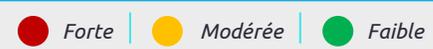
- Les investissements totaux dans les projets hydrogène devraient dépasser 300 milliards de dollars, soit 248 milliards d'euros d'ici 2030 (dont 80 Mds \$ de projets arrivés à maturité). Si tous les projets annoncés arrivent à leur terme, cela représenterait plus de 8,8 milliards de dollars américains de capitalisation boursière (estimations tirées du rapport Hydrogen Insights 2021 de l'Hydrogen Council et McKinsey & Company).

Emplois générés :

- Emplois générés : plus de 100 000 emplois à horizon 2030 dans la filière hydrogène⁽¹¹⁾.
Pour une usine de 200 MW, les emplois générés seraient de 70 ETP direct, 50 ETP indirect, 200 ETP construction et 50 ETP électrolyseurs (estimations H2V)⁽¹²⁾.

Potentiel d'accroissement de la souveraineté énergétique et industrielle de la France : des écarts de souveraineté énergétique importants selon le type d'électrolyseurs, la technologie alcaline étant beaucoup moins consommatrice en ressources critiques

Criticité des ressources majeures⁽¹³⁾ :



Ressource	Criticité	Problématique (si criticité forte ou modérée)
Platinoïdes	●	Situation de monopole sur l'extraction et la transformation, contrôlées par l'Afrique du Sud à hauteur de 68%. Les platinoïdes sont partiellement substituables entre eux, avec toutefois une perte d'efficacité ou des coûts plus élevés. Certaines technologies d'électrolyseurs sont moins consommatrices en ressources : les électrolyseurs PEM sont consommateurs de platinoïdes (iridium, platine) contrairement aux électrolyseurs alcalins qui n'en utilisent pas (AIE). Le platine peut être substitué à la cathode des électrolyseurs PEM et la teneur en iridium à l'anode peut être optimisée et réduite.
Terres rares	●	Situation de monopole sur l'extraction et la transformation, contrôlées à 62% par la Chine. Matériaux peu substituables. Yttrium utilisé dans la technologie d'électrolyse à oxyde solide (SOEC).
Graphite	●	Situation de monopole sur l'extraction et la transformation, contrôlées à 65% par la Chine. Problème de recyclabilité particulièrement important. Utilisé dans les électrolyseurs PEM.

Potentiel de circularité

- Deux ressources présentes dans certains électrolyseurs (le graphite et les terres rares) sont très peu recyclées (coûts associés).
- Le réemploi maximum des matériaux est nécessaire, notamment celui de l'iridium et du platine.

Provenance de la technologie : plusieurs industriels français produisent des électrolyseurs (McPhy, Elogen, Genvia, Ergosup) avec un positionnement international fort pour McPhy et Elogen.

La France jouit donc d'une importante souveraineté quant aux savoir-faire technologiques d'électrolyseurs. La concurrence internationale n'est cependant pas à minimiser (notamment la compétition asiatique, en particulier chinoise, sur les coûts).

UNE FILIÈRE HYDROGÈNE TRÈS DÉPENDANTE DES CAPACITÉS D'ÉLECTRICITÉ RENOUVELABLE DISPONIBLES, QUI DOIT AFFIRMER SA COMPÉTITIVITÉ ÉCONOMIQUE

Cadre public de déploiement

Engagement politique : un engagement fort dans ce secteur d'avenir, qui fait écho à l'impulsion donnée par l'Union européenne

- **Engagement de 9 milliards d'euros d'ici 2030**, pour favoriser la R&D et développer 6,5 GW de capacités d'électrolyse, dans le but de décarboner l'industrie et la mobilité⁽¹⁾.

Dispositifs de financement : un financement d'ampleur au niveau national qui pourrait néanmoins se révéler insuffisant

Niveau européen :

- Projet Important d'Intérêt Européen Commun (PIIEC) sur l'hydrogène - 1,5 milliard d'euros (géré par BPI France).

Stratégie nationale : 7 milliards d'euros de soutien public d'ici 2030 dont 2 milliards d'euros entre 2020 et 2022⁽¹⁾.

France 2030 : 1,9 milliard d'euros pour les projets d'hydrogène.⁽¹⁴⁾

- **Programme et équipement prioritaire de recherche (PEPR)** hydrogène bas carbone pour soutenir des activités de R&D amont - 80 M€ (géré par l'Agence Nationale de la Recherche).
- **Briques technologiques et démonstrateurs hydrogène** pour soutenir la R&D et les pilotes ou de premières commerciales - 350 M€ (géré par l'ADEME).
- **Écosystèmes territoriaux hydrogène** pour accélérer le déploiement des usages - 275 M€ d'ici 2023 (géré par l'ADEME).⁽¹⁴⁾

Cadre législatif et réglementaire : un cadre réglementaire à adapter rapidement pour instaurer un marché transparent et non discriminatoire

Etat des lieux

- Ordonnance en 17 février 2021 qui inclut la définition d'une taxonomie différenciant hydrogène renouvelable, bas-carbone et carboné, qui rend obsolète la désignation par couleur et prévoit la mise en place de garanties d'origine et de traçabilité.
- Loi Climat et résilience du 22 août 2021 qui permet aux collectivités territoriales d'investir directement dans la production d'hydrogène bas carbone.

Analyse d'écart entre les besoins et les mesures

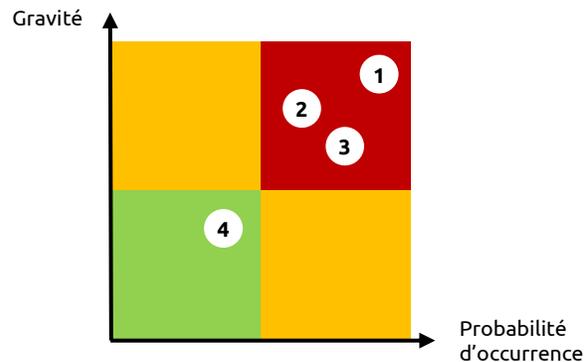
Les décrets d'application de l'ordonnance de février 2021 sont désormais attendus. Groupes de travaux sur l'évolution réglementaire nécessaire tenus jusqu'en avril 2022.

Barrières au déploiement

	Faible	Forte	
Approvisionnement (matériaux et technologie)			Les électrolyseurs engendrent des dépendances en termes de matériaux aux pays producteurs (Chine, Afrique du Sud). Ces dépendances varient selon la technologie : les alcalins n'utilisent pas de platinoïdes ni de graphites (présents dans les PEM).
Capacité de développement et infrastructures			Risque de non-disponibilité de la capacité d'électricité renouvelable et nucléaire nécessaire pour répondre aux objectifs de production d'ici à 2030 (disponibilité largement insuffisante pour satisfaire nos besoins globaux en électrification). De plus, des investissements importants sur le réseau électrique sont nécessaires pour suivre les besoins en électrification. Délais et tarifs de raccordement au réseau qui peuvent freiner le développement de projets de production d'hydrogène bas carbone (3 ans en moyenne pour être raccordé au réseau pour un projet 1 tonne / jour).
Compétences & savoir-faire			Pas de barrière majeure concernant le savoir-faire technologique. Sujet des compétences disponibles important dans un contexte d'explosion de la filière. Sur les 84 métiers recensés, 17 sont déjà considérés comme « en tension » (France Hydrogène) ⁽¹⁵⁾ . Compétence en termes de gestion EPC et MOA (maîtrise d'ouvrage) à développer pour les projets de gigafactories.
Économiques			Les coûts de production des électrolyseurs sont en baisse mais le prix de l'hydrogène reste incertain car extrêmement lié au coût de l'électricité. L'approvisionnement en énergie doit être abondant et à faible coût pour assurer l'industrialisation de la production d'hydrogène bas carbone. La concurrence face au prix de l'hydrogène carboné reste défavorable à l'hydrogène bas carbone. Risque de perdre des débouchés commerciaux prioritaires pour l'hydrogène bas carbone (industriels qui se relocalisent près de la production d'hydrogène bas carbone, subventions importantes pour la mobilité en Allemagne).
Financières			Les investissements annoncés pour le développement de la filière sont estimés insuffisants pour atteindre les objectifs fixés d'ici 2030. Soutien OPEX attendu par le gouvernement (4,2 milliards d'euros) pour soutenir la production d'hydrogène en baissant le coût de l'hydrogène bas carbone, par complément de rémunération. Mécanisme de soutien toujours pas officialisé.
Acceptabilité			Pas d'enjeux majeurs d'acceptabilité à ce jour , mais anticipation d'un risque concernant la sécurité (accident). Il est donc important d'éduquer aux risques.
Législatives et réglementaires			Absence d'un cadre d'échange transparent et non discriminatoire permettant d'identifier l'hydrogène carboné et bas carbone (barrières à l'entrée pour les nouveaux entrants). Besoin de mettre en place un système de traçabilité de l'hydrogène bas carbone pour ne pas désavantager l'hydrogène européen dans un contexte de forte concurrence internationale.

RISQUES ET RECOMMANDATIONS

Cartographie des risques majeurs



Recommandations et leviers (publics / privés) à mettre en œuvre

Infrastructures et approvisionnement

- **S'assurer d'un déploiement de technologies variées (Alcalin, PEM, SOEC, AEM).** Le développement de technologies d'électrolyseurs moins consommatrices en ressources critiques (platinoïde, graphite et terres rares), à savoir la technologie alcaline, permet de diminuer la dépendance française en termes de ressources.

Commandes publiques

- **Planifier le développement des moyens de production d'énergie renouvelable en fonction de la demande et des usages d'ici 2030** (usages industriels et de mobilité qui se relocalisent dans les zones de production d'électricité décarbonée).
- **Travailler sur une approche européenne pour accélérer la réduction des coûts de production d'électrolyseurs** (effets d'échelle, pricing power sur les fournisseurs de pièces, bénéfices d'interconnexions de gigafactories dans les régions frontalières etc.).

Programmes de recherche et d'innovation

- **Accélérer les efforts en R&D sur les technologies de rupture** (SOEC, AEM) pour diversifier les technologies déployées et sur les technologies existantes pour améliorer leur efficacité. Développer l'électrolyse offshore. Développer des logiciels de simulation (modélisation, pilotage).

Industrialisation et structuration de la filière :

- **Mettre en place des procédures spécifiques** pour une mise en œuvre rapide des projets d'industrialisation : statuts de planification et d'autorisation privilégiés (zones économiques franches, exonérations fiscales, etc.).
- **Sécuriser l'approvisionnement en électricité décarbonée** des producteurs d'hydrogène : PPA, contrats d'achat long terme nucléaire.
- **Favoriser la connexion directe entre les électrolyseurs et les moyens de production d'énergies renouvelables.** Capitaliser sur les compétences françaises de production d'hydrogène en mer (éloignement des risques et transport avantageux par pipelines).
- **Développer les infrastructures d'acheminement d'hydrogène** (pipes,

réseaux, transport par bateau) pour pallier une production d'hydrogène insuffisante en anticipation d'importantes importations européennes.

- **Adresser le besoin en compétences humaines sur les métiers en tension** identifiés en développant différents cursus de formation.

Financements et investissements

- **Officialiser le mécanisme de soutien OPEX annoncé dans le cadre de la stratégie nationale**, a priori sous forme de complément de rémunération.
- **Optimiser l'allocation des crédits dévolus à la transition énergétique** (où l'hydrogène peut se trouver en concurrence avec d'autres enjeux, notamment le déploiement indispensable des capacités de production d'énergies renouvelables).
- **Diriger les aides publiques vers les usages optimaux de l'hydrogène :** Favoriser les subventions aux usages industriels et de la mobilité (incitation sur l'achat de véhicules : achat groupé, commande publique etc. (exemple de l'Allemagne : subventions importantes pour les stations de recharge et la production de véhicules).

Capital-risque

- **Favoriser l'émergence des usages par des programmes de R&D** spécifiques (réservoirs pour les transports hydrogène).

Réglementation

- **Créer un cadre d'échange de l'hydrogène transparent et non discriminatoire**, permettant d'identifier l'hydrogène carboné et bas carbone.
- **Intégrer au code de l'énergie une clarification** concernant la production et le stockage d'hydrogène (définition, simplification des procédures de raccordement, cas d'exemption dans des zones particulières, etc.) (cf. intégration au code de l'énergie des infrastructures de recharge des véhicules électriques).
- **Mettre en place un système de traçabilité de l'hydrogène** bas carbone (cadre européen et décret français).
- **Faciliter la disponibilité du foncier** pour accélérer l'installation des énergies renouvelables (projet de loi en cours).

1. **Disponibilité insuffisante de la capacité d'électricité renouvelable** nécessaire pour répondre aux objectifs de production d'ici 2030.
2. **Évolutions réglementaires tardives** qui pénalisent le développement d'un marché de l'hydrogène bas carbone.
3. **Financements insuffisants** pour atteindre les objectifs fixés.
4. **Dépendance énergétique française** accentuée par les choix technologiques opérés par rapport à l'approvisionnement en matériaux critiques.

Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique, Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, 2018
 Stratégie Nationale Bas Carbone sous contrainte de ressources, INEC et Capgemini, 2022

Interviews

- Matthieu GUESNÉ, fondateur et président de Lhyfe
- Christelle WERQUIN, Déléguée générale de France Hydrogène

Sources détaillées

1. Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France (<https://www.economie.gouv.fr/presentation-strategie-nationale-developpement-hydrogene-decarbone-france>)
2. European Hydrogen Strategy (https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf)
3. France Hydrogène, Plan Repower EU (<https://www.france-hydrogene.org/plan-repower-eu-un-cadre-legislatif-ambitieux-pour-reduire-la-dependance-europeenne-aux-hydrocarbures-russes/>)
4. Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique (https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Plan_deploiement_hydrogene.pdf)
5. European Environment Agency, Greenhouse gas emission intensity of electricity generation in Europe <https://www.eea.europa.eu/ims/greenhouse-gas-emission-intensity-of-1>
6. McPhy <https://mcphy.com/fr/communiqués/gigafactory-mcphy/>
7. <https://gtt.fr/fr/actualités/elogen-construira-sa-future-gigafactory-vendome-dans-la-region-centre-val-de-loire>
8. Lhyfe <https://fr.lhyfe.com/nos-unites-de-production/usine-lhyfe-bouin/>; <https://fr.lhyfe.com/presse/lhyfe-annonce-lapprobation-de-son-document-denregistrement-par-lautorite-des-marchés-financiers-dans-le-cadre-de-son-projet-dintroduction-en-bourse-sur-le-marche-reglemente-deuronext-a/>
9. Air Liquide <https://www.airliquide.com/group/press-releases-news/2022-03-08/air-liquide-receives-support-french-state-its-200-mw-electrolyzer-project-normandy-and-accelerates>; <https://normandhy.airliquide.com/sites/normandhy/files/2021/11/29/cr-concertation.pdf>
10. France Hydrogène https://www.france-hydrogene.org/press_release/sur-la-trajectoire-dune-grande-ambition-hydrogene/
11. France Hydrogène, Compétences-métiers de la filière Hydrogène https://www.gouvernement.fr/sites/default/files/contenu/piece-jointe/2021/12/cma_france_hydrogene_livre_blanc_competences-metiers.pdf
12. H2V <https://h2v.net/>
13. Rapport STRATÉGIE NATIONALE BAS CARBONE, SOUS CONTRAINTE DE RESSOURCES (INEC et Capgemini)
14. France 2030 <https://www.gouvernement.fr/actualite/france-2030-un-plan-d-investissement-pour-la-france-de-demain>
15. <https://www.h2-mobile.fr/actus/ce-guide-recense-nouveaux-metiers-hydrogene/#:~:text=Sur%20les%20m%C3%A9tiers%20recens%C3%A9s,%C3%A0%20l'hydrog%C3%A8ne%20sont%20recens%C3%A9s.>
16. <https://www.hautconseilclimat.fr/wp-content/uploads/2022/06/Rapport-annuel-Haut-conseil-pour-le-climat-29062022.pdf>

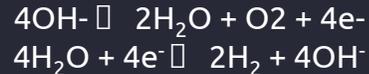


GLOSSAIRE

ALCALINS

Alcalins

Présente la meilleure compétitivité en termes de coûts (composants à faible coût) et est la technologie la plus mature, mais éprouve des difficultés avec les énergies renouvelables intermittentes. Industrialisation avancée, elle représente 70% de la production globale actuelle.



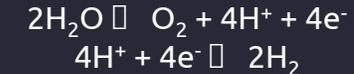
Pureté H2
99,5%

TRL
9

PROTON EXCHANGE

Proton Exchange Membrane (PEM)

La technologie PEM est la deuxième technologie la plus développée et a connu la plus forte croissance au cours de la période 2015-2020. Plus compacte et plus réactive, sa durée de vie est cependant incertaine et elle nécessite l'utilisation de métaux rares.



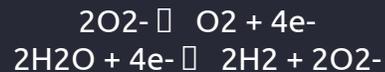
Pureté H2
99,95%

TRL
7-9

ELECTROLYSE

Electrolyse à oxyde solide (SOEC)

L'électrolyseur SOEC utilise des électrodes en nickel relativement bon marché, offre la possibilité d'être réversible (pile à combustible et électrolyseur) et produit du gaz de synthèse à partir de la co-électrolyse du CO2 et de l'H2O. Projets en développement à Rotterdam et au Danemark (Haldor Topsoe).



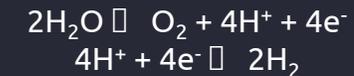
Pureté H2
99,4%

TRL
5-9

ANION EXCHANGE

Anion Exchange Membrane

L'AEM est représentée le meilleur des technologies alcaline et PEM. Cependant, cette technologie n'en est qu'à ses débuts. Il reste des efforts à fournir quant à sa stabilité sur le long terme (durée de vie) et au passage à l'échelle de cette technologie.



Pureté H2
99,95%

TRL
4-6

Anode
Cathode

Anode
Cathode