

L'HYDROGÈNE : VECTEUR DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ?

Les défis et les opportunités de l'hydrogène
pour la lutte contre le réchauffement climatique



Introduction [PAGE 3](#)

L'hydrogène, vecteur de décarbonation de l'économie [PAGE 4](#)

Les perspectives de marché [PAGE 6](#)

Les stratégies nationales [PAGE 9](#)

Conclusion : de nombreux défis à relever [PAGE 12](#)

Notre proposition de valeur [PAGE 14](#)

Annexe - Quelques fondamentaux [PAGE 15](#)

INTRODUCTION

L'hydrogène apparaît aujourd'hui comme une des solutions à fort potentiel pour décarboner des secteurs fortement émetteurs comme l'industrie et les transports, et ainsi lutter contre le réchauffement climatique. Les États-Unis, la Chine, le Japon, la Corée du Sud et de nombreux États de l'Union Européenne ont annoncé d'importants investissements pour accélérer son développement.

Toutefois l'hydrogène ne concrétisera les espoirs qu'il suscite aujourd'hui qu'à deux conditions : qu'il soit produit de manière décarbonée et qu'il soit compétitif par rapport à l'hydrogène carboné. À l'heure actuelle, aucune de ces deux conditions n'est remplie. L'hydrogène décarboné, en particulier celui produit par électrolyse à partir d'électricité bas carbone (nucléaire, solaire, éolien, hydraulique, etc.), est encore beaucoup plus coûteux que l'hydrogène produit de manière carbonée (notamment par reformage du gaz naturel). En conséquence, la production européenne d'hydrogène est aujourd'hui carbonée à plus 95 %.

L'émergence de ce marché crée de nouvelles opportunités économiques sur toute la chaîne de valeur, depuis la production d'hydrogène jusqu'aux utilisations finales, en passant par la compression, le stockage et le transport ; les acteurs qui souhaitent l'intégrer s'interrogent sur leur positionnement. Ces opportunités de développement de l'hydrogène concernent tout aussi bien l'industrie que le transport, terrestre ou maritime, ou encore des usages très ciblés tels que les bennes à ordures ménagères.

La course au déploiement massif de l'hydrogène au niveau mondial constitue un enjeu de taille pour l'Union européenne. A l'heure où la Chine déploie des capacités de production d'électrolyse colossales¹, l'Union européenne doit favoriser le développement et le passage à l'échelle des technologies d'hydrogène pour faire baisser leurs coûts et éviter de se faire distancer par les autres grandes puissances, à l'instar de ce qui est arrivé dans le secteur photovoltaïque. Un des enjeux est de faire émerger une demande forte d'hydrogène décarboné, notamment dans l'industrie où les débouchés sont les plus importants à court terme compte-tenu des volumes localisés.

L'ampleur des investissements nécessaires ainsi que le besoin de faire croître simultanément l'offre et la demande vont exiger des partenariats et une collaboration renforcée entre les acteurs historiques de l'hydrogène et de nouveaux entrants. Leur capacité à constituer des écosystèmes efficaces sera la clé de la réussite.

1 - D'après BNEF 16 GW de capacité de production pourraient être mis en ligne par les entreprises chinoises d'ici 2024 (un chiffre supérieur aux projections de la demande mondiale).

L'HYDROGÈNE, VECTEUR DE DÉCARBONATION DE L'ÉCONOMIE

De l'hydrogène pour quoi faire ?

En 2020, la demande mondiale d'hydrogène pur atteint 89 millions de tonnes, (58% pour l'industrie et 42% pour le raffinage)² et un peu moins de 10 millions de tonnes en Europe³. L'hydrogène sert principalement à désulfurer les produits pétroliers, à la synthèse d'ammoniac (nécessaire à la fabrication des engrais) et de méthanol, et comme réactif de certaines productions chimiques et métallurgiques. Il intervient également dans divers processus industriels (chimie, électronique, verre, métallurgie...).

L'hydrogène contenant 3 à 4 fois plus d'énergie par unité de masse que les carburants d'origine fossile, il présente un potentiel très intéressant comme vecteur d'énergie. Pour l'heure, cet usage est limité à la propulsion d'engins spatiaux et - de façon anecdotique - à la mobilité terrestre (trains régionaux en Allemagne, bennes à ordures ménagères au Mans,...).

Un potentiel de décarbonation important

Dans le prolongement de l'accord de Paris sur le climat, plus d'une centaine de pays et un nombre sans cesse croissant d'entreprises ont annoncé leur volonté d'atteindre la neutralité carbone (Net Zero) d'ici 2050. Du fait de sa forte densité énergétique et de l'absence d'émissions directes de CO₂ aussi bien lors de sa production que de sa combustion, l'hydrogène décarboné constitue un élément potentiellement déterminant pour réaliser cet objectif ambitieux.

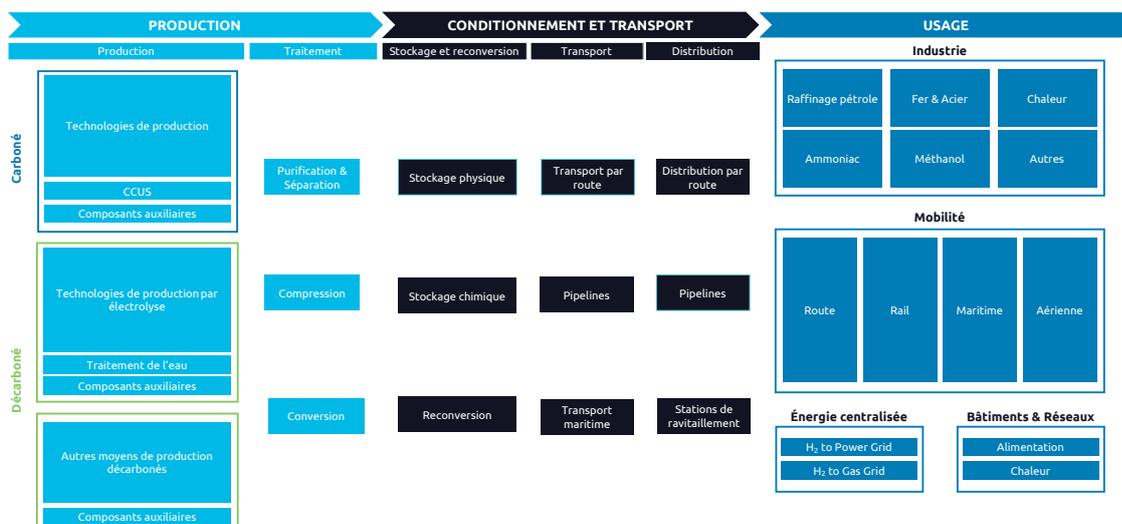
L'hydrogène peut contribuer à décarboner le secteur de l'industrie. Au niveau mondial l'hydrogène génère environ 830 millions de tonnes de dioxyde de carbone par an⁴, soit l'équivalent des émissions de CO₂ du Royaume-Uni et de l'Indonésie réunis, ou encore des émissions du secteur aérien.

En France, la consommation d'hydrogène émet une dizaine de millions de tonnes de CO₂ par an, ce qui représente près de 3% des émissions de CO₂ nationales et près de 26% des émissions de CO₂ du secteur de l'industrie. Substituer cet hydrogène carboné par une source décarbonée permettrait donc d'éviter les émissions associées.

Dans les transports, responsables de 26 % des émissions annuelles de CO₂ en Europe, il pourrait être employé pour contribuer à décarboner la mobilité terrestre, maritime et ferroviaire.

Les véhicules à hydrogène peuvent être d'une part des véhicules directement propulsés par l'hydrogène, où celui-ci sert à alimenter une pile à combustible qui produit de l'électricité pour faire tourner un moteur électrique, assurant la propulsion du véhicule. Ces véhicules ne rejettent que de l'eau. D'autre part, il peut s'agir de véhicules électriques dotés d'un prolongateur à hydrogène : les véhicules électriques dotés d'une batterie peuvent être équipés d'une pile à combustible à hydrogène qui permet de doubler leur autonomie. Ainsi, ces véhicules électriques dotés de prolongateur ont la même autonomie que les véhicules diesel, tout en n'émettant aucun gaz à effet de serre à l'utilisation.

LA CHAÎNE DE VALEUR DE L'HYDROGÈNE – VISION MACROSCOPIQUE



2 - IEA (2021), Hydrogen, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/hydrogen>

3 - Hydrogen Europe (2020), Clean Hydrogen Monitor

4 - IEA, the Future of Hydrogen, 2019

5 - Il est évident que sur le cycle de vie de ces véhicules, il y a bien des émissions de gaz à effet de serre

Au-delà des avantages liés à l'autonomie et à l'absence d'émission de gaz à effet de serre directe⁵ (à condition que l'hydrogène soit décarboné), les véhicules terrestres circulant à l'hydrogène présentent de nombreux avantages :

- grande autonomie de fonctionnement, de l'ordre de 600 km pour un poids-lourd ;
- performances routières équivalentes aux véhicules classiques et souplesse d'utilisation ;
- rapidité du « plein » d'hydrogène, en 3 à 5 minutes ;
- aucune pollution sonore.

Enfin, l'hydrogène décarboné peut lui-même permettre de décarboner certains processus industriels très énergivores et fortement émetteurs de CO₂, comme la production d'acier ou de ciment. Son utilisation dans la sidérurgie, notamment comme

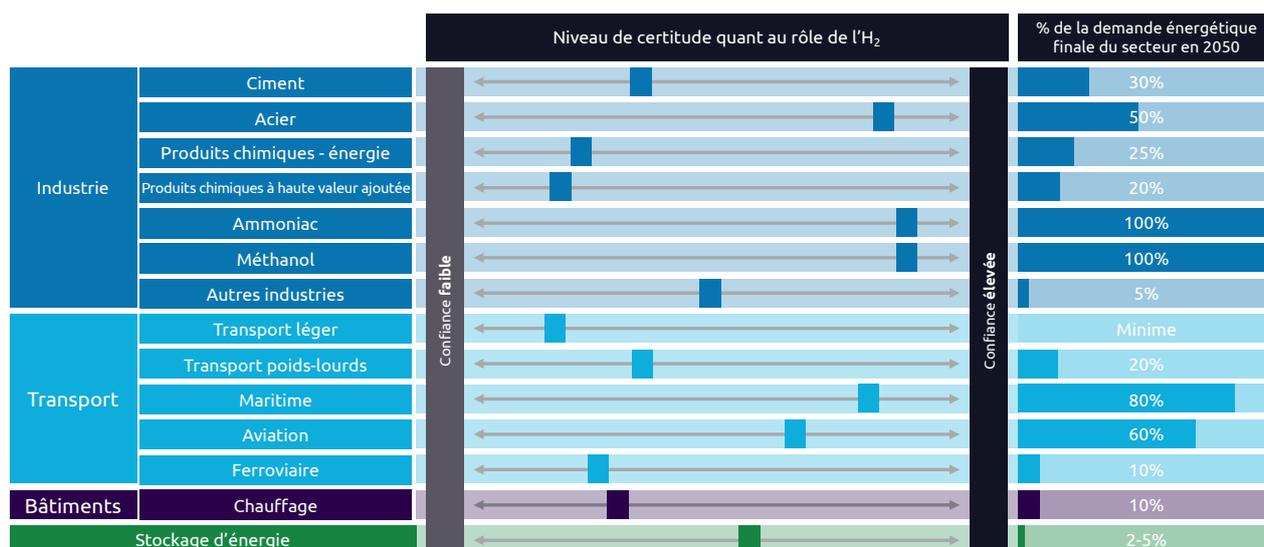
agent réducteur du minerai de fer, pourrait permettre de réduire les émissions de 13,7 millions de tonnes de CO₂ par an en Europe⁷. Globalement, c'est l'émission annuelle de 70 millions de tonnes de CO₂ qui pourrait être évitée grâce à l'utilisation d'hydrogène bas carbone dans l'industrie⁸.

Au total, recourir largement à l'hydrogène décarboné pourrait permettre d'éviter l'émission de 569 millions de tonnes de CO₂ en Europe, mais aussi d'y créer 338 milliards d'euros de valeur et 5,9 millions d'emplois⁹.

Le tableau suivant recense les utilisations potentielles de l'hydrogène décarboné comme source d'énergie dans une économie Net Zero en 2050, et la probabilité de réalisation de ces scénarios.

L'HYDROGÈNE JOUERA UN RÔLE DE PLUS EN PLUS IMPORTANT À MESURE QUE LE MONDE SE RAPPROCHERA DE L'OBJECTIF NET-ZÉRO

DEMANDE D'HYDROGÈNE DÉCARBONÉ DANS UNE ÉCONOMIE NET-ZÉRO (SCÉNARIO ILLUSTRATIF 2050)



Sources :

- SYSTEMIQ analysis for the Energy Transition Commission (2021)
- Mehmeti, A., Angelis-Dimakis, A., Arampatzis, G., McPhail, S. and Ulgiati, S., 2018. Life Cycle Assessment and Water Footprint of Hydrogen Production Methods: From Conventional to Emerging Technologies.
- EPRS | European Parliamentary Research Service, 2021. EU hydrogen policy - Hydrogen as an energy carrier for a climate-neutral economy.
- Hydrogen Council, 2021. Hydrogen decarbonization pathways: A life-cycle assessment.

Prendre en compte les émissions sur le cycle de vie

Pour jouer pleinement son rôle de décarbonation, il est nécessaire de considérer l'empreinte carbone de l'hydrogène tout au long de son cycle de vie, afin de prendre en compte par exemple les équipements de production et l'approvisionnement d'électricité". Les analyses convergent vers un hydrogène conventionnel supérieur à 12 kg CO₂/kg H₂, un hydrogène avec capture et stockage du CO₂ compris entre 1,5 et 5,1 kg CO₂/kg H₂ et un hydrogène renouvelable compris entre 0,7 et 3,2 kgCO₂/ kg H₂.

7 - Fit for net Zero, Capgemini, 2020

8 - Clean Hydrogen Monitor, Hydrogen Europe, 2020

9 - Fit for net Zero, Capgemini, 2020

LES PERSPECTIVES DE MARCHÉ

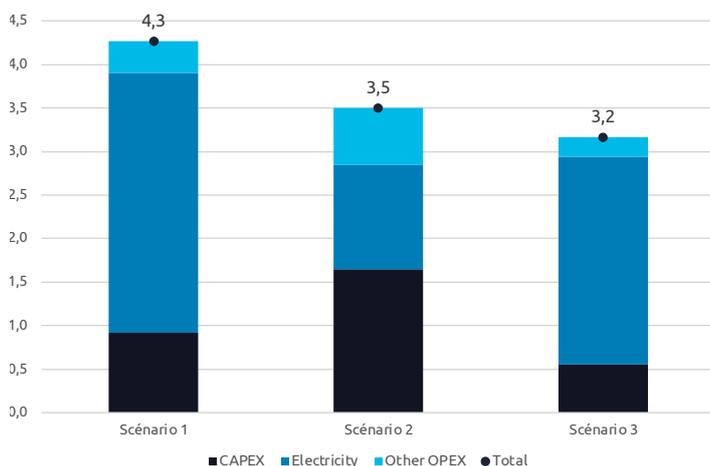
L'hydrogène décarboné n'est pas encore compétitif face à l'hydrogène carboné, malgré une tendance positive

L'hydrogène décarboné est à ce stade très peu développé, compte tenu de son manque de compétitivité. Cette situation s'explique notamment par une absence simultanée d'offre et de demande massives. En Europe, le coût de production¹⁰ de l'hydrogène décarboné varie de 3,5 €/kg au Portugal à 6,4 €/kg en Allemagne, contre environ 1,5 à 3€/kg pour l'hydrogène carboné.

Le coût de production de l'hydrogène décarboné repose principalement sur trois facteurs : en premier lieu le coût de l'électricité qui alimentent les électrolyseurs, puis le coût d'installation des électrolyseurs et enfin le facteur de charge résultant de leur intermittence.

Or, depuis quelques années, les coûts de production ont chuté : de -85% et -49% pour l'électricité solaire et éolienne depuis 2010¹¹ et -40 % pour les coûts des électrolyseurs entre 2017 et 2020¹², ce qui contribue à faire baisser les coûts de production d'hydrogène décarboné.

QUELQUES SIMULATIONS SUR LE COÛT ACTUALISÉ DE L'HYDROGÈNE



Hypothèses			
	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Electrolyseur (k€/kW)	800	800	400
Electricité (€/MWh)	50	20	40
Facteur de charge (%)	90	50	75

Source : Capgemini Invent

Hypothèses communes : électrolyseur de 150 MW, rendement à 55 kWh/kg H2 sur une durée de vie du projet de 20 ans, taux d'actualisation à 5%, inflation à 1%

Le développement de l'hydrogène décarboné est limité par l'absence d'un cadre d'échange transparent et non discriminatoire

L'hydrogène décarboné fait face à une absence de marché pour se développer. Le développement de l'hydrogène décarboné dans les secteurs de l'industrie et de la mobilité est actuellement limité par un manque de transparence du marché.

Cette situation tend à pénaliser les nouveaux acteurs, dans un contexte où le secteur est quasi-monopolistique et que le mode de production de l'hydrogène n'est pas identifiable par les acteurs. Par conséquent, il existe de fortes barrières à l'entrée sur le marché pour les nouveaux entrants, ce qui limite la structuration d'un marché et l'apparition de nouveaux clients et usages.

10 - Le coût de production inclut les CAPEX et OPEX liée à la production d'un kilogramme d'hydrogène par électrolyse, à partir de sources éoliennes ou solaires (la méthodologie de ces calculs est disponible sur Clean Hydrogen Monitor, Hydrogen Europe (2020)

11 - Bloomberg NEF 2021

12 - Gigastack, Bulk Supply of Renewable Hydrogen, Element Energy, 2020

L'hydrogène décarboné peut devenir compétitif d'ici à 2030 à plusieurs conditions

De manière générale l'offre et la demande d'hydrogène décarboné, notamment dans la mobilité, doivent être développées simultanément pour que la molécule soit rentable.

Un marché organisé d'hydrogène, à l'instar de ce qui existe dans les domaines du gaz et de l'électricité, pourrait être mis en place afin de permettre l'échange d'hydrogène dans un cadre transparent et non discriminatoire.

Le double défi des technologies et des infrastructures

Pour que ce scénario se concrétise, la décennie 2020-2030 sera décisive. C'est maintenant qu'il faut lever les verrous technologiques et construire les infrastructures. Pour favoriser les synergies, réduire les coûts et accélérer le passage à l'échelle, les efforts devront porter en priorité sur la création de larges clusters régionaux, où se côtoient déjà des activités industrielles et/ou de mobilités fortement émettrices et/ou productrices de CO₂ et d'H₂ : ce sont plus particulièrement les grands ports, desservis par des navires de taille importante, et les zones industrielles, où l'on trouve des raffineries, des aciéries ou des cimenteries. Ces sites seront les nœuds à partir desquelles se ramifieront ensuite les réseaux de transport terrestres et maritimes, régionaux dans un premier temps, puis internationaux.

Le déploiement de l'hydrogène apparaît plus rentable « en circuit court » entre les producteurs et clients (industries, mobilité, usages sectoriels tels que les bennes à ordures ménagères). Une production centralisée est difficilement soutenable techniquement, pour répondre à tous les usages, et surtout économiquement, compte tenu des coûts de production, de transport et de distribution induits.

Dans notre rapport Fit for Net-Zero publié en 2020, nous avons identifié quelques-uns des enjeux déterminants pour l'essor de la filière :

Sur le passage à l'échelle des équipements

- Développement d'électrolyseurs pour la production d'hydrogène décarboné à grande échelle ;
- Passage à l'échelle de la production de piles à combustible pour le transport lourd ;
- Pour la construction de bâtiments autonomes en énergie produisant et stockant leur hydrogène ;

Sur le retrofit des installations et des équipements des secteurs de l'industrie et du transport

- Utilisation de l'hydrogène comme agent réducteur du minerai de fer ;
- Production et utilisation d'hydrogène dans les raffineries ;
- Adoption de l'hydrogène pour le transport maritime courte et moyenne distance, et retrofit des navires existants ;
- Développement de la propulsion à hydrogène pour le transport ferroviaire ;
- Développement de l'hydrogène pour le transport poids lourd et transformation de l'industrie des véhicules lourds (camions, autocars, véhicules spéciaux,...).

Sur le soutien à l'innovation

- Pour baisser les coûts des composants et améliorer les rendements.

Pour réussir le passage à l'échelle industrielle de la filière, les investissements doivent être partagés entre les acteurs publics et privés et les débouchés sécurisés

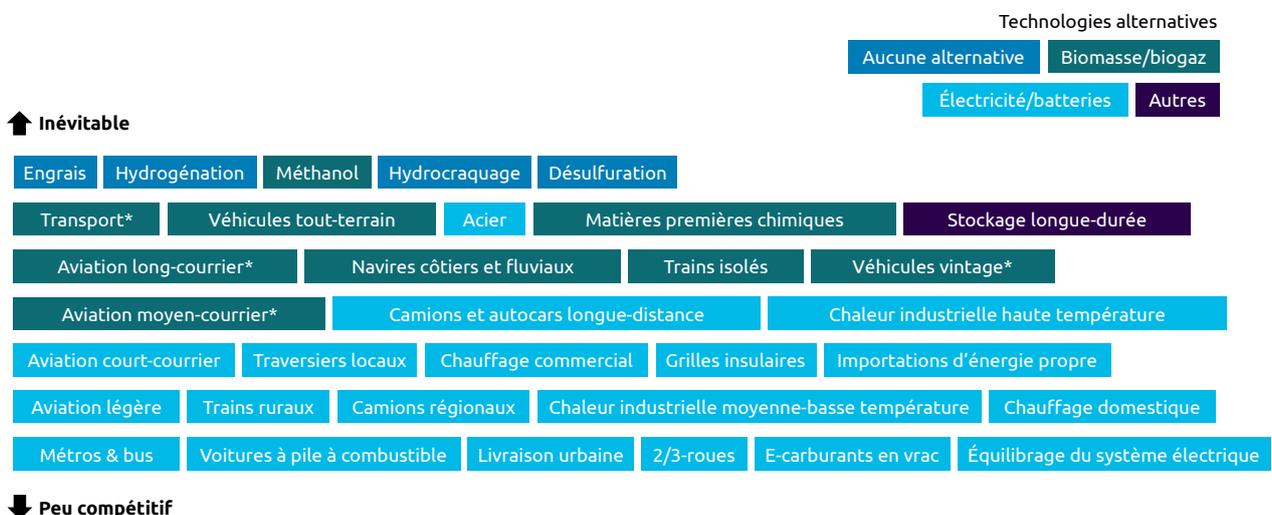
Bâtir les infrastructures et industrialiser les technologies nécessitera des investissements importants. Ces investissements représentent des risques financiers importants qui peuvent être réduits par des garanties sur les débouchés, le partage des investissements entre différents acteurs et un soutien public aux CAPEX et/ou aux OPEX.

- a) Les garanties sur les débouchés commerciaux se multiplieront à mesure que l'hydrogène décarboné deviendra une option compétitive. Certains industriels jouent déjà le jeu de la décarbonation quand d'autres sont plus attentistes, afin de faire jouer la compétition sur les prix de l'hydrogène. Aussi vertueux soit-il, l'hydrogène ne se généralisera pour les usages où il est le plus pertinent économiquement (industrie lourde, mobilité) que lorsqu'il sera suffisamment compétitif et ses applications suffisamment matures pour soutenir une demande importante.
- b) Une autre façon de réduire le risque individuel consiste à partager les investissements avec des acteurs également impliqués dans la chaîne de valeur.
- c) Enfin, le soutien financier public, tant pour les investissements initiaux (CAPEX) que pour les aides au fonctionnement (OPEX) améliore les résultats économiques des projets. Ce soutien doit être apporté à l'ensemble de la chaîne de valeur et devra viser notamment à améliorer le rendement des technologies (pile à combustible, taille des électrolyseurs, électrolyse haute température, réservoirs, ...) à tout stade de maturité des

composants, depuis la phase d'innovation jusqu'à l'industrialisation. Développer les composants de la chaîne de valeur de l'hydrogène (électrolyseurs, pile à combustible, réservoirs, ...) à une échelle industrielle permettra de baisser leurs coûts et de favoriser le développement. Les aides publiques doivent enfin permettre d'effectuer un effet de levier pour développer un réseau d'infrastructures assurant le développement d'usages de l'hydrogène comme les pipelines ou les stations d'avitaillement pour les usages de mobilité. Ces aides constituent un signal fort pour mobiliser les investisseurs privés aux côtés des autorités publiques, notamment pour développer la production et les usages de manière massive.

Le temps presse compte tenu de la compétition internationale. A titre d'exemple, Selon BloombergNEF, la Chine pourrait effectuer plus de 60 % des installations mondiales d'électrolyseurs en 2022 et développer des Greenfield industriels de grande ampleur, permettant de développer fortement la demande. La China Hydrogen Alliance ambitionne que l'hydrogène pourrait représenter 20 % du mix énergétique du pays d'ici à 2060, afin notamment de contribuer à l'objectif de neutralité carbone du pays.

LES USAGES DE L'HYDROGÈNE POUR ATTEINDRE LA NEUTRALITÉ CARBONE



*Via de l'ammoniac ou du biocarburant plutôt que de l'hydrogène gazeux ou liquide

Source : Liebreich & associates

LES STRATÉGIES NATIONALES APPORTENT DES SOUTIENS FINANCIERS CONSÉQUENTS, AVEC DES OBJECTIFS TRÈS AMBITIEUX

Pour un pays, développer sa propre filière hydrogène nationale présente un triple enjeu : **environnemental**, pour réduire ses émissions de gaz à effet de serre et tenir ses engagements en la matière ; **économique**, pour créer de la valeur ajoutée et des emplois sur son territoire ; **de souveraineté**, pour développer son indépendance énergétique, voire disposer d'une nouvelle ressource exportable.

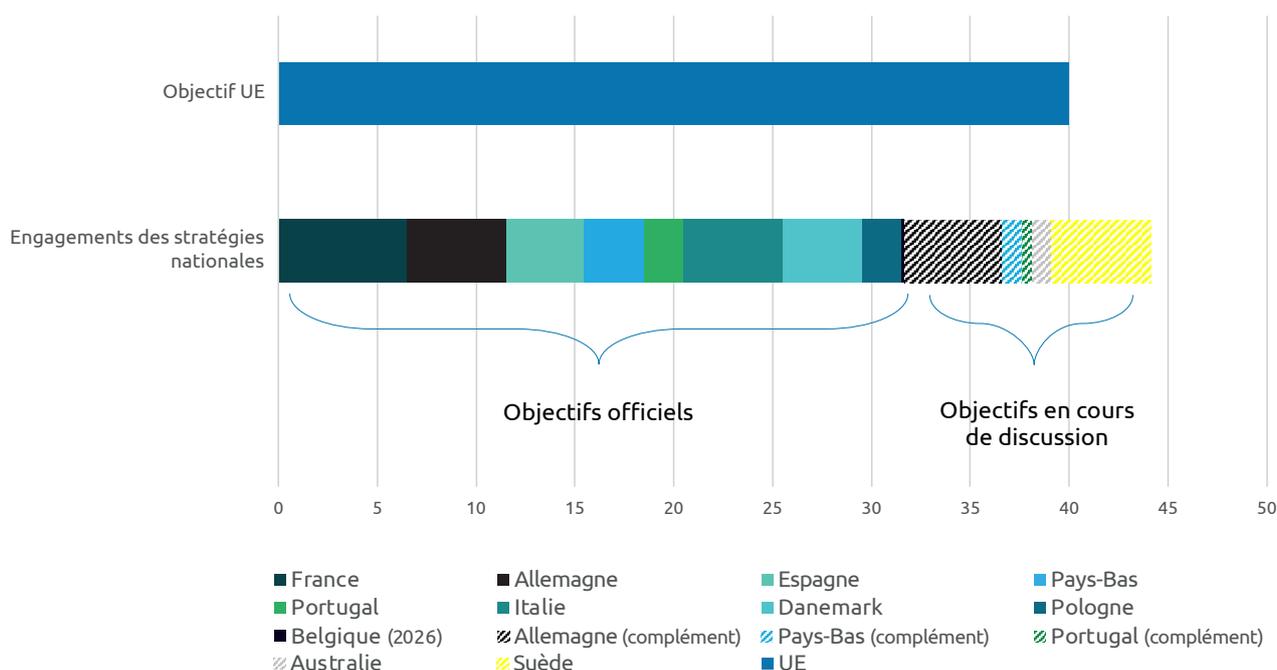
Conscients que le secteur privé n'est pas en mesure de lever seul et/ou assez vite les obstacles qui freinent aujourd'hui le développement de l'hydrogène, de nombreux gouvernements ont annoncé des plans d'aide publique conséquents. Ces stratégies nationales diffèrent selon les besoins, les ambitions et les atouts naturels et industriels de chaque pays. Tandis que certains mettent l'accent sur le développement des usages (industrie, transport...), d'autres cherchent à tirer parti de leurs ressources existantes, comme la France qui pourrait tirer parti de son parc nucléaire pour produire de l'hydrogène décarboné de façon maîtrisée et économique, ou la Norvège et l'Islande, qui pourraient exporter sous

forme d'hydrogène les surplus d'électricité que leur offrent respectivement leurs immenses capacités hydroélectriques et géothermiques.

En 2020, l'Union européenne a publié une stratégie qui vise à installer au moins 6 GW de capacités d'électrolyse d'ici 2024 et 40 GW d'ici 2030¹. Plusieurs pays de l'Union lui ont emboîté le pas. Avec une enveloppe globale d'environ 9 milliards d'euros d'ici 2030, la France met l'accent sur la décarbonation de l'industrie et des mobilités lourdes, et prévoit le développement d'une filière dotée de 6,5 GW de capacités d'électrolyse².

STRATÉGIES NATIONALES POUR L'HYDROGÈNE

LES CAPACITÉS D'ÉLECTROLYSE ANNONCÉES POUR 2030 DANS LES STRATÉGIES NATIONALES SONT DÉSORMAIS TRÈS PROCHES DE L'OBJECTIF DE L'UNION EUROPÉENNE"



L'Espagne entend consacrer 9 milliards d'euros au développement de sa filière hydrogène d'ici 2030 avec pour ambition de bâtir 4 GW de capacités d'électrolyse³. L'Allemagne prévoit quant à elle d'installer 5 GW de capacités d'électrolyse d'ici 2030 et 10 GW en 2040. Enfin, les Pays-Bas visent la construction de 500 MW de capacités d'électrolyse d'ici 2025, et de 3 à 4 GW d'ici 2030. Ils comptent également déployer 15 000 véhicules à hydrogène et 50 stations de recharge d'ici 2025, puis atteindre 300 000 véhicules en 2030. Le plan comporte aussi un volet consacré aux carburants durables pour l'aviation (qui peuvent être synthétisés à partir d'hydrogène vert et de CO₂ capturé) dont la part devra être de 14 % en 2030 et de 100 % en 2050³.

La Chine a consacré 10 milliards d'euros d'argent public au développement de l'hydrogène décarboné¹³.

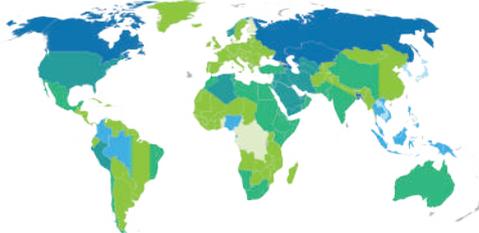
Le pays a fait de l'hydrogène une de ses priorités en matière de R&D pour contribuer à neutralité carbone avant 2060.

Ailleurs, l'Australie ambitionne de devenir un acteur mondial majeur de l'hydrogène, notamment à l'export. La production d'hydrogène apparaît en effet comme un excellent moyen de valoriser le formidable potentiel du pays en matière d'énergies renouvelables, lesquelles fourniront la moitié de l'électricité à l'horizon 2030 (contre déjà près d'un quart aujourd'hui). Quant aux États-Unis, s'ils n'ont pas de stratégie nationale en matière d'hydrogène, certains États comme la Californie ont développé leur propre feuille de route, et le Département de l'énergie (DOE) investit massivement dans la recherche.

La carte suivante résume les perspectives stratégiques des différents pays en matière d'hydrogène.

AU-DELÀ DE LA RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE DES RESSOURCES NATURELLES, LES FLUX D'HYDROGÈNE DÉPENDRONT ÉGALEMENT DES POLITIQUES ET DES INCITATIONS

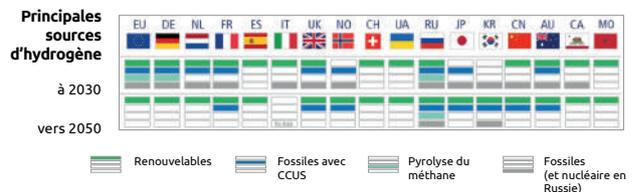
Le transport et la distribution de l'hydrogène seront développés depuis les pays attractifs vers les centres de demande



Pour répondre aux besoins en énergie décarbonée, **certains pays devront recourir aux importations** : des accords bilatéraux sont actuellement en cours de discussion, qui pourraient déboucher sur **des appels d'offres spécifiques et des régimes attractifs**



L'hydrogène vert et bleu sont généralement considérés comme des sources d'énergies viables à moyen terme



Les applications au secteur du transport font partie de la grande majorité des stratégies nationales

Utilisation de l'hydrogène par secteur	Pays																
	EU	DE	NL	FR	ES	IT	UK	NO	CH	UA	RU	JP	KR	CN	AU	CA	MO
Industrie	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Energie	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Transport	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Bâtiment	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Export	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

✓ Secteur principal ✓ Importance moindre ✗ Non-adressé

1) Prise en compte du transit des importations d'hydrogène vers d'autres pays (par exemple l'Allemagne)

2) Pour la Norvège, l'hydrogène n'est pas destiné à l'exportation directe, à travers l'exportation de GN avec CCUS

Sources : Hydrogen Council (2020), LBST & World Energy Council Germany (2020)

13 - Bien que les montants d'argent public chinois sont comparables à ceux mobilisés par les pays occidentaux, la demande se développe de manière rapide, compte tenu de la taille de son marché intérieure. La Chine a par exemple ouvert la plus grande station hydrogène au monde en juillet 2021

Des opportunités pour les entreprises

La perspective d'un hydrogène décarboné compétitif constitue une opportunité majeure pour les entreprises positionnées sur les chaînes de valeur de l'énergie et de l'hydrogène, ou qui pourraient s'y greffer.

Plusieurs typologies d'organisations sont concernées :

- des énergéticiens et des pétroliers contraints de se transformer ;
- des chimistes qui produisent, ou pourraient produire, de l'hydrogène ;
- des industriels qui pourront consommer de l'hydrogène pour décarboner leurs processus ;
- des acteurs du transport et de la mobilité intéressés par la propulsion à l'hydrogène ;
- des sociétés d'ingénierie et des équipementiers impliqués dans la construction d'infrastructures ;
- des laboratoires et des startups engagés dans le développement des nouvelles technologies et des nouveaux usages ;
- des banques et des fonds d'investissement pour financer les projets ;
- des cabinets de conseil et des intégrateurs pour les accompagner ;
- et enfin, des institutions publiques pour les encourager et élaborer le cadre réglementaire.

Toutes sont animées d'une même conviction : quiconque nourrit des ambitions dans l'hydrogène doit impérativement investir aujourd'hui tant que les places sont à prendre.

Par ailleurs, pour partager les investissements, mitiger les risques, accélérer les projets et développer en parallèle l'offre et la demande, ces acteurs sont incités à se regrouper, et la capacité à gérer ces collaborations sera l'une des clés de la réussite de la filière naissante de l'hydrogène décarboné.

Témoignant de l'essor de la filière, de nombreux projets hydrogène sont en cours de déploiement au niveau mondial :

NorthH2 dans le port de Groningen (nord des Pays-Bas) : le projet, porté par Shell, Groningen, Seaports et Gasunie prévoit d'alimenter la production de 800 000 tonnes d'hydrogène via des parcs éoliens offshore d'une capacité de 3 gigawatts (GW) d'ici 2030 et 10 GW en 2040.

Tsau Khaeb (Namibie) : projet porté par le consortium franco-allemand Hyphen Hydrogen Energy, qui vise à produire 300 000 tonnes d'hydrogène par an alimenté par un parc photovoltaïque de 5 GW. Budget : 9,4 mds de dollars

H2 Magallanes au Chili : le projet, porté par Total Eren comprendra jusqu'à 10 GW de capacité éolienne installée, une capacité d'électrolyse de 8 GW (production d'hydrogène jusqu'à 0,8 Mt/an), une usine de dessalement, une usine d'ammoniac (NH3) et des installations portuaires pour transporter l'ammoniac vert vers les marchés nationaux et internationaux.

Shore-to-Store : le port de Los-Angeles, d'un montant de 82,5 millions de dollars, engage une expérimentation grandeur nature de poids-lourds à hydrogène dans ses installations portuaires

Helios Green en Arabie Saoudite : Helios Green devrait produire quotidiennement 650 tonnes d'hydrogène par jour par électrolyse, l'équivalent de la consommation de 20.000 bus urbains à pile à combustible. Budget : 4,2 milliards d'euros

Hystra : le projet porté par Shell, Kawasaki et Iwatani qui a permis de tester le transport et le stockage d'hydrogène liquide de l'Australie vers le Japon.

CONCLUSION : DE NOMBREUX DÉFIS À RELEVER

Alternative décarbonée pour des industries fortement émettrices, solution de stockage pour les énergies renouvelables intermittentes, carburant pour les transports, ... l'hydrogène décarboné pourrait devenir l'un des vecteurs privilégiés de la transition bas carbone.

Tous les ingrédients pour que l'hydrogène décarboné se développent sont réunis : une volonté politique forte assortie de moyens conséquents, une prise de conscience des enjeux et des opportunités par les acteurs privés, des financements publics disponibles, une baisse structurelle et durable du coût de l'électricité décarbonée, un soutien important à l'innovation, des projets européens d'envergure, ...

Néanmoins, il reste beaucoup à faire pour que se concrétisent les ambitions affichées :

- Faire évoluer le cadre réglementaire, notamment la création d'un cadre d'échange de l'hydrogène transparent et non discriminatoire, permettant d'identifier l'hydrogène carboné et décarboné.
- Mettre en place un pilotage dynamique de la filière
- Faciliter la réalisation des projets au niveau territorial
- Accompagner le développement des compétences
- 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 des indispensables capacités de production d'énergies renouvelables).

Quant aux entreprises, si elles veulent saisir les opportunités liées à l'essor de l'hydrogène décarboné, il va leur falloir répondre à une multitude de questions :

- **Stratégiques** : sur quels marchés, quels usages, quels segments, se positionner ? à quel niveau de la chaîne de valeur se situer ? avec quel modèle d'affaires ?
- **Partenariales** : avec qui s'associer ? quels seront les rôles de chacun ? quelle sera la gouvernance ? comment se partageront les investissements et les revenus ?
- **Technologiques** : quelles solutions choisir ? sont-elles assez matures ? comment les mettre en œuvre ? comment les développer et passer à une échelle industrielle ?
- **Opérationnelles** : comment conduire des projets dans des écosystèmes vastes et inédits (grands groupes, PME, startups, collectivités...) ? comment les sécuriser ?
- **IT** : de quels outils de pilotage et de simulation se doter pour mieux décider et aller plus vite ?
- **Humaines** : quelles seront les compétences nécessaires ? comment les recruter, les former ?

Issus du monde de l'énergie, des transports, de la chimie ou de l'industrie, de très nombreux acteurs partagent un même engouement pour l'hydrogène, mais seuls ceux qui sauront répondre vite et bien à l'ensemble de ces interrogations pourront tirer leur épingle du jeu. Pour leur plus grand bénéfice et celui de la planète.

Les investissements pour les usages de long terme de l'hydrogène ne doivent cependant pas se faire au détriment d'autres transformations nécessaires pour la décarbonation du système énergétique, notamment l'efficacité énergétique et le développement de capacités de production d'électricité peu carbonée (renouvelable ou nucléaire).

CAPGEMINI, ACTEUR D'AVENIR DE LA FILIÈRE HYDROGÈNE DÉCARBONÉ

GET THE FUTURE
YOU WANT*

*Capgemini, le futur que vous voulez

NOTRE PROPOSITION DE VALEUR

Pour de très nombreuses entreprises, les ruptures que promet l'hydrogène sont porteuses d'opportunités, que ce soit pour jouer un rôle en amont de la filière ou pour réduire leur empreinte carbone. Quelles que soient leur positionnement ou leurs ambitions, Capgemini Invent est là pour les accompagner.

De la startup au cluster industriel, des aspects stratégiques à la gestion de projets collaboratifs complexes en passant par les sujets technologiques les plus pointus, les experts de Capgemini Invent sont présents aux côtés de tous ceux qui veulent accomplir la révolution de l'hydrogène.

Capgemini Invent accompagne l'émergence de l'hydrogène décarboné de la réflexion d'un projet à son déploiement industriel :

Capgemini invent accompagne les réflexions stratégiques des entreprises via :

Une connaissance fine des perspectives de développement économique et du marché de l'hydrogène décarboné et de la décarbonation de l'industrie.

Une bonne connaissance de la filière hydrogène à travers des contacts établis dans les entreprises de l'ensemble de la chaîne de valeur (grandes entreprises, ETI, PME, startup) et institutions publiques.

Des outils de modélisation économique sur l'ensemble de la chaîne de valeur.

Le cabinet orchestre les consortiums et gère des projets collaboratifs complexes à travers l'alignement de la gouvernance, en clarifiant les schémas directeurs et les business cases via :

Une position de tiers de confiance vis-à-vis des acteurs publics et privés impliqués dans le développement de l'hydrogène, en particulier dans la constitution d'écosystèmes.

Une connaissance approfondie de l'accompagnement dans le financement public et privé des entreprises (guichets de financements publics locaux, nationaux et européens et dispositifs de financements privés (dettes, fonds propres)).

Pour les startups et/ou les business units innovantes, Capgemini Invent accompagne la création des activités, des offres jusqu'à leur commercialisation via :

Des ressources pour accompagner le passage à l'échelle industrielle d'une startup.

Des liens établis avec les institutions « deeptech » (Bpifrance, Pôle de compétitivité, SATT, ...).

Déploiement et passage à l'échelle via :

Des ressources compétentes techniquement pour accompagner une entreprise dans la structuration, le déploiement, la mise en œuvre, et le suivi de projets d'envergure, notamment d'infrastructure, et la structuration de modèles d'affaires complexes et innovants, avec une multitude d'acteurs.

Au-delà de la proposition de valeur de Capgemini Invent, le groupe Capgemini dispose de compétences techniques poussées, notamment chez Capgemini Engineering, pour accompagner à la fois la R&D de technologies de pointe dans l'hydrogène (e.g. réservoirs, pile à combustibles, ...) et leur déploiement industriel.

ANNEXE QUELQUES FONDAMENTAUX

L'hydrogène (H) est l'élément chimique le plus simple, le plus léger et le plus répandu dans l'Univers, dont il constitue environ 75 % de la masse. Sur Terre, à l'état naturel, il est essentiellement présent dans l'eau (H₂O). Il est également présent dans les émanations natives de (CH₄) et plus rarement, de dihydrogène gazeux (H₂). Dans la suite du document, on utilisera par commodité le terme « hydrogène » pour désigner le dihydrogène.

La production d'hydrogène

L'hydrogène est le plus souvent obtenu par reformage du méthane. Ce procédé de fabrication émet du CO₂ en plus de l'hydrogène.

Un autre procédé est la gazéification du charbon de bois. L'opération consiste à mélanger du carbone et de l'eau, brûlé à haute température (>1000 degrés). Le bois libère des gaz pour obtenir de l'hydrogène et du monoxyde de carbone.

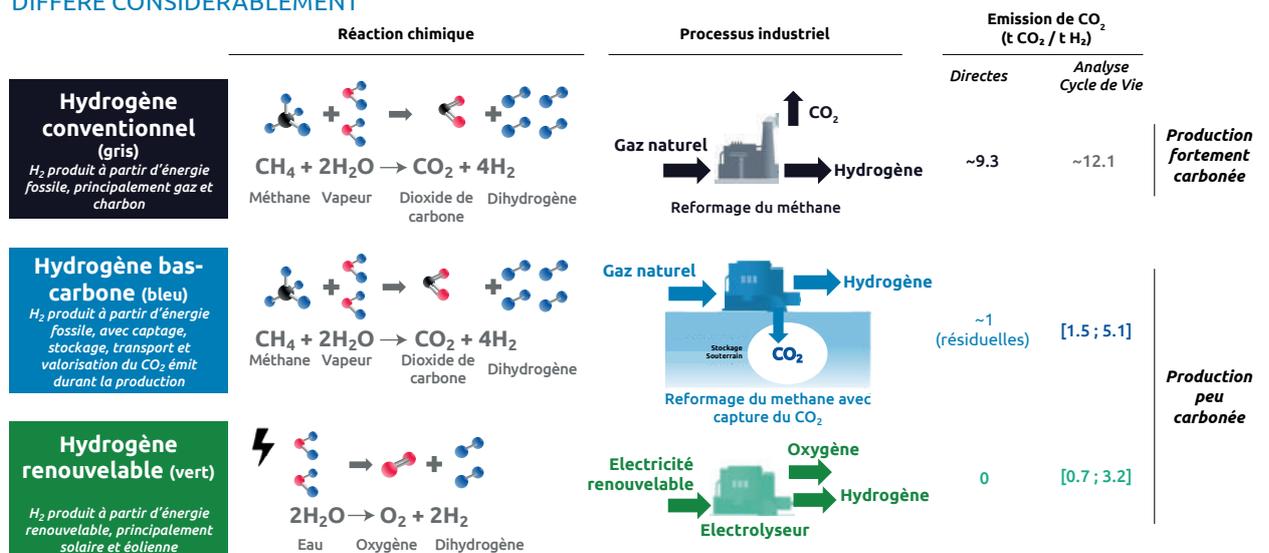
L'hydrogène peut également être produit par électrolyse de l'eau. L'opération produit de l'hydrogène et de l'oxygène. Son bilan carbone direct se ramène par conséquent à celui de l'électricité employée et il est donc nul si cette dernière provient d'une source décarbonée (comme le nucléaire ou les renouvelables). L'électrolyse de l'eau est actuellement très peu utilisée.

Les différentes méthodes de production sont parfois désignées par des couleurs (hydrogène

gris, vert, bleu...), mais ces appellations ne sont pas standardisées et n'ont pas de signification réglementaire. Dans la suite du document, nous distinguerons seulement l'hydrogène décarboné (ex : électrolyse alimentée par de l'électricité bas carbone ou la pyrolyse de biomasse végétale) et l'hydrogène carboné (reformage du méthane, gazéification du charbon ou électrolyse alimentée par de l'électricité carbonée).

La figure suivante détaille les procédés industriels de production d'hydrogène les plus courants. On notera que les émissions directes du reformage du méthane avoisinent les 10 kilogrammes de CO₂ par kilogramme d'hydrogène produite, quantité ramenée à un kilogramme environ grâce aux technologies de capture et de stockage de carbone. Enfin, obtenu exclusivement à partir d'eau et d'énergies renouvelables, l'hydrogène décarboné ne s'accompagne d'aucune émission directe de gaz à effet de serre.

IL EXISTE DIFFÉRENTS MODES DE PRODUCTION D'HYDROGÈNE POUR LESQUELS L'INTENSITÉ CARBONE DIFFÈRE CONSIDÉRABLEMENT



Sources :

- Mehmeti, A., Angelis-Dimakis, A., Arampatzis, G., McPhail, S. and Ulgiati, S., 2018. Life Cycle Assessment and Water Footprint of Hydrogen Production Methods: From Conventional to Emerging Technologies.
- EPRS | European Parliamentary Research Service, 2021. EU hydrogen policy - Hydrogen as an energy carrier for a climate-neutral economy.
- Hydrogen Council, 2021. Hydrogen decarbonization pathways: A life-cycle assessment.

Auteurs

Benoit Calatayud

Directeur Transition Energétique
benoit.calatayud@capgemini.com

Anne-Lise Miglietti

Manager Transition Energétique
anne-lise.miglietti@capgemini.com

À propos de Capgemini Invent

Capgemini est un leader mondial, responsable et multiculturel, regroupant 325 000 personnes dans plus de 50 pays. Partenaire stratégique des entreprises pour la transformation de leurs activités en tirant profit de toute la puissance de la technologie, le Groupe est guidé au quotidien par sa raison d'être : libérer les énergies humaines par la technologie pour un avenir inclusif et durable. Fort de 55 ans d'expérience et d'une grande expertise des différents secteurs d'activité, Capgemini est reconnu par ses clients pour répondre à l'ensemble de leurs besoins, de la stratégie et du design jusqu'au management des opérations, en tirant parti des innovations dans les domaines en perpétuelle évolution du cloud, de la data, de l'Intelligence Artificielle, de la connectivité, des logiciels, de l'ingénierie digitale et des plateformes. Le Groupe a réalisé un chiffre d'affaires de 18 milliards d'euros en 2021.

Get the Future You Want* | www.capgemini.com/invent

**Capgemini, le futur que vous voulez*