



Hydrogène à l'horizon:  
à vos marques,  
presque prêts,  
partez ?



# Introduction

Les débats sur les transitions énergétiques négligent fréquemment le rôle des molécules propres et de la chaleur. Combinées à une plus grande électrification, les molécules propres (par exemple, les carburants à base d'hydrogène, le gaz naturel avec captage, utilisation et stockage du carbone (CCUS), les biocarburants, etc.) peuvent jouer un rôle majeur pour décarboner d'autres domaines et usages, dans une économie « plus circulaire » pour le carbone. La COP26 renforce l'ambition de nombreux pays et entreprises de devenir neutres sur le plan climatique et d'atteindre le zéro-émissions. C'est dans ce contexte que l'intérêt pour l'hydrogène propre en tant que vecteur énergétique est en plein essor dans le monde entier, les pays et les entreprises cherchant à explorer son potentiel pour décarboner les secteurs et les usages difficiles à décarboner et fournir un stockage flexible pour une quantité croissante d'énergies renouvelables variables. Bien que le véritable potentiel de l'hydrogène dans les futurs systèmes énergétiques reste flou, les ambitions sont de plus en plus grandes en ce qui concerne les nouvelles opportunités économiques et sociales, notamment pour contribuer à la relance post-Covid-19. À l'heure actuelle, la demande d'hydrogène est largement concentrée dans l'industrie pétrochimique ; on commence à explorer son potentiel dans d'autres domaines dans le cadre d'études pilotes à faible capacité dont l'objectif est de prouver la viabilité et de réduire les coûts importants de la production de l'hydrogène à faible teneur en carbone et de sa distribution. Avec un intérêt et un soutien croissants, il est urgent de démêler les différents facteurs sous-jacents et les opportunités effectives pour mieux comprendre le potentiel réel de l'hydrogène propre dans les systèmes énergétiques et dans les transitions énergétiques.

L'ambition d'*Humaniser l'énergie* du Conseil Mondial de l'Énergie souligne notamment la nécessité de dépasser les perspectives énergétiques traditionnelles centrées sur l'offre pour se concentrer davantage sur la demande et le rôle des consommateurs pour mieux prendre en compte les innovations disruptives du côté de la demande. Il s'est de fait avéré particulièrement difficile de mieux comprendre la demande d'hydrogène à ce stade embryonnaire de son développement.

Pour mieux comprendre le développement de l'hydrogène dans le monde, le Conseil Mondial de l'Énergie, en collaboration avec l'EPRI et PwC et en s'appuyant sur l'expertise et l'expérience de son réseau mondial, a récemment publié plusieurs documents de travail et une synthèse en anglais sous le titre « Hydrogen on the horizon : ready, almost ready, go ? ». L'objectif est de lancer un dialogue entre toutes les parties prenantes, à tous les niveaux, sur le rôle de l'hydrogène dans les transitions énergétiques.

Le travail a permis d'identifier quatre domaines pour une discussion plus approfondie :

- **Des divergences importantes apparaissent entre les pays et les régions**, les stratégies nationales hydrogène révélant des positionnements différents sur le rôle de l'hydrogène dans les transitions énergétiques. Cela montre qu'il est nécessaire d'embrasser la diversité - en éliminant l'idée d'un modèle unique - et de permettre l'exploration de technologies et d'utilisations différentes.
- La **confusion sur les « couleurs » étouffe l'innovation**, la simplification excessive et les préjugés sur les couleurs risquant d'exclure prématurément certaines voies technologiques qui pourraient être plus rentables et plus efficaces du point de vue des émissions de carbone. Il est nécessaire de poursuivre le dialogue au-delà de la couleur et d'explorer également l'équivalence carbone.
- **Des perspectives de l'hydrogène axées sur la demande sont nécessaires pour faire progresser l'humanisation de l'énergie**. Le débat actuel est fortement axé sur l'offre, sans tenir compte du rôle des utilisateurs de l'hydrogène. Les discussions doivent explorer ce qui est nécessaire pour déclencher la demande, en mettant l'accent sur le développement des infrastructures de l'hydrogène et d'une chaîne d'approvisionnement mondiale.

- **L'économie de l'hydrogène pourrait stimuler la création d'emplois et la croissance économique**, contribuant ainsi à réaliser l'ambition de « construire ensemble l'avenir » après la pandémie de Covid-19. Plusieurs stratégies nationales hydrogène soulignent que l'emploi est un facteur important du développement de l'hydrogène, avec des possibilités de requalification de la main-d'œuvre existante et de perfectionnement d'une nouvelle main-d'œuvre.

Pour contribuer au dialogue sur ces quatre sujets, cette publication est organisée en trois chapitres, fournissant des informations supplémentaires sur :

1. Les stratégies nationales hydrogène
2. Contributions de dirigeants sur le développement de l'hydrogène
3. La dynamique de la demande et des coûts de l'hydrogène

#### Note

Ce document de travail s'appuie sur des travaux antérieurs du Conseil et a nécessité des recherches approfondies sur l'évolution des stratégies nationales et des entretiens avec 38 experts de 23 pays, reflétant 61 % de l'approvisionnement total en énergie primaire (données 2018, OCDE) et 70 % du PIB mondial (données 2019, BM). Il a été élaboré par le Conseil Français de l'Énergie à partir de la traduction de quatre documents (un résumé et trois documents de travail) publiés en anglais par le Conseil Mondial de l'Énergie : ces documents de référence sont disponibles sur le site du Conseil Français de l'Énergie.

<https://www.wec-france.org/publications/>

- Hydrogen on the horizon: ready, almost set, go?
- National hydrogen strategies
- Input from senior leaders on hydrogen developments
- Hydrogen demand and cost dynamics

Ces quatre documents sur l'hydrogène font partie d'une série de publications du Conseil Mondial de l'Énergie axées sur l'innovation. Ils ont été élaborés en collaboration avec l'Electric Power Research Institute (EPRI) et PwC.

# **Chapitre 1**

## **Les stratégies nationales hydrogène**

# 1. Panorama mondial des stratégies nationales hydrogène

Le développement d'une « économie de l'hydrogène » n'en est encore qu'à ses débuts. Peu de pays ont déjà publié une stratégie hydrogène mais on constate un intérêt et un soutien croissants au niveau mondial. À ce jour, 12 pays et l'Union européenne (UE) ont publié leurs stratégies hydrogène dont 9 au cours de la seule année dernière. Dix-neuf autres pays sont en train de rédiger leur stratégie et beaucoup d'entre eux prévoient de la publier en 2021 ce qui témoigne d'une nette accélération de l'intérêt des gouvernements soutenu par le rôle de catalyseur que pourrait jouer la COP26.

Quelques pays ont été particulièrement influents avec leur stratégie hydrogène. L'engagement précoce du Japon a suscité l'intérêt de la région Asie-Pacifique et la Corée du Sud et l'Australie ont publié leur stratégie peu après. L'Allemagne a été l'un des premiers pays à s'engager en Europe et a contribué à promouvoir la stratégie hydrogène de l'UE pendant sa présidence du Conseil. En Amérique latine, le Chili a agi rapidement et de nombreux pays voisins sont en train d'élaborer leur stratégie.

	Discussions politiques, déclarations officielles, premiers projets de démonstration			Stratégie en cours d'élaboration	Stratégie disponible
Afrique	Cap-Vert Burkina Faso	Mali Nigeria	Afrique du Sud Tunisie	Égypte Maroc	
Asie	Bangladesh	Hong Kong, Chine	Inde	Chine Nouvelle-Zélande Singapour Ouzbékistan	Australie (2019) Japon (2017) Corée du Sud (2019)
Europe	Bulgarie Croatie République tchèque Danemark Estonie Finlande*	Géorgie Grèce Islande Lituanie Luxembourg Malte	Roumanie Serbie Slovénie Suisse Turquie Ukraine	Autriche Belgique Italie Pologne Fédération de Russie* Suède Slovaquie Royaume-Uni#	Union européenne (2020) France (2020) Allemagne (2020) Pays-Bas (2020) Norvège (2020) Portugal (2020) Espagne (2020) Hongrie (2021)
Amérique latine et Caraïbes	Argentine Bolivie Costa Rica	Panama Paraguay	Pérou Trinité-et-Tobago	Brésil Colombie Uruguay	Chili (2020)
Moyen-Orient et États du Golfe	Israël	Émirats arabes unis		Oman Arabie saoudite	
Amérique du Nord	Mexique	États-Unis d'Amérique			Canada (2020)

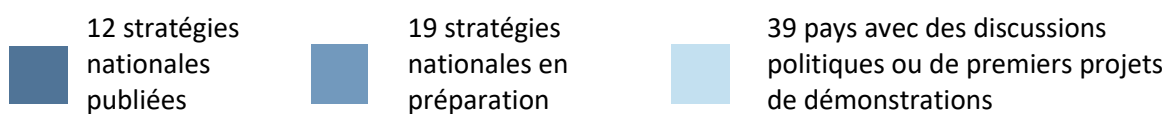
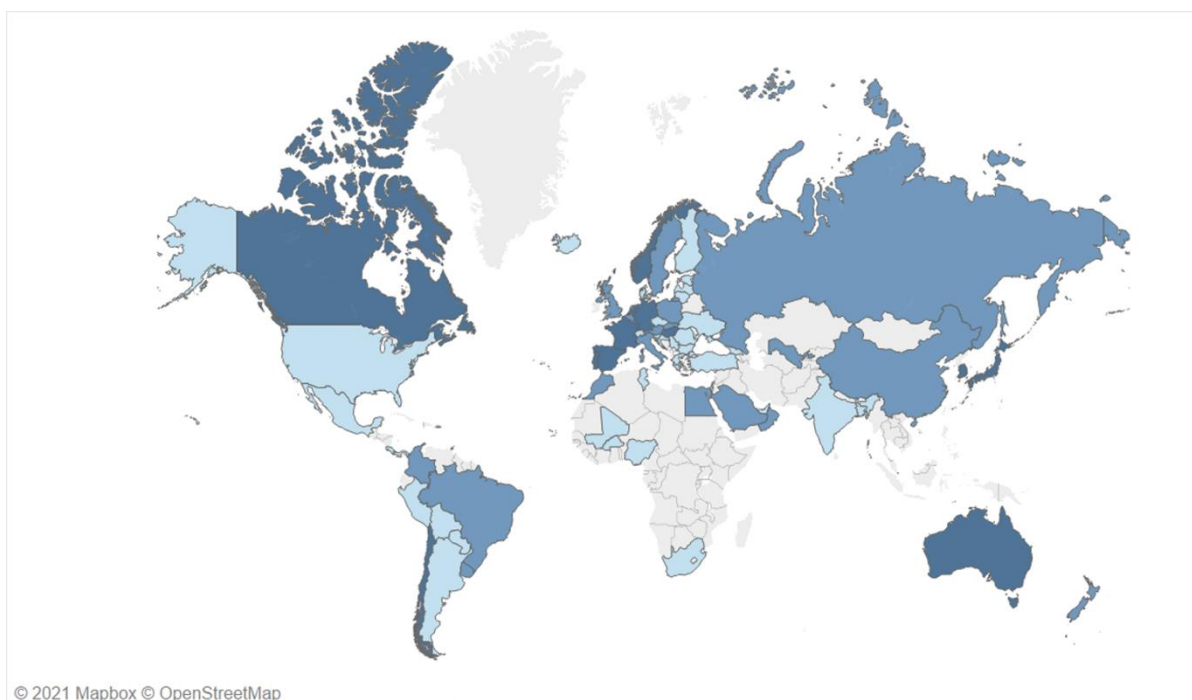
\*Feuille de route disponible #Le Royaume-Uni a depuis publié sa stratégie hydrogène

## Source : Conseil Mondial de l'Énergie

Note : Le tableau est arrêté au 7 juin 2021. Pour cette évaluation, on considère qu'une stratégie nationale pour l'hydrogène est un document officiel consacré au développement de l'hydrogène dans le pays avec un soutien de haut niveau de l'État. Les livres blancs et les feuilles de route publiés ne sont pas considérés comme des stratégies nationales si une stratégie est en préparation.

## Tableau 1 - Aperçu des activités des pays en vue de l'élaboration d'une stratégie pour l'hydrogène

Les contextes nationaux sont essentiels pour déterminer comment les pays pourraient utiliser l'hydrogène dans leurs transitions énergétiques, le développement potentiel de l'hydrogène suivant une pluralité de trajectoires et de priorités sectorielles différentes (voir section 3), s'appuyant sur des sources d'approvisionnement différentes et utilisant des outils politiques variés pour encourager l'intégration de l'hydrogène (voir section 4).



**Figure 1 – Avancement des pays dans l'élaboration d'une stratégie hydrogène**

## 2. Aperçu synthétique des stratégies nationales hydrogène

Le tableau 2 (page suivante) tente de résumer les objectifs et les priorités sectorielles des stratégies nationales hydrogène publiées.

Tableau 2 – Synthèse des stratégies nationales

	Asie			Europe						Amérique latine			Amérique du nord
	Australie	Japon	Corée du sud	UE	France	Allemagne	Hongrie	Pays-Bas	Norvège	Portugal	Espagne	Chili	Canada
La stratégie contient un calendrier et des objectifs de développement du marché avec des objectifs	●	●	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●	●
La stratégie contient des objectifs de coût de l'hydrogène	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
La stratégie comprend des mesures de soutien au développement de l'hydrogène	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●	●	●	●
Investissements directs	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●	●	●	●
Autres mécanismes économiques et financiers	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Mesures législatives et réglementaires	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Stratégie et priorités en matière de	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Initiatives de R & D	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Stratégie internationale	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
La stratégie aborde les questions sociales du développement de H2	●	●	●	○	●	●	○	●	●	●	●	●	●
La stratégie comprend l'examen et la mise à jour	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Objectif d'origine de l'hydrogène en 2030	Propre	Fossile avec CSC	Gaz naturel	Bas carbone	Bas carbone et fossile	Sans carbone	Bas carbone et sans carbone	Bleu et vert	Propre	Vert	Renouvelable	Vert	Faible intensité carbone
Objectif d'origine de l'hydrogène en 2050	Propre	Sans CO2	Écologique et sans CO2	Propre / Renouvelable	Bas carbone	Renouvelable	Bas carbone et sans carbone	Vert	Propre	Vert	Renouvelable	Vert	Faible intensité carbone
Importation / Autonomie / Exportation	Exportation Autonomie	Importation	Importation Exportation (technologie)	Dépend des États membres	Exportation	Importation Exportation (technologie)	Autonomie	Importation pour exporter (UE hub)	Autonomie	Autonomie Exportation	Autonomie Exportation	Autonomie Exportation	Autonomie Exportation
<b>PRINCIPAUX OBJECTIFS / DRIVERS</b>													
Décarbonation	Faible	Immédiate	Faible	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Immédiate
Diversification de l'approvisionnement en énergie	Faible	Immédiate	De long terme	Faible	Faible	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Faible	Immédiate	Immédiate	Faible	Immédiate
Croissance économique	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Faible	Immédiate	Immédiate	Faible	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Immédiate
Intégration des énergies renouvelables	Faible	Faible	De long terme	Immédiate	Faible	Immédiate	Faible	Immédiate	Faible	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Immédiate
<b>PRIORITÉS SECTORIELLES</b>													
Chauffage	Immédiate	Immédiate	Faible	Faible	Faible	Faible	Immédiate	Immédiate	Faible	Immédiate	Faible	Immédiate	Immédiate
Industrie - Fer et acier	De long terme	Faible	Faible	De long terme	Immédiate	Immédiate	De long terme	Immédiate	Faible	Immédiate	Faible	Nsp	Immédiate
Industrie - Chimie	Immédiate	Faible	Nsp	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Immédiate
Industrie - Raffinage	Nsp	Faible	Nsp	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Faible	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Immédiate
Industrie - Autres (ciment, etc.)	Nsp	Nsp	Nsp	Nsp	Immédiate	Faible	De long terme	Faible	Nsp	Immédiate	Faible	Nsp	Immédiate
Électricité - Production	Faible	Immédiate	Immédiate	Faible	Nsp	Nsp	Faible	Faible	Nsp	Faible	Faible	Nsp	Immédiate
Électricité - Backup	Faible	Faible	Faible	Faible	Nsp	Nsp	De long terme	Faible	Nsp	Faible	Faible	Nsp	Faible
Transport - Véhicules de tourisme	Faible	Immédiate	Immédiate	Faible	Faible	Faible	De long terme	Immédiate	Faible	Faible	Faible	De long terme	Immédiate
Transport - Travaux moyens et lourds	Immédiate	De long terme	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Faible	Immédiate	Faible	Immédiate	Immédiate
Transport - Autobus	Immédiate	De long terme	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Faible	Immédiate	Faible	Immédiate	Immédiate
Transport - Rail	Faible	Faible	Faible	Immédiate	Immédiate	Immédiate	Faible	Immédiate	Nsp	Faible	Faible	Nsp	De long terme
Transport - Maritime	De long terme	Faible	Faible	De long terme	Faible	De long terme	Faible	Faible	Immédiate	Faible	Faible	De long terme	De long terme
Transport - Aviation	Faible	Faible	Nsp	De long terme	Immédiate	De long terme	Nsp	Faible	Faible	Faible	Faible	De long terme	De long terme

Contenu des stratégies : ● Détaillé ● Mentionné ○ Pas vu

Objectifs et priorités du secteur : Priorité immédiate Priorité de long terme Priorité basse Pas vu



### 3. Priorités sectorielles

La diversité des contextes nationaux rend les priorités sectorielles très différentes d'un pays à l'autre et aucun secteur prioritaire mondial n'a encore émergé. De plus, beaucoup de technologies de production et d'applications envisagées pour l'hydrogène n'ont pas encore fait leurs preuves sur le plan commercial, même si certains domaines font l'objet d'un consensus plus large que d'autres.

Au niveau mondial, la décarbonation est la principale explication de l'intérêt croissant pour l'hydrogène. De nombreux pays étudient comment l'hydrogène peut contribuer à réduire les émissions des secteurs les plus difficiles à décarboner. L'intérêt va du transport lourd et de longue distance (bus, camions, etc.) aux secteurs industriels à forte intensité carbone qui consomment déjà de l'hydrogène produit à partir de combustibles fossiles (raffineries, engrais, acier). D'autres utilisations nécessitent des innovations et des mesures de soutien supplémentaires pour adopter l'hydrogène. Ainsi, certains pays étudient la possibilité d'utiliser l'hydrogène pour le chauffage des locaux, la recherche portant sur la reconversion des infrastructures existantes (par exemple, transformer les conduites de gaz naturel en conduites dédiées à l'hydrogène, reconvertir les chaudières, etc.). Des possibilités dans le domaine de l'aviation sont en train d'émerger, mais à un rythme plus lent en raison de la complexité des systèmes aéronautiques et des considérations de sécurité. Le *Hydrogen Council* [Hydrogen Council, 2021] prévoit que l'hydrogène à faible teneur en carbone pourrait être compétitif pour 22 usages d'ici à 2030. D'autres innovations dans les technologies liées à l'hydrogène et dans des solutions alternatives devraient voir le jour au cours des prochaines années, ce qui pourrait avoir un effet sur la compétitivité de l'hydrogène dans de nombreuses applications. Par ailleurs, les infrastructures de production, de transport et de stockage de l'hydrogène posent des problèmes importants pour leur adoption pour certains usages. Le coût de l'infrastructure, qui dépend de la localisation de l'offre et de la demande, des technologies utilisées et du soutien public et privé dans la phase initiale, peut constituer un risque pour les développements ultérieurs. Enfin, les risques liés au développement de projets d'énergie renouvelable à grande échelle, de la disponibilité des terres à l'acceptation par le public, s'ajoutent aux défis associés à l'adoption de l'hydrogène.

À court terme, les pays mettent l'accent sur des ambitions différentes en matière d'hydrogène.

***« L'hydrogène aujourd'hui n'est pas une bulle mais le sentiment de beaucoup de gens est en avance de plusieurs pas sur la réalité concrète. L'adoption sera probablement plus lente que ce qu'annoncent les enthousiastes. »***

**PHILIPP HASLER, EMERALD VENTURES, SUISSE**

#### 3.1. Japon et Corée du Sud : des économies qui développent l'hydrogène

Le Japon et la Corée du Sud ont des économies avancées et des ressources énergétiques naturelles limitées; ils ont donc été de grands importateurs d'énergie. Ils partagent plusieurs priorités sectorielles, notamment en ce qui concerne l'électricité, le Japon ayant déjà des objectifs de production d'électricité à partir de l'hydrogène. L'accent est mis sur la production décentralisée d'électricité à petite échelle utilisant l'hydrogène pour alimenter des piles à combustible à usage domestique (Système ENE-FARM) déployées au Japon pour produire de l'électricité et de l'eau chaude. En Corée du Sud, le gouvernement étudie la production centralisée d'électricité ainsi que l'utilisation de piles à combustible par des systèmes décentralisés dans les foyers et les bâtiments et a fixé des objectifs ambitieux. Les deux pays s'intéressent également au secteur des transports, en mettant l'accent sur les véhicules à pile à combustible (FCV – Fuel Cell Vehicle) qui seront déployés sur les

marchés nationaux, avec des objectifs pour les véhicules légers. La Corée du Sud, en particulier, vise à devenir un leader mondial des véhicules à hydrogène et se concentre sur les marchés d'exportation potentiels.

### **3.2. Australie : focus sur les exportations**

En revanche, l'Australie est un grand exportateur d'énergie et la stratégie australienne met davantage l'accent sur la production et l'exportation d'hydrogène. Elle envisage également sa propre utilisation dans les transports, en se concentrant sur les transports lourds et longue distance, et sur la production à grande échelle d'ammoniac propre.

### **3.3. Europe : décarboner l'industrie et les transports**

L'Europe est un grand consommateur d'énergie qui a pour objectif d'accroître la part des énergies renouvelables dans la plupart de ses pays membres, avec des capacités renouvelables limitées. L'objectif principal de l'utilisation d'hydrogène propre en Europe est de décarboner l'industrie même si les transports sont aussi dans la cible. En Allemagne, l'accent est mis sur les industries chimiques, pétrochimiques et sidérurgiques, ainsi que sur les véhicules lourds tels que les véhicules militaires, les transports routiers et les bus. La France se concentre sur le remplacement de l'hydrogène carboné dans les secteurs industriels existants (par exemple, le raffinage, la chimie, l'agroalimentaire) tout en envisageant des projets pilotes dans les secteurs maritime et aérien et en cherchant à devenir un producteur clé d'électrolyseurs. Aux Pays-Bas, le gouvernement envisage le développement d'une infrastructure de l'hydrogène pour connecter les différents utilisateurs. La Norvège est prudente sur la production significative d'hydrogène propre en raison des coûts d'infrastructure importants mais elle explore des solutions possibles comme la production d'hydrogène à proximité des clients et le transport du CO<sub>2</sub> vers la Norvège pour stockage. Ailleurs, l'Espagne et le Portugal se concentrent sur la production et la consommation intérieure d'hydrogène renouvelable, avec des objectifs d'exportation à plus long terme. Bien que la production européenne d'hydrogène propre soit étudiée, on s'attend à des importations importantes en provenance de pays où l'hydrogène propre peut être produit de manière plus économique à grande échelle, notamment au Moyen-Orient, en Afrique du Nord et en Amérique latine.

### **3.4. Chili et Canada : produire, consommer et exporter de l'hydrogène propre**

Sur le continent américain, le Chili et le Canada visent tous deux à développer l'offre et la demande domestiques avant d'envisager à moyen terme l'exportation. Le Chili dispose d'excellentes conditions en matière d'énergie renouvelable et son objectif immédiat est donc de remplacer l'ammoniac importé par de l'ammoniac vert produit localement et l'hydrogène gris par de l'hydrogène vert dans les raffineries de pétrole, tout en s'attendant à ce que l'hydrogène vert devienne intéressant pour les transports lourds et longue distance. Quant au Canada, grand exportateur d'hydrocarbures, il voit des possibilités à court terme dans le secteur des transports où des applications finales matures sont déjà disponibles et où le niveau de préparation technologique est élevé : les piles à combustible devraient être déployées dans le transport routier, ferroviaire et maritime. Le Canada envisage également de décarboner le chauffage grâce à un mélange de gaz naturel et d'hydrogène.

## 4. Outils politiques

Le rôle de l'hydrogène dans le système énergétique n'étant pas encore défini, les gouvernements s'efforcent aujourd'hui de comprendre où l'hydrogène pourrait utilement contribuer à leurs transitions énergétiques. Cela signifie qu'il faut explorer toutes les possibilités de la chaîne de valeur tout en reconnaissant la nécessité de s'attaquer au problème de la « poule et de l'œuf » qui exige à la fois une offre et une demande dans un système énergétique. Pour intégrer l'hydrogène dans leurs systèmes énergétiques, les pays envisagent un large éventail d'instruments et d'outils politiques parmi lesquels certaines mesures sont particulièrement innovantes. L'analyse des succès relatifs des différentes approches aidera à identifier les meilleures pratiques de politique et de réglementation pour permettre l'intégration de l'hydrogène dans le système énergétique dans des contextes différents.

Cette comparaison des instruments politiques ne concerne que les pays ayant publié des stratégies nationales hydrogène avant mai 2021 (voir section 1) ; mais d'autres pays étudient déjà des politiques similaires dans le cadre de l'élaboration de leurs stratégies officielles et sont susceptibles de faire écho aux idées présentées ci-dessous.

### 4.1. Définir les objectifs

La publication d'une stratégie ou d'une feuille de route nationale peut constituer une étape importante pour définir une vision pour les parties prenantes. Si les stratégies actuelles en matière d'hydrogène diffèrent grandement par leur contenu et leur format, elles offrent toutes une vision de l'hydrogène dans tous les secteurs, généralement assortie d'un calendrier de développement du marché, et identifient les priorités avec des objectifs spécifiques. Ce faisant, les stratégies donnent aux acteurs du marché une visibilité sur les politiques, les réglementations et les mesures d'incitation permettant d'atteindre les objectifs. Les principaux instruments politiques sont mis en évidence ci-dessous.

Certaines stratégies comprennent également des informations sur le processus de révision, reconnaissant ainsi l'évaluation continue et la capacité d'adaptation. Par exemple, l'Australie procédera à une évaluation des infrastructures hydrogène d'ici 2022, puis au moins tous les cinq ans, afin de piloter l'action publique.

### 4.2. Permettre le passage à l'hydrogène

#### 4.2.1. Le soutien financier direct

Les technologies de l'hydrogène en sont aux premiers stades de la commercialisation et de nombreuses stratégies visent des investissements publics et privés directs pour soutenir des projets pilotes afin de réaliser des économies d'échelle. L'investissement requis est important : la banque d'investissement Goldman Sachs estime que le marché de l'hydrogène pourrait représenter 11 700 milliards de dollars d'ici 2050, répartis entre l'Asie, les États-Unis et l'Europe [Goldstein, 2020]. Selon l'Hydrogen Council, un manque de 50 milliards de dollars et d'une capacité d'électrolyse de 65 GW doit être comblé d'ici 2030 pour atteindre le seuil de rentabilité entre l'hydrogène gris et l'hydrogène renouvelable. La stratégie de l'UE estime que les investissements cumulés dans l'hydrogène renouvelable en Europe pourraient atteindre 180 à 470 milliards d'euros d'ici 2050 et se situer dans une fourchette de 3 à 18 milliards d'euros pour l'hydrogène fossile à faible teneur en carbone.

Plusieurs gouvernements ont promis un financement public direct jusqu'en 2030 pour développer leurs industries ou leur économie nationales de l'hydrogène. Le Japon s'est engagé à verser quelque 1,5 milliard de dollars pour soutenir la production d'hydrogène à émissions nulles, localement et à l'étranger, et pour développer des infrastructures de distribution. La France prévoit d'investir

7 milliards d'euros d'ici à 2030 dans la décarbonation industrielle, le transport lourd et la R&D, tandis que l'Allemagne a adopté un « paquet pour l'avenir » doté de 7 milliards d'euros pour accélérer la mise sur le marché domestique des technologies de l'hydrogène, complétés par 2 milliards d'euros pour favoriser les partenariats internationaux. Des fonds proviennent également de budgets existants pour soutenir les transitions énergétiques ou l'innovation. Par exemple, l'Union européenne utilise son mécanisme de soutien « Projet Important d'Intérêt Européen Commun » (*Important Projects of Common European Interest - IPCEI*) pour les projets de R&D impliquant plus d'un État membre. Certaines stratégies nationales incluent également l'hydrogène dans leurs plans de relance post-Covid pour obtenir des fonds supplémentaires.

La mobilisation de fonds privés est également essentielle et peut être combinée avec des fonds publics. Par exemple, le gouvernement néerlandais a l'intention d'investir jusqu'à 338 millions d'euros dans des projets d'hydrogène vert, en plus des investissements prévus de 9 milliards d'euros, dont la plupart sont privés, dans le nord des Pays-Bas pour développer un écosystème intégré de l'hydrogène. L'Union européenne a créé l'« Alliance européenne pour un hydrogène propre » (*European Clean Hydrogen Alliance*) afin de contribuer à la constitution d'une filière claire et solide de projets d'investissement viables pour coordonner les investissements et les politiques tout au long de la chaîne de valeur de l'hydrogène et pour promouvoir la coopération entre les parties prenantes privées et publiques. Toutefois, la plupart des stratégies nationales ne sont pas claires quant à la mobilisation des investissements privés.

#### **4.2.2. Les incitations financières**

Le coût est un obstacle majeur à l'adoption de l'hydrogène dans le système énergétique, en particulier dans les pays qui n'envisagent l'hydrogène qu'à partir de sources d'énergie renouvelables. L'hydrogène est un vecteur énergétique naissant et le développement de son marché nécessite des incitations financières importantes pour combler l'écart économique avec les alternatives existantes. Des mesures financières telles que la politique fiscale et les subventions peuvent être des outils clés pour les gouvernements pour contribuer au développement des chaînes de valeur de l'hydrogène.

La politique fiscale est un instrument efficace pour inciter à passer des combustibles fossiles aux nouveaux vecteurs énergétiques. Lorsque des systèmes d'échange de droits d'émission sont en place, un prix plus élevé du carbone pourrait constituer une incitation particulièrement efficace pour favoriser l'hydrogène. Une taxe sur le carbone est une autre option envisagée. Par exemple, la Norvège prévoit une taxe sur le CO<sub>2</sub> augmentée de 5 % par an jusqu'en 2025. Une autre possibilité consiste à réduire les taxes sur les carburants à base d'hydrogène en diminuant les frais de péage routier, les frais de ferry ou les frais de stationnement pour les véhicules ou navires fonctionnant à l'hydrogène, ou en exonérant les producteurs d'hydrogène vert des taxes sur l'électricité pour encourager leur adoption. La stratégie de l'Union européenne suggère de développer un programme de contrats carbone sur la différence (*Carbon Contracts for Differences - CCfD*) afin de soutenir la production d'acier circulaire à faible teneur en carbone et de produits chimiques de base, dans lequel des contrats à long terme avec une contrepartie publique rémunéreraient les investisseurs en payant la différence entre le prix d'exercice (strike) du CO<sub>2</sub> et le prix réel du CO<sub>2</sub> dans le système d'échange de quotas d'émission (EU-ETS) afin de combler l'écart de coût par rapport à la production conventionnelle d'hydrogène.

***« La mise en œuvre de tarifs douaniers sur le carbone motiverait les producteurs étrangers et les importateurs de l'Union européenne à réduire leurs émissions de carbone, tout en garantissant des conditions de concurrence équitables compatible avec l'OMC. »***

***ROBIN MILLS, QAMAR ENERGY, UAE***

Les subventions peuvent également contribuer à encourager la demande d'hydrogène en ciblant les secteurs prioritaires identifiés, par exemple par des subventions pour les véhicules fonctionnant à

l'hydrogène ou des remboursements pour les employés utilisant des véhicules à hydrogène. Au Portugal, la production d'hydrogène associée aux centrales solaires et éoliennes existantes est encouragée par un mécanisme d'« achat » qui remplace les tarifs de rachat par des incitations à la production d'hydrogène.

#### **Les leçons apprises : La bulle solaire espagnole**

L'Espagne a été l'un des leaders du développement de l'industrie des énergies renouvelables en Europe mais le chemin a été cahoteux. En 2007, le gouvernement espagnol a annoncé une nouvelle politique de « tarifs de rachat » pour soutenir l'énergie solaire, permettant aux producteurs de développer des systèmes solaires, tant photovoltaïques que thermiques, et de les revendre au réseau à des tarifs supérieurs à ceux du marché. Il est rapidement apparu que les tarifs fixés étaient trop généreux et l'augmentation de la capacité solaire a rapidement dépassé plusieurs fois les objectifs du gouvernement. Le gouvernement a réagi en ajustant rétroactivement les tarifs à la baisse, ce qui a transformé le boom de l'énergie solaire en crise et suscité des inquiétudes quant à l'instabilité réglementaire. L'expérience de l'Espagne et d'autres pays pionniers qui ont été confrontés à des défis similaires en matière de politique des énergies renouvelables a aidé les responsables politiques à élaborer des mécanismes plus réactifs au marché, susceptibles d'assurer une plus grande stabilité du marché pour les investisseurs dans les énergies renouvelables.

### **4.3. Faciliter les marchés internationaux de l'hydrogène**

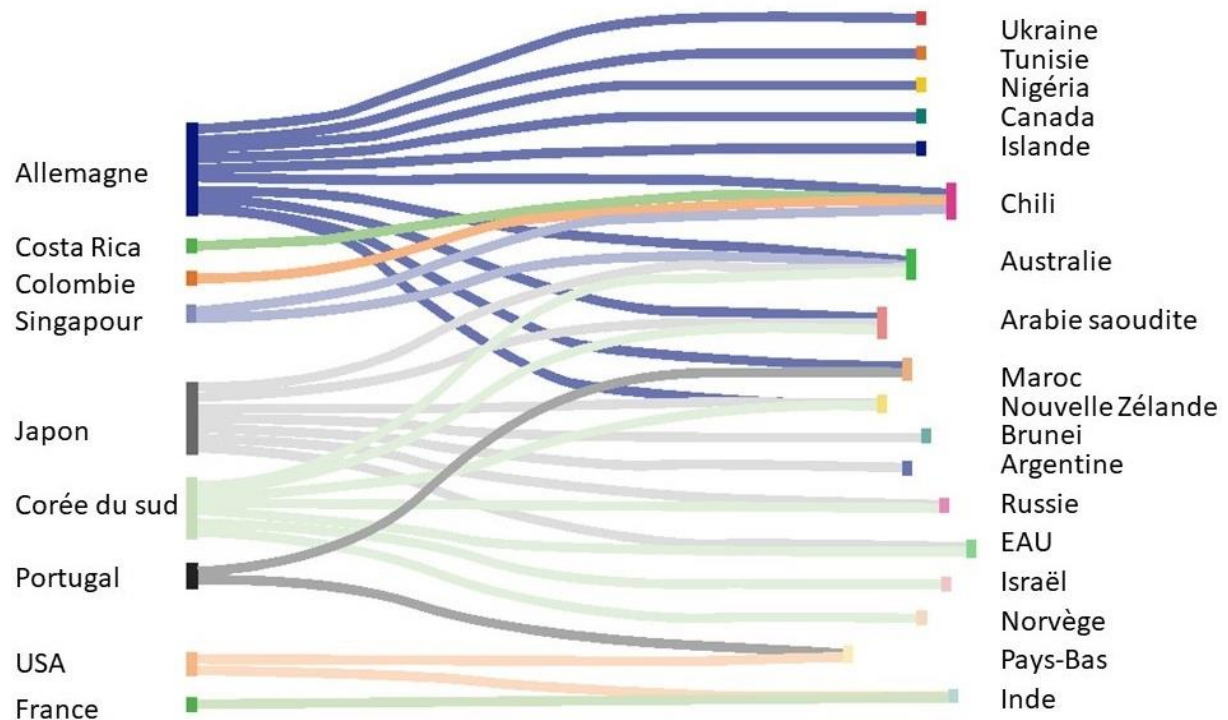
Le développement de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique nécessitera également la création d'un marché international de l'hydrogène pour permettre la production et le commerce rentables de l'hydrogène. Pour y parvenir, des pays élaborent des accords bilatéraux afin de coordonner les programmes de R&D, d'explorer l'harmonisation des normes (voir section 4.4.2) et d'encourager le commerce mondial émergent de l'hydrogène. La *Hydrogen Energy Ministerial Meeting* qui s'est tenue au Japon est un exemple clé et a abouti à la déclaration de Tokyo d'octobre 2018, impliquant 21 nations, régions multinationales et organisations internationales qui ont précisé diverses initiatives pour promouvoir la vulgarisation et le développement de l'énergie hydrogène avec une évaluation annuelle des progrès.

Actuellement, la plupart des coopérations et partenariats internationaux, régionaux ou bilatéraux se concentrent sur des projets communs visant à développer des chaînes de valeur et des initiatives de R&D conjointes. Par exemple, l'initiative *Mission Innovation*, à laquelle participent 24 pays et la Commission européenne, a pour objectif d'accroître les investissements publics dans la R&D sur les énergies propres en impliquant le secteur privé et en encourageant la collaboration internationale pour les innovations dans le domaine de l'hydrogène. Le Japon, les États-Unis et l'Union européenne ont créé l'*International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy - IPHE*, un programme de recherche coordonné pour la chaîne de valeur de l'hydrogène. L'*Africa-Europe Green Energy Initiative* vise à sensibiliser aux opportunités offertes par l'hydrogène et à promouvoir le développement de projets d'innovation conjoints incluant un financement de l'Union européenne via la *Neighbourhood Investment Platform-NIP*.

À ce stade, la plupart des partenariats sont bilatéraux (voir la figure 2) avec des protocoles d'accord développant la collaboration sur la gestion, le développement technologique, le financement de projets de recherche et le potentiel des chaînes de valeur d'import-export (par exemple, le Portugal et les Pays-Bas, l'Allemagne et l'Arabie saoudite, le Chili et Singapour). Le Japon et l'Allemagne devraient être d'importants importateurs nets d'hydrogène et ont été

particulièrement actifs dans la recherche de partenariats bilatéraux pour assurer un approvisionnement suffisant. L'Allemagne, par exemple, est en train de créer une compilation d'atlas pour la production potentielle d'hydrogène vert et de ses produits en aval afin d'identifier les futurs pays de destination qui seront des opportunités pour exporter des installations.

**Figure 2. Partenariats bilatéraux**



*Les partenariats bilatéraux sont exclusivement des accords de gouvernement à gouvernement qui peuvent englober des relations commerciales autour de l'hydrogène (importation/exportation d'énergie et/ou de technologies hydrogène), des projets de démonstration et des protocoles d'accord. Sur la base des informations disponibles au 27 mai 2021.*

**Source : Conseil Mondial de l'Énergie, modifié à partir de la carte du Comité membre allemand, 2021**

### **Les leçons apprises : l'Industrie de l'énergie solaire**

Le boom de l'énergie solaire ne s'est pas développé dans un seul pays, mais résulte plutôt de la concurrence entre plusieurs pays développant leurs propres industries. Bien que la technologie ait vu le jour en 1954 aux États-Unis, dans le secteur spatial, les progrès technologiques ont entraîné une baisse significative des prix et ont été stimulés par une loi allemande de 2000 encourageant les énergies renouvelables et la production de panneaux solaires. Le paquet « énergie-climat » de 2007 de l'Union européenne a introduit une législation contraignante avec des objectifs pour 2020 et a provoqué un boom de l'industrie des panneaux solaires sur le marché européen.

La production en masse de cellules solaires par la Chine a permis de réduire les prix et a conduit la Chine à dominer le marché des panneaux solaires. Elle est ainsi passée d'un acteur inexistant du marché à près de 70 % de la production mondiale actuelle en l'espace de 20 ans. Si la concurrence mondiale a permis de faire baisser les prix, les relations commerciales ont été mises à mal par divers conflits commerciaux avec la Chine. Certains experts envisagent déjà une situation similaire avec la production chinoise d'électrolyseurs.

## 4.4. Créer les conditions de développement du marché

### 4.4.1. Quel est le rôle de la législation et de la réglementation aujourd'hui ?

Les mesures législatives et réglementaires n'ont pas encore été entièrement élaborées et l'accent est mis jusqu'à présent sur la mise en œuvre rapide de projets hydrogène en simplifiant les cadres existants et en réduisant les obstacles potentiels et les charges administratives. Par exemple, le Portugal encourage la simplification des procédures d'autorisation - environnementales, industrielles, municipales - pour certains projets de production d'hydrogène. En France, les contrats et engagements stratégiques sectoriels entre le gouvernement et les entreprises visent à contribuer au développement de partenariats public-privé (PPP) (voir l'encadré : « Faciliter l'adoption de l'hydrogène : partenariats public-privé »), à réduire la charge administrative pour les projets hydrogène et à faciliter le lancement d'initiatives. Le Chili examinera les réglementations relatives à l'utilisation des sols et les processus d'autorisation associés afin d'identifier et de réduire les obstacles potentiels à l'hydrogène : il s'agira notamment d'analyser, de détenir et de louer des terrains publics présentant des conditions adéquates pour le développement compétitif de l'hydrogène vert et de ses dérivés. Le Chili prévoit également d'examiner et d'actualiser la réglementation du marché de l'électricité pour permettre la participation effective des technologies de l'hydrogène à la fourniture de divers services (énergie, capacité, services auxiliaires).

***« Pour réussir le passage à l'hydrogène, un soutien politique, des analyses de rentabilité et des mesures réglementaires sont nécessaires, en particulier dans les secteurs difficiles à décarboner comme la sidérurgie. »***

**FRANK WOUTERS, RÉSEAU D'ÉNERGIE PROPRE UE-GCC, UAE**

***« Il est nécessaire d'adopter des politiques fondées sur la performance ; des politiques qui favorisent la décarbonation, mais qui sont agnostiques sur le plan technologique, et qui n'excluent pas des technologies comme l'hydrogène. »***

**SABINA RUSSELL, ZEN CLEAN ENERGY SOLUTIONS, CANADA**

Certains pays élaborent des mesures législatives globales. La Corée du Sud a adopté une « loi sur l'hydrogène » qui établit la base juridique nécessaire pour soutenir l'hydrogène, avec des mesures pour développer des programmes d'éducation, préparer un cadre statistique pour l'hydrogène, établir des normes de sécurité, légiférer sur les systèmes et installations d'avitaillement. La Corée du Sud a mis en œuvre un projet de zone spéciale sans réglementation sur la mobilité verte à l'hydrogène pour montrer des technologies de mobilité à l'hydrogène. L'Union européenne prévoit une norme commune bas carbone pour les installations de production d'hydrogène, basée sur leur performance en matière de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie, qui pourrait être proche de la norme existante pour la production d'hydrogène du système européen d'échange de quotas d'émission.

Étant donné que de nombreuses applications de l'hydrogène en sont à leurs débuts, le cadre législatif et réglementaire actuel pour les applications de l'hydrogène n'a pas encore été mis en place. Il suit une approche graduelle, naviguant entre la nécessité d'offrir la certitude suffisante aux investisseurs et aux développeurs de projets et celle de fournir la flexibilité pour les différentes étapes du développement.

***« Pour développer des projets hydrogène, nous avons besoin d'une structure bancable, qui comprend une conception robuste en termes de technique et de performance et des clients bancaires qui peuvent s'engager sur une longue durée, à savoir les gouvernements. »***

**CRISTINA MARTIN, HDF ENERGY, MEXICO**

### ***Les leçons apprises : les contrats GNL des années 1960***

Au début des années 1960, la pollution atmosphérique au Japon a contribué à encourager l'utilisation du GNL importé comme combustible plus propre et plus écologique que le charbon ou le pétrole pour la production d'électricité. Toutefois, les compagnies d'électricité japonaises n'étaient disposées à passer au GNL qu'avec l'aide financière du gouvernement pour couvrir les coûts d'investissement élevés.

Des contrats à long terme, d'une durée de 15 à 30 ans, entre les exportateurs et les compagnies d'électricité importatrices ont constitué le cadre pour établir la filière. Les contrats devaient être suffisamment longs pour que les investissements soient récupérés dans les pays exportateurs et importateurs, et pour fournir un flux de trésorerie garanti afin de faciliter le financement des investissements. Les leçons tirées de l'aide à l'établissement du marché du GNL pourraient également aider au développement de l'hydrogène.

***« Évitez de vous enfermer et de finir par freiner la croissance du secteur alors qu'à un moment donné, vous souhaitez vous orienter vers un modèle plus liquide et plus flexible. »***

**ROBIN MILLS, QAMAR ENERGY, UAE**

Outre les mesures législatives et réglementaires, de nombreux outils plus souples et plus flexibles aident les acteurs du marché à développer leurs projets hydrogène. Par exemple, le Chili va créer un groupe de travail pour accompagner les développeurs dans les processus d'autorisation et de pilotage des projets hydrogène vert et coordonner les services publics dans les secteurs clés afin de réduire l'incertitude pour les initiatives privées, de générer de l'apprentissage, de résoudre les défaillances de la coordination du marché et de permettre l'introduction en toute sécurité de nouvelles énergies et de nouveaux procédés. Le Canada entend promouvoir le libre accès à l'information afin d'établir des exigences échelonnées dans le temps pour la teneur en hydrogène renouvelable dans les projets soutenus par le gouvernement et développer une série d'outils et de ressources, hébergés sur un site Web central géré par le gouvernement, pour les premiers marchés de l'hydrogène afin d'aider les utilisateurs finaux à évaluer quantitativement l'hydrogène comme option pour leur exploitation.



### **Faciliter l'adoption de l'hydrogène : les plateformes d'hydrogène**

Les plateformes d'hydrogène, ou clusters de demande à grande échelle, sont des zones locales où sont regroupés plusieurs utilisateurs d'hydrogène existants et potentiels de différents secteurs. La colocalisation au sein des hubs peut rendre le développement des infrastructures (telles que les pipelines, les stations de stockage et d'avitaillement) plus rentable en favorisant les économies d'échelle et les synergies de couplage sectoriel pour aider à développer la chaîne de valeur.

Les stratégies envisagent différentes approches pour identifier, localiser et financer les clusters potentiels. Les questions clés qui influent sur le choix du site d'un pôle potentiel sont les suivantes : accès à la demande ; disponibilité des terrains ; potentiel d'importation ou de production via les infrastructures portuaires, routières et ferroviaires ; accès au réseau de transport de gaz existant ; facteurs économiques, sociaux et environnementaux locaux favorables (tels qu'une main-d'œuvre qualifiée et adaptée) pour le soutien de la communauté. Dans plusieurs pays, l'industrie est à la tête des efforts visant à former des clusters pour une collaboration intersectorielle afin de développer la chaîne de valeur et de permettre des économies d'échelle. Au-delà de l'industrie, les instituts universitaires et de recherche cherchent également à s'installer dans des pôles potentiels.

***« Les travaux en cours sur les vallées ou les clusters d'hydrogène vont changer la donne. Une fois construits, ils montreront les aspects intégrés et holistiques de l'hydrogène fonctionnant ensemble. Une transition importante commencera à se produire lorsqu'il y aura un déploiement complet dans les principaux secteurs, et que le couplage sectoriel et l'aspect intégratif de l'hydrogène deviendront visibles. »***

**DARYL WILSON, ASSOCIATION DE L'HYDROGÈNE, CANADA**

### **Faciliter l'adoption de l'hydrogène : partenariats public-privé**

Les partenariats public-privé (PPP) peuvent constituer un levier important pour le développement de l'hydrogène en coordonnant les efforts des secteurs public et privé. La dynamique de l'hydrogène a plus de chances de se développer grâce à l'engagement du secteur privé avec le soutien des pouvoirs publics grâce à un environnement favorable (par exemple, tarification du carbone, conditions d'investissement).

En 2008, l'Union européenne a créé l'entreprise commune Piles à combustible et Hydrogène (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking - FCH JU) comme partenariat public-privé pour soutenir les activités de recherche, de développement technologique et de démonstration dans les technologies des piles à combustible et de l'hydrogène en Europe. En 2021, l'Union européenne met en place le Partenariat pour l'hydrogène propre, qui s'appuie sur les travaux de la FCH JU pour accélérer le développement et le déploiement d'une chaîne de valeur européenne pour les technologies de l'hydrogène propre, en se concentrant sur la production, la distribution et le stockage d'hydrogène propre et sur l'approvisionnement des secteurs difficiles à décarboner. Parmi les autres exemples, citons les Special Purpose Companies (SPC) dirigées par le gouvernement qui sont lancées dans plusieurs pays avec un soutien en matière de financement et de fiscalité pour développer des applications fonctionnant à l'hydrogène.

#### **4.4.2. La normalisation est nécessaire, mais peut-être pas encore**

Les normes et les mécanismes de certification peuvent contribuer à harmoniser les processus importants pour le développement de l'hydrogène. L'élaboration d'un langage commun pour l'hydrogène et de certaines règles partagées au niveau international pourrait établir des conditions de concurrence équitables en permettant un commerce transfrontalier efficace et en offrant plus de certitude aux investisseurs. À ce stade, toutefois, les priorités en matière de normalisation diffèrent largement d'un pays à l'autre, ce qui rend la collaboration plus difficile et retarde le développement de la demande d'hydrogène et des investissements dans ce domaine.

La sécurité de l'hydrogène est fréquemment mentionnée comme un domaine prioritaire de normalisation avec des normes pour l'industrie et les transports. L'établissement de normes internationales pourrait prendre plusieurs années, mais des initiatives ont été lancées. L'American Institute of Chemical Engineers (AIChE) a un groupe sur la sécurité de l'hydrogène qui étudie les normes. En dehors de la sécurité, la France travaille avec des institutions financières sur des modèles de cofinancement pour des projets de déploiement d'écosystèmes qui mutualisent différents usages (mobilité, industrie, etc.) au niveau local. Au niveau international, le développement d'un système de garantie d'origine convenu devrait être une priorité pour établir la source de production d'hydrogène avec une initiative de CertifHy, un projet multipartite dont l'objectif entre 2014 et 2016 était de développer une définition commune à l'échelle européenne de l'hydrogène vert et un système de garantie d'origine de l'hydrogène à travers l'Europe, soutenu par une feuille de route pour la mise en œuvre.

***« Les normes sont en avance sur la commercialisation des piles à combustible. Il existe déjà des normes pour les piles à combustible pour les véhicules et les électrolyseurs, etc. Toutefois, le développement de codes relatifs à l'installation et au fonctionnement des équipements est en retard. Une bonne approche de normalisation harmonisée au niveau international est en cours avec l'ISO (International Organization for Standardization) et l'IEC (International Electrotechnical Commission). En ce qui concerne les codes, chaque pays ou juridiction développe les siens au fur et à mesure que les équipements sont déployés. »***

**JEFF GRANT, ZEN CLEAN ENERGY SOLUTIONS, CANADA**

Actuellement, on se penche peu sur la manière d'élaborer des normes et des mécanismes de certification, qui émanent généralement d'initiatives privées et soulèvent des questions d'harmonisation. Le Japon a constitué une exception notable en suggérant que des règles internationales pour le transport maritime de l'hydrogène liquéfié soient élaborées par l'intermédiaire de l'Organisation maritime internationale (OMI). Au sein de son propre système fédéral, le Canada prévoit d'établir un groupe de travail sur les codes et les normes avec les autorités interprovinciales pour partager les leçons apprises et identifier les lacunes dans ce domaine.

#### **4.4.3. Le débat sur la couleur de l'hydrogène est un obstacle à l'adoption de cette technologie**

Les stratégies existantes citent des formes d'hydrogène divergentes en fonction de la couleur ou de l'intensité carbonique de la production pour 2030 et 2050 (voir tableau 3). Le choix des méthodes de production d'hydrogène dépend largement des ressources disponibles et des systèmes énergétiques existants dans chaque pays, ainsi que des objectifs politiques poursuivis (c'est-à-dire la décarbonation, la stimulation de la croissance économique, etc.)). On a également recours à des terminologies diverses, avec des hypothèses et des attitudes différentes à l'égard de certaines technologies. Plus particulièrement, l'hydrogène produit à l'aide de l'énergie nucléaire fait l'objet de plusieurs catégories de couleurs différentes.

**Tableau 3. Résumé des couleurs ou intensité de carbone de l'hydrogène par pays**

Pays	d'ici 2030	d'ici 2050	Définitions
<b>Allemagne</b>	Sans carbone	Renouvelable	Sans carbone : vaporeformage du méthane avec captage et stockage du carbone (taux de capture non précisé), pyrolyse du méthane, etc. Renouvelable : utilisation d'électricité renouvelable
<b>Australie</b>	Propre	Propre	Propre : vaporeformage du méthane avec captage et stockage du carbone (taux de capture de 90 %) ou électrolyse utilisant de l'électricité renouvelable
<b>Canada</b>	Faible intensité carbone	Faible intensité carbone	Se réfère à CertifHy pour les définitions de l'hydrogène à faible teneur en carbone : Hydrogène vert (à partir de sources de biomasse ou d'électrolyse utilisant le vent, le soleil et l'hydroélectricité) et Hydrogène bas carbone (vaporeformage d'énergies fossiles avec captage et stockage du carbone (taux de capture de 90 %), pyrolyse, nucléaire).
<b>Chili</b>	Vert	Vert	Utilisation d'électricité renouvelable
<b>Corée du Sud</b>	Gaz naturel	Écologique et sans CO <sub>2</sub>	Gaz naturel et ses sous-produits, complété par du H <sub>2</sub> provenant de projets Power-to-Gas utilisant de l'électricité renouvelable excédentaire et dédiée.
<b>Espagne</b>	Renouvelable	Renouvelable	Électrolyse de l'eau à partir d'électricité renouvelable et également d'H <sub>2</sub> obtenu par reformage du biogaz ou conversion biochimique de la biomasse, à condition que les exigences de durabilité établies soient respectées.
<b>France</b>	Bas carbone et fossile	Bas carbone	Bas carbone : la production électrolytique d'hydrogène peut inclure l'énergie renouvelable et l'énergie nucléaire.
<b>Hongrie</b>	Bas carbone et sans carbone	Bas carbone et sans carbone	Sans carbone : H <sub>2</sub> vert/renouvelable produit par électrolyse à partir d'électricité renouvelable qui provient de panneaux photovoltaïques et d'une électricité bon marché (par exemple, l'électricité renouvelable excédentaire, l'énergie nucléaire, les importations transfrontalières d'électricité sans carbone) par le réseau national. Bas carbone : hydrogène bleu ou turquoise.
<b>Japon</b>	Fossile avec CSC	Sans CO <sub>2</sub>	Sans CO <sub>2</sub> : énergie fossile avec captage et stockage du carbone (taux de capture de 60 % aujourd'hui à pratiquement 100 % à l'avenir) complétée par des énergies renouvelables à faible coût.
<b>Norvège</b>	Propre	Propre	Propre : Vaporeformage du gaz naturel ou d'autres combustibles fossiles avec captage et stockage du carbone (taux de captage de 90-95 %)
<b>Pays-Bas</b>	Bleu et vert	Vert	Vert : principalement l'électrolyse utilisant de l'électricité « durable » mais également des matières premières biogènes produites de manière durable. Bleu : produit à partir de gaz naturel avec captage et stockage du carbone (taux de capture non précisé).
<b>Portugal</b>	Vert	Vert	Vert : utilisant de l'électricité renouvelable
<b>Union européenne</b>	Bas carbone	Propre / Renouvelable	Vaporeformage du méthane avec captage et stockage du carbone (taux de capture non précisé) ou utilisant de l'électricité renouvelable (la taxonomie européenne fournissant une référence de 3 tCO <sub>2eq</sub> /tH <sub>2</sub> )

Source : Conseil Mondial de l'Énergie

Récemment, des tentatives de règlement du « débat sur les couleurs » ont commencé à voir le jour dans le but d'établir des définitions claires du contenu en carbone, de la technologie et de la source d'électricité qui les sous-tendent (par exemple, figure 3 et figure 4).

**Figure 3. Illustration de l'arc-en-ciel des couleurs de l'hydrogène**



De plus en plus, la prolifération des différentes teintes d'hydrogène complique excessivement la discussion. Parallèlement, outre la couleur, on s'intéresse de plus en plus à l'intensité en carbone ou à l'équivalence carbone. L'intensité en carbone - exprimée en tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> par tonne d'hydrogène produite - est un critère technologiquement neutre pour évaluer l'empreinte des émissions de l'hydrogène. Elle ouvre le débat sur la concurrence entre les différentes voies de production d'hydrogène qui permettent d'atteindre l'intensité de carbone requise au moindre coût. Cela variera en fonction du contexte. Ainsi, dans un cas, l'hydrogène produit à l'aide de sources d'énergie renouvelables pourrait être le plus approprié, tandis que dans un autre, l'hydrogène produit par captage du carbone pourrait être plus adapté et plus économique. Une approche fondée sur l'intensité de carbone prend déjà forme dans l'Union européenne où la taxonomie de l'Union européenne - un système de classification établissant les activités économiques durables sur le plan environnemental - indique qu'un repère d'intensité de carbone de 3 tCO<sub>2eq</sub>/tH<sub>2</sub> est nécessaire pour que la production d'hydrogène soit classée parmi les activités économiques durables sur le plan environnemental.

**DE LA COMPLEXITÉ** (couleurs de l'hydrogène) → **À UN INDICATEUR CLAIR FONDÉ SUR L'INTENSITÉ EN CARBONE** (par exemple tCO<sub>2eq</sub> par tH<sub>2</sub>)

Figure 4. Illustration du spectre des couleurs de l'hydrogène

	Terminologie	Technologie	Matière première Source d'électricité	Empreinte (gaz à effet de serre)
Production à partir d'électricité	Vert	Électrolyse	Éolien, solaire, hydroélectrique, géothermique, marémotrice	Minimale
	Rose ou violet		Nucléaire	
	Jaune		Énergie de réseau d'origine mixte	Moyenne
Production à partir d'énergies fossiles	Bleu	Reformage du gaz naturel ou gazéification avec captage et stockage du carbone	Gaz naturel, charbon	Faible
	Turquoise	Pyrolyse	Gaz naturel	Carbone solide (sous produit)
	Gris	Reformage du gaz naturel		Moyenne
	Brun	Gazéification	Charbon brun (lignite)	Élevée
	Noir		Charbon noir	

L'empreinte est donnée à titre indicatif et peut être plus élevée dans chacune des catégories

Source : Global Energy Infrastructure (GEI), 2021

## **Chapitre 2**

# **Contributions de leaders sur le développement de l'hydrogène**

Pour recueillir de nouvelles informations critiques sur l'état des lieux, les opportunités et les défis de l'hydrogène dans le monde, le Conseil Mondial de l'Énergie a mené 25 entretiens avec 28 leaders d'opinion dans le domaine de l'énergie dans 22 pays entre février et avril 2021. Nous avons également tiré de précieux enseignements de 10 entretiens centrés sur les stratégies en matière d'hydrogène menés fin 2020 dans la région Asie-Pacifique, ainsi que de 10 autres entretiens précédemment menés dans 11 pays en 2020 par le Conseil dans le cadre de l'étude sur l'hydrogène de son comité membre allemand. Ensemble, ces entretiens ont mis en évidence de nouveaux aspects d'un grand intérêt tout en mettant en relief des questions préexistantes particulièrement cruciales pour le développement de l'hydrogène dans le système énergétique.

## JOBS

### 1. Des opportunités pour conserver ou créer des emplois

Si le choix de l'hydrogène paraît motivé par une ambition de décarbonation, il présente également une opportunité socio-économique. De nombreuses personnes interrogées ont souligné le rôle de l'hydrogène pour le maintien ou la création de nouveaux emplois. D'une part, l'hydrogène pourrait réutiliser ou réorienter des infrastructures et des activités existantes afin de conserver la main-d'œuvre dans les pays disposant de ressources en combustibles fossiles et d'industries connexes. D'autre part, il contribuerait à créer de nouveaux emplois dans les pays qui explorent les possibilités d'exportation de l'hydrogène et des technologies liées : les dirigeants de l'énergie soulignent la nécessité de construire une économie locale de l'hydrogène pour traiter correctement les impacts sociaux et économiques.

**« Les pays exportateurs d'hydrogène doivent également trouver comment créer une valeur locale pour l'hydrogène, afin de développer des opportunités d'emploi. »**

**MAX CORREA ACHURRA, MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE, CHILI**

**« Dans les pays en développement, les gouvernements devront soutenir la production locale au lieu de s'appuyer sur les importations pour créer plus de capital et d'opportunités (emplois, développement du marché) afin que l'adhésion se développe plus rapidement. »**

**DAVID MUTHIKE, KENGEN LTD, KENYA**

**« L'Espagne crée des zones de "transition juste" dans lesquelles la production d'hydrogène peut contribuer à éviter l'exode rural et à atteindre les objectifs du démographique en profitant aux communautés qui ont souffert de la fermeture des centrales à charbon. L'Espagne a la responsabilité de prendre soin d'elles. »**

**JOSÉ LUIS CABO SÁNCHEZ, MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET DU DÉFI DÉMOGRAPHIQUE, Espagne**

Tant pour les emplois en transition que pour ceux qui seront créés, la nécessité de la formation est mise en avant comme un enjeu vital à court terme, les dirigeants de l'énergie insistant sur la nécessité plus générale d'améliorer la connaissance de l'hydrogène pour l'ensemble de la population et de former une main-d'œuvre qualifiée. L'identification des compétences et des aptitudes tout au long de la chaîne de valeur de l'hydrogène est un domaine où la coopération entre les pouvoirs publics, l'industrie et les universités sera essentielle pour constituer le vivier de talents nécessaire aux nouveaux débouchés. Certaines entreprises voient déjà dans l'hydrogène une occasion d'attirer de nouveaux talents.

**« On s'attend à ce que l'industrie de l'hydrogène devienne l'une des industries énergétiques les plus propres et soutienne le développement de sources d'électricité bas carbone. Elle s'appuie sur des technologies de pointe et peut attirer la nouvelle génération pour travailler pour les entreprises énergétiques. »**

**EVGENY PAKERMANOV, RUSATOM OVERSEAS, RUSSIE**

**« Actuellement, l'un des plus grands défis est lié au manque d'éducation, de sensibilisation et de connaissances sur l'hydrogène vert de la part des autorités, des consommateurs potentiels et des futurs fournisseurs. »**

**DANIEL CÁMAC, ASSOCIATION PÉRUVIENNE DE L'HYDROGÈNE, PÉROU**

Dans le développement précoce de l'hydrogène aujourd'hui, le dialogue sur les possibilités de création d'emploi ne fait que commencer et nécessite une analyse plus approfondie pour comprendre toutes les implications du développement de l'hydrogène. Toutefois, nombreux sont ceux qui considèrent les plans de relance post-pandémie comme une occasion d'accroître les infrastructures et les capacités de l'hydrogène pour créer de nouvelles perspectives de croissance, tout en reconnaissant que les défis sociaux auront vraisemblablement la priorité, surtout dans l'immédiat.

**« Lorsque l'on considère le développement de l'hydrogène aujourd'hui, il faut tenir compte du facteur social post-Covid avec une augmentation de la pauvreté et un niveau de chômage plus élevé. »**

**MASSIMILIANO CERVO, H2 HELIUM, BRÉSIL**

## **MACROENVIRONNEMENT**

### **2. Une possible perturbation dans le paysage de l'approvisionnement énergétique**

L'hydrogène peut avoir un impact considérable sur le marché de l'énergie et perturber le positionnement de nombreux pays sur ce marché. De nombreux hauts responsables du secteur de l'énergie ont souligné le rôle de l'hydrogène pour aider à diversifier l'approvisionnement énergétique et à devenir plus autosuffisant tant pour l'approvisionnement en énergie que pour les produits (par exemple, les engrais). Les pays en développement dotés d'une forte capacité en matière d'énergies renouvelables pourraient produire puis exporter leur propre carburant, créant ainsi les conditions du développement économique, social et environnemental. L'émergence de nouveaux acteurs dans le domaine de la production d'énergie renouvelable incite à s'orienter vers une offre plus décentralisée. Dans le même temps, les producteurs actuels de combustibles fossiles ont également un rôle à jouer dans l'économie de l'hydrogène où ils peuvent utiliser leurs ressources existantes avec le captage du carbone, étant donné que l'hydrogène bleu peut jouer un rôle important dans le développement du marché. Les dirigeants de l'énergie ont des avis divergents sur l'avenir de l'hydrogène dérivé des combustibles fossiles, en limitant son usage à la phase de lancement du marché ou au contraire, en le rendant indispensable à long terme, pour répondre à la demande croissante.

**« La diversification est une clé de la sécurité d'approvisionnement. Avec l'hydrogène, vous pouvez répartir vos œufs dans différents paniers. La production d'hydrogène réduira notre dépendance pour les ressources énergétiques vis-à-vis d'autres pays et créera des emplois locaux. »**

**DIDIER HOLLEAUX, ENGIE, France**



L'hydrogène pourrait contribuer à l'économie circulaire en utilisant les excédents d'énergies renouvelables, en traitant les déchets ou grâce aux technologies de captage, d'utilisation et de stockage du carbone dans le cas de l'hydrogène bleu. Les stratégies nationales ont mis l'accent sur le développement de l'hydrogène pour atteindre les objectifs de décarbonation. Cependant, les experts affirment que peu d'attention a été accordée jusqu'à présent au rôle de l'hydrogène dans une économie circulaire qui pourrait apporter des solutions innovantes, des emplois et des débouchés économiques. En outre, le faible rendement de la production d'hydrogène par électrolyse, associée à la forte intensité capitalistique des sources d'énergie renouvelables, accroît l'intérêt de l'utilisation du recyclage dans la production d'hydrogène afin d'accroître sa durabilité tout en réduisant son empreinte carbone.

**« L'hydrogène a un énorme potentiel dans l'économie circulaire pour aider à réduire les déchets : biomasse, plastique, déchets solides, déchets organiques, eaux usées, biogaz, bioéthanol et surplus d'énergie. »**

**MONICA SARAIVA PANIK, ASSOCIATION BRÉSILIENNE H2, BRÉSIL**

**« L'un des plus grands défis de l'hydrogène est de le réduire d'échelle pour l'utiliser dans différents domaines, pour le grand public. »**

**MÓNICA GASCA ROJAS, MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE, COLOMBIE**

Bien qu'il en soit aux premiers stades de son développement, l'hydrogène est un sujet très politique, la demande étant poussée par plusieurs gouvernements dans une perspective *top-down*. Le débat sur les sources et les couleurs de l'hydrogène (voir le chapitre 1 - Stratégies nationales pour l'hydrogène) illustre les visions et les intérêts divergents des pays engagés dans son développement.

**« Le débat sur la couleur sera réglé par le prix. Dès que le coût de l'hydrogène vert sera égal au coût de l'hydrogène bleu, l'hydrogène bleu n'aura plus de sens. »**

**PADDY PADMANATHAN, ACWA POWER, ARABIE SAOUDITE**

En outre, il est possible d'appliquer à l'hydrogène les leçons tirées des développements antérieurs du marché de l'énergie. De nombreuses personnes interrogées ont évoqué les leçons retenues du marché des panneaux solaires, insistant sur le fait que le développement et la fabrication doivent aller de pair (voir le Chapitre 1 - Stratégies nationales pour l'hydrogène). Dans ce contexte, le rôle de la Chine en matière d'hydrogène est actuellement une inconnue majeure. D'autres pays, tels que l'Inde, la Russie, les États-Unis d'Amérique et les États du Golfe, n'ont pas encore publié de stratégies officielles mais font preuve d'intérêt ou d'activité dans le domaine de l'hydrogène. La Russie a déjà publié officiellement la feuille de route pour le développement énergétique de l'hydrogène jusqu'en 2024, montrant ainsi ses fortes ambitions dans le secteur. L'évolution de leurs plans aura une incidence sur l'adoption potentielle de l'hydrogène et le développement d'un marché international.

L'accent est mis en particulier sur la COP26, où l'hydrogène pourrait jouer un rôle important pour atteindre les objectifs fixés par l'accord de Paris lors de la COP21. La mise à jour des contributions déterminées au niveau national (CDN) des pays pourrait changer la donne pour l'adoption de l'hydrogène.

## ACCEPTABILITÉ SOCIALE

### 3. Développer la connaissance de l'hydrogène pour favoriser son acceptation

L'acceptabilité sociale de l'hydrogène est liée à son acceptabilité par le public et à la compréhension de ses technologies et de ses utilisations. La faible sensibilisation actuelle crée à la fois des risques et des opportunités. Des études suggèrent que les principales influences sur l'acceptation et l'adoption de l'hydrogène sont la perception et la compréhension par le public de sa sécurité, de son coût et de ses avantages environnementaux, notamment par rapport aux sources de production renouvelables et non renouvelables. Des campagnes de communication et de vulgarisation efficaces sont impératives pour accroître la sensibilisation et l'acceptation.

Il est essentiel de comprendre la perception du public pour élaborer des politiques nationales en matière d'hydrogène et gérer la transition vers une économie de l'hydrogène. Certaines études révèlent que l'amélioration de la sensibilisation du public, notamment en ce qui concerne les avantages environnementaux et les normes de sécurité, réduit les inquiétudes, tandis que d'autres ont montré que les personnes ayant une meilleure connaissance de la technologie sont plus sceptiques car elles sont conscientes de ses défis. En tant que technologie potentiellement disruptive, l'hydrogène risque d'être cantonné à des marchés très spécialisés. Il est donc essentiel que les utilisateurs bénéficient d'une acceptation sociale et d'une légitimité, en particulier à mesure que nous passons des applications dans les secteurs industriels et Business-to-Business (B2B) (auxquels le grand public ne participe pas) à des applications plus proches d'eux.

***« Si l'hydrogène a l'air trop spécial, c'est là que vous commencez à effrayer les gens. »***

**JIM SKEA, IMPERIAL COLLEGE LONDON, UK**

L'élaboration de normes de sécurité et la formation sont cruciales pour rassurer le public, les experts soulignant que la gestion des urgences est un sujet prioritaire. En outre, en ce qui concerne la perception du public, l'emplacement des installations de stockage d'hydrogène peut être une source de préoccupation si les ports existants et les nouvelles infrastructures sont situés dans des zones de population dense et peut alors avoir une incidence négative sur les perceptions en raison du manque de sensibilisation et de compréhension de l'hydrogène.

Les experts suggèrent que les gouvernements et les industries doivent anticiper les enjeux d'acceptation sociale dans le cadre de leurs programmes sur l'hydrogène. Les spéculations résultant d'un manque d'informations sur l'hydrogène doivent être combattues par des campagnes de communication et de sensibilisation ciblées, des programmes éducatifs et des pôles de déploiement.

Des initiatives pour développer l'acceptation sociale de l'hydrogène voient le jour sous la forme d'une coopération avec les administrations et les entreprises locales et par le biais de la communication et de la sensibilisation pour expliquer les avantages et les risques de l'hydrogène. Certains pays créent des « Pôles hydrogène » qui servent de points d'information accessibles pour faire connaître l'hydrogène et, surtout, pour présenter ses avantages pour l'emploi et la croissance économique. Les pays ont recours à des événements publics pour accroître les connaissances générales sur l'hydrogène, comme la Corée du Sud, qui a instauré une « journée de l'hydrogène » pour mettre l'accent sur la sécurité dans les grandes villes, en coopération avec les industriels et les autorités locales ; le Japon, à l'occasion des Jeux olympiques et paralympiques de 2020-21, a fait la promotion de l'hydrogène en

utilisant des véhicules et des bus à pile à combustible et en alimentant le village des athlètes en hydrogène.

**« Nous devons faire un effort énorme pour promouvoir la compréhension de la complexité et cela fait défaut dans notre société. Nous avons éduqué des générations dans des choix simples (bons ou mauvais). Nous entrons dans l'ère de la complexité ; notre transition énergétique se fait vers la complexité. Nous devons nous éloigner d'une approche monolithique (par exemple : "les combustibles fossiles sont mauvais, donc supprimons les combustibles fossiles"). »**

**STEFANO BESSEGHINI, ARERA, Italie**

Au niveau local, et pour faciliter la discussion *bottom-up*, des rassemblements sur l'hydrogène peuvent, par une participation précoce et transparente, rendre familiers des projets, par exemple par un dialogue avec les développeurs de projets voisins.

**« Impliquer le public le plus tôt possible est un élément important de la feuille de route. »**  
**WILSON SIERRA, MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE, DE L'ÉNERGIE ET DES MINES, URUGUAY**

## DIALOGUE

### 4. Poursuivre le dialogue et l'échange au sein de la communauté de l'énergie

Un sujet clé qui ressort des entretiens avec les dirigeants de l'énergie est le souhait d'un dialogue plus poussé pour faciliter, accompagner ou accélérer le développement de l'hydrogène. Le dialogue sur l'hydrogène peut déjà être observé entre les pays, par exemple par la signature de protocoles d'accord, et entre les parties prenantes, par exemple, grâce à des partenariats public-privé. Toutefois, il existe également un désir de discussions plus approfondies au niveau régional avec plus de deux pays, entre les régions, ainsi qu'au niveau international.

La dynamique entre coopération et concurrence évolue. La coopération est considérée comme particulièrement cruciale au niveau régional pour permettre la réalisation de projets intégrés susceptibles de renforcer le positionnement sur le marché mondial, par exemple pour définir des garanties d'origine de l'hydrogène et les mécanismes de certification associés (voir Chapitre 1 - Stratégies nationales pour l'hydrogène). Cela se vérifie également dans le domaine de la recherche et du développement (R&D) où la coopération entre les pays, les entreprises et les universitaires est motivée par un intérêt commun pour le lancement de produits compétitifs et de projets pilotes, en particulier pendant la phase de renforcement, avant que la concurrence ne puisse avoir lieu.

**« La coopération internationale est nécessaire pour relever les défis internationaux de l'hydrogène - sécurité, acceptation sociale, coût. »**

**MARTIN SCARONE, MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE, DE L'ÉNERGIE ET DES MINES, URUGUAY**

Toutefois, de nombreux responsables du secteur de l'énergie ont indiqué que la concurrence commence à prendre forme du côté de l'offre, les pays se battant pour les marchés d'exportation (par exemple, pour les engrais verts). La concurrence s'intensifie également au sein des pays entre les différentes sources d'hydrogène (par exemple, l'hydrogène bleu par rapport à l'hydrogène vert). Une coopération se met en place en Europe, mais les personnes interrogées ont souligné l'émergence

d'une concurrence lorsque les subventions aux entreprises entrent en jeu, notamment dans le contexte de l'obtention d'un financement communautaire dans le cadre du plan de relance Covid-19.

**« La concurrence est saine - elle crée de la vitesse et du dynamisme. Nous avons besoin de plus d'agilité pour répondre au marché. »**

**PIERRE HERBEN, ANGLO-AMÉRICAIN, AFRIQUE DU SUD**

Un dialogue plus approfondi pourrait contribuer à accroître la demande et il est possible de renforcer le dialogue multipartite sur le développement de l'hydrogène aux niveaux régional et international.

### **Faciliter l'adoption de l'hydrogène : accroître l'intérêt du secteur privé pour le développement de l'hydrogène**

L'intérêt du secteur privé pour l'hydrogène ne cesse de croître. Le *Hydrogen Council* note que sur les 228 projets annoncés, évalués à 345 milliards de dollars, seuls 20 %, soit 70 milliards de dollars, étaient financés par des fonds publics. L'un des moteurs de l'intérêt du secteur privé pour l'hydrogène bas carbone provient de ses ambitions environnementales, sociales et de gouvernance (ESG). Les entreprises s'orientent vers des processus et des produits finaux plus durables sur le plan environnemental, en raison de l'intérêt des investisseurs et des consommateurs pour des performances ESG plus élevées.

Certaines entreprises suggèrent que l'étiquetage du carbone a le potentiel d'orienter les consommateurs vers des produits « verts » afin de contribuer à accroître la demande de produits finaux d'hydrogène bas carbone. Selon une personne interrogée, « il peut avoir autant d'impact que la tarification du carbone sur la demande d'hydrogène ». L'étiquetage pourrait encourager les consommateurs à payer un supplément pour couvrir la prime de coût des aliments produits avec de l'ammoniac vert ou des voitures fabriquées avec de l'acier à faible teneur en carbone, ce qui entraînerait une évolution de la préférence des consommateurs en faveur de ces produits.

## **ENVIRONNEMENT FAVORABLE**

### **5. Mettre en place des cadres pour réduire les coûts et diminuer les risques des investissements**

Le coût de l'hydrogène bas carbone, y compris son stockage et son transport vers les utilisateurs finaux, est le principal obstacle au décollage de l'hydrogène aujourd'hui (voir Chapitre 3 - Dynamique de la demande et des coûts). La plupart des personnes interrogées s'accordent à dire que la baisse des prix dans les années à venir est une évidence, suivant des courbes de coûts similaires à celles des technologies des énergies solaire et éolienne au cours de la dernière décennie. De nombreuses personnes interrogées considèrent que la production de masse permettant des économies d'échelle, l'augmentation de la demande globale et une baisse importante du coût des énergies renouvelables elles-mêmes feront baisser le coût de l'hydrogène.

**« L'expérience sur l'énergie solaire et la baisse rapide des prix soutiennent le développement de l'hydrogène. »**

**MARÍA JOSÉ GONZALEZ, MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE, DE L'ÉNERGIE ET DES MINES, URUGUAY**

**« D'importantes économies d'échelle sont possibles. Pour une pile à combustible, plus on en fabrique, moins c'est cher, car on commence à industrialiser la production. »**

**NICOLAS POCARD, BALLARD POWER SYSTEMS, CANADA**

Pour parvenir à une réduction des coûts, l'accent a été mis sur la réduction du coût des technologies de production et de transport de l'hydrogène. Les responsables de l'énergie sont divisés quant au rôle que l'innovation et les nouvelles technologies de l'hydrogène pourraient jouer dans la réduction des coûts et quant à savoir si les nouvelles technologies de l'hydrogène seront le principal facteur de réduction des coûts. Les stratégies nationales actuelles sont largement axées sur la R&D des technologies de l'hydrogène. Toutefois, la plupart des pays semblent attendre, pour s'engager dans un soutien à plus long terme à la R&D et à l'adoption commerciale des technologies de l'hydrogène, que le succès de cette R&D et des premiers déploiements dans la réduction du coût des technologies de l'hydrogène soit établi.

**« Au final, nous aurons beaucoup plus d'hydrogène dans le système que ce à quoi on pense aujourd'hui, car il pourra concurrencer l'électricité bon marché produite localement. »**

**A.J.M VAN WIJK, TU DELFT, PAYS-BAS**

L'innovation visant à réduire le coût de l'hydrogène et la diminution du risque d'investissement peuvent également se faire par le biais de cadres et d'outils politiques, notamment la réglementation. Dans l'ensemble, la plupart des instruments politiques présentés dans les stratégies nationales ont pour objectif final la réduction des coûts et la diminution des risques d'investissement. Parmi les nombreux outils envisagés, plusieurs personnes interrogées ont évoqué la mise en place d'un prix du carbone pour réduire l'écart entre l'hydrogène et les solutions concurrentes.

D'autres facteurs favorables à l'adoption de la demande d'hydrogène concernent le soutien au démarrage des projets hydrogène, l'émission de contrats et les organisations qui prennent et partagent les risques. De nombreuses personnes interrogées, en particulier dans le secteur privé, ont souligné la nécessité d'un cadre politique les aidant à prendre des risques et à garantir des investissements à long terme. Cela pourrait se faire, en premier lieu, si les gouvernements donnaient une orientation ou une vision claire à l'hydrogène et, en second lieu, en assurant une visibilité et une certaine stabilité des politiques dans le temps.

De nombreuses parties prenantes ont également souligné lors des entretiens qu'il existe un problème « de poule et d'œuf » entre l'offre et la demande d'hydrogène et qu'il est nécessaire de mettre en place des cadres et des mesures innovants, aux niveaux national, régional et international, pour sortir de ce cycle. Comme la plupart des responsables de l'énergie se considèrent encore dans une « courbe d'apprentissage de l'hydrogène », beaucoup de ces outils doivent encore être créés.

## **Chapitre 3**

# **La dynamique de la demande et des coûts de l'hydrogène**

# 1. Dynamiques de la demande d'hydrogène

L'hydrogène est considéré comme une solution importante pour atteindre les objectifs climatiques de l'accord de Paris, car il peut être un combustible, une matière première et un réactif propres pour de nombreux processus à forte intensité énergétique et pour les services de transport. Toutefois, les trajectoires possibles de la demande d'hydrogène jusqu'en 2050 peuvent varier en fonction du développement de technologies complémentaires, telles que l'efficacité énergétique, l'électrification, le captage du carbone et les technologies de l'hydrogène elles-mêmes. Cette analyse vise à faire la lumière sur les différentes trajectoires de la demande et du coût de l'hydrogène en analysant divers rapports et scénarios énergétiques.

## 1.1. L'utilisation de l'hydrogène

La plupart des études analysées se concentrent sur l'utilisation d'hydrogène provenant de sources de production à faible teneur en carbone, ce qui correspond en partie aux stratégies nationales des pays correspondants. Certains pays ou régions (par exemple, l'Union européenne) favorisent l'hydrogène produit principalement à partir de sources d'énergie renouvelables dans le cadre de leurs plans de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> (voir la partie 1 ci-dessus - Stratégies nationales pour l'hydrogène). D'autres nations, comme les pays du Golfe ou les pays importateurs d'énergie, dans des contextes différents (par exemple, l'accès au gaz naturel à bas prix ou l'ouverture à la technologie du captage et stockage du carbone) et des objectifs politiques supplémentaires comme la réduction de la pollution atmosphérique dans les villes, envisagent davantage de formes d'hydrogène à faible teneur en carbone. En outre, certaines études et stratégies nationales prévoient de développer initialement le marché de l'hydrogène en combinant les filières de production d'hydrogène avec le captage et stockage du carbone afin de mettre en place les infrastructures nécessaires avant ou parallèlement à l'exploration d'autres voies.

La répartition de la demande d'hydrogène par secteur utilisateur peut varier considérablement. Cela se reflète dans la variation significative des chiffres présentés dans les différents rapports lors de l'analyse des projections de l'utilisation de l'hydrogène propre par secteur. Actuellement, l'accent semble être mis sur les secteurs de l'industrie, des transports et de l'énergie, tandis que de grandes incertitudes entourent l'utilisation de l'hydrogène dans les bâtiments. Malheureusement, les treize scénarios mondiaux analysés dans ce rapport ne contiennent pas de répartitions sectorielles cohérentes et comparables.

## 1.2. Projections de la demande d'hydrogène

Les projections de la demande d'hydrogène varient considérablement en raison des différentes hypothèses sous-jacentes concernant les ambitions de décarbonation. Nous avons analysé les estimations de la demande mondiale d'hydrogène provenant de huit sources différentes, avec un total de treize scénarios. Bien que d'autres scénarios hydrogène soient disponibles, ils sont moins détaillés ou ne couvrent que des secteurs ou des pays spécifiques et n'ont donc pas été inclus.

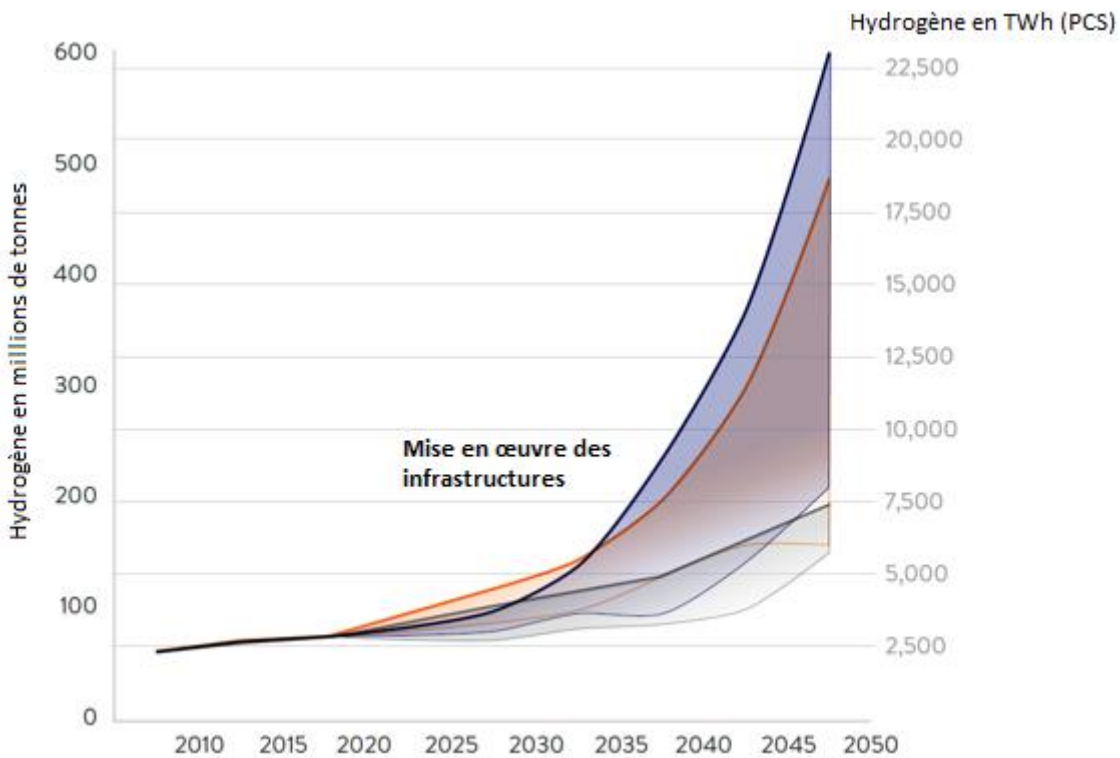
## Méthodologie

Le rapport analyse et compare les projections de la demande d'hydrogène de ces treize scénarios (voir détails à l'annexe 1) en classant chaque scénario dans l'une des trois trajectoires suivantes en fonction de leur niveau d'ambition - faible, moyenne et élevée - pour réduire l'augmentation de la température mondiale qui est suggérée dans chaque rapport.

- Trajectoire de faible ambition avec un réchauffement climatique supérieur à 2,3 °C,
- Trajectoire d'ambition moyenne avec un réchauffement climatique entre 1,8 et 2,3 °C
- Trajectoire d'ambition élevée avec un réchauffement climatique inférieur à 1,8 °C.

Même si les spécificités de chaque scénario varient dans une certaine mesure, l'analyse permet de montrer les tendances générales de l'évolution de la demande. Toutefois, il convient de préciser qu'il ne s'agit que d'un regroupement des treize scénarios analysés et que d'autres scénarios énergétiques pourraient ne pas correspondre aux trois trajectoires définies.

Après avoir regroupé les scénarios, ce rapport analyse les trajectoires de croissance moyennes de la demande mondiale d'hydrogène. En raison des différences dans les hypothèses des scénarios analysés, l'écart-type a été calculé pour chaque trajectoire. On a retenu comme mesure l'écart-type pour montrer les écarts supérieur et inférieur par rapport au scénario moyen dans le but de faciliter la comparaison des scénarios et d'ajuster les variations éventuelles des hypothèses mentionnées ci-dessus. Ainsi, certaines demandes d'hydrogène hautes ou basses fournies dans les rapports originaux n'apparaissent pas dans cette comparaison.



● < 1.8°C

Acil Allen Report - High  
 BP Energy Outlook 2020 - Net Zero  
 IEA Energy Technology Perspectives 2020 - SDS  
 Shell - Sky Scenario  
 Powerfuels in a Renewables World  
 Hydrogen Economy Outlook - Strong Policy

● 1.8 - 2.3°C

Acil Allen Report - Medium  
 BP Energy Outlook 2020 - Rapid  
 Hydrogen Council - 2DS  
 World Energy Council - Unfinished Symphony

● > 2.3°C

Acil Allen Report - Low  
 World Energy Council - Modern Jazz  
 Hydrogen Economy Outlook - Weak Policy

**Figure 1. Fourchette d'évaluation de la demande d'hydrogène d'ici 2050**

La comparaison a été limitée car les intrants énergétiques, tels que l'électricité renouvelable ou le gaz, ne sont pas clairement définis et de nombreuses hypothèses sous-jacentes ne sont pas détaillées.



### **1.3. Développement à long terme de la demande d'hydrogène**

Il est clair qu'en fonction des hypothèses (voir l'annexe 1 pour les différentes hypothèses), l'analyse a révélé un large éventail de demandes futures possibles d'hydrogène. Un résultat commun est que toutes les estimations prévoient une croissance limitée mais régulière de la demande d'hydrogène jusqu'en 2030. Il y a plusieurs explications à cela. Premièrement, les projets actuels de production d'hydrogène en cours de construction et d'exploitation sont, malgré des capacités croissantes, presque exclusivement en phase pré-commerciale et ont des capacités d'électrolyse limitées, généralement bien inférieures à 50 MW. Les usines de production envisagées ont des capacités d'électrolyse plus importantes, de plus de 100 MW, mais cela reste relativement faible par rapport aux capacités de production des usines actuelles d'hydrogène à base de combustibles fossiles, principalement gris. Deuxièmement, la mise en place des infrastructures nécessaires à l'utilisation de l'hydrogène à grande échelle, comme les pipelines ou les terminaux d'exportation et d'importation, prend de nombreuses années. Par exemple, il faut jusqu'à 12 ans pour planifier et construire un gazoduc et jusqu'à 10 ans pour construire un terminal GNL. Le temps nécessaire à la mise en place d'infrastructures pour l'hydrogène serait d'une durée comparable. Dans un monde idéal, les infrastructures requises seraient construites parallèlement à la croissance de la demande d'hydrogène et à la baisse des coûts, de sorte que d'ici à 2030, l'hydrogène puisse être commercialisé et transporté dans les quantités nécessaires.

Après 2030, les scénarios les plus ambitieux prévoient une demande d'hydrogène plus forte, avec une autre forte augmentation à partir de 2035. Cela correspond au temps nécessaire pour développer les infrastructures, dont la planification commence maintenant pour atteindre les objectifs en matière de croissance de la demande d'hydrogène envisagés après 2030.

***« L'hydrogène en tant que stockage d'énergie à grande échelle peut permettre une plus grande pénétration des énergies renouvelables intermittentes, et l'hydrogène fabriqué à partir de combustibles fossiles dont le carbone est stocké au point d'extraction peut nous permettre d'exploiter ces ressources énergétiques tout en nous concentrant agressivement sur la décarbonation du système énergétique global. »***

**SABINA RUSSEL, ZEN CLEAN ENERGY SOLUTIONS, CANADA**

### **1.4. La demande d'hydrogène est liée aux objectifs climatiques sous-jacents**

Les estimations de la demande d'hydrogène en 2050 varient considérablement, allant de 150 à 600 millions de tonnes (Mt). Des quantités élevées d'hydrogène sont nécessaires pour atteindre des objectifs climatiques plus ambitieux même si les différences de demande entre les catégories de température indiquées ne sont pas aussi importantes que prévu. Le large éventail d'estimations de la demande d'hydrogène résulte des différentes hypothèses sous-jacentes concernant les technologies utilisées, par exemple, la poursuite de l'utilisation du gaz naturel, les améliorations de l'efficacité, l'électrification directe ou le captage et stockage du carbone. Les scénarios prévoyant des objectifs climatiques plus ambitieux exigent une demande d'hydrogène plus élevée d'ici à 2050, la demande étant alors estimée entre 200 et 600 Mt. L'ambition climatique la plus élevée semble se traduire par une demande d'hydrogène plus importante dans les secteurs difficiles à décarboner, tels que l'acier ou les produits chimiques, en remplaçant l'hydrogène gris actuel et en créant une nouvelle demande dans d'autres applications ou produits. Les scénarios ayant des ambitions climatiques moyennes prévoient une fourchette de 160 à 490 Mt d'ici à 2050, avec une croissance moyenne d'environ 330 Mt. Les scénarios moins ambitieux ne prévoient qu'une croissance faible et presque linéaire de la

demande d'hydrogène avec la poursuite de l'utilisation continue du gaz naturel et estiment qu'elle variera entre 150 et 200 Mt en 2050.

## 2. Le coût de l'hydrogène

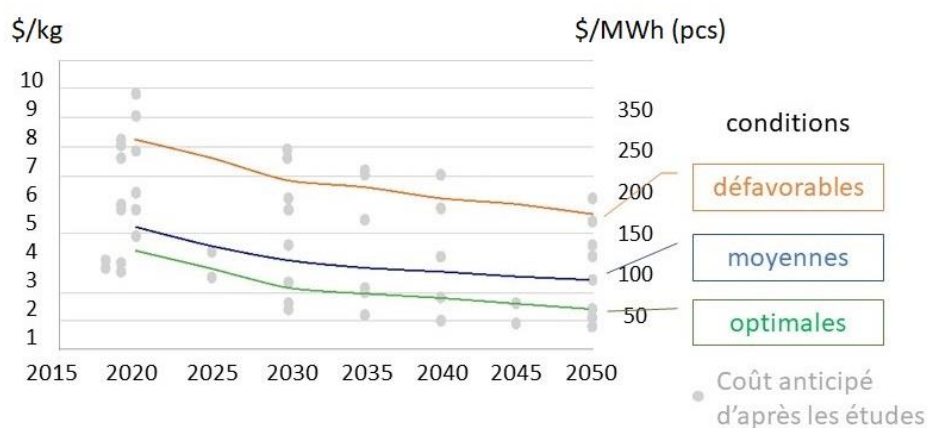
Le coût futur de l'hydrogène sera déterminant pour son adoption dans les différents secteurs finaux où l'on constate des différences de coûts énergétiques importantes entre les secteurs, mais aussi à l'intérieur de ceux-ci. Le coût de l'hydrogène pour l'utilisateur final sera fonction des coûts de production et de distribution. De nombreuses technologies de production sont encore nouvelles, de sorte que les courbes d'apprentissage et les effets d'échelle peuvent contribuer à faire baisser les coûts futurs. Dans le même temps, de nombreux experts estiment qu'un développement important des énergies renouvelables telles que les énergies solaire et éolienne pourrait faire baisser le coût de l'électricité renouvelable, ce qui est considéré comme un facteur important pour la pénétration de l'hydrogène dans le système énergétique. D'autre part, les pays disposant de capacités renouvelables excédentaires envisageront l'hydrogène propre comme un moyen d'éviter les coupures. Cela dépend en grande partie du contexte national. La tarification du carbone devrait être un élément fondamental de l'adoption de l'hydrogène en comblant l'écart de coût avec les énergies de substitution à forte teneur en CO<sub>2</sub>. Il est également probable que la combinaison de la tarification du carbone et d'une abondance d'électricité renouvelable puisse favoriser la production d'hydrogène par électrolyse.

Les coûts de distribution de l'hydrogène couvrant le stockage et le transport sont susceptibles d'être importants et de limiter la croissance. La distribution d'hydrogène liquide sous forme d'ammoniac pourrait permettre de réutiliser certaines infrastructures pétrolières existantes pour réduire les coûts, tandis que les gazoducs pourraient être réutilisés pour distribuer l'hydrogène sous forme gazeuse.

### 2.1. Méthode de calcul des coûts

Afin d'identifier les futurs coûts de production de l'hydrogène renouvelable, un autre ensemble de six rapports avec un total de seize scénarios différents de coûts prévus pour la production d'hydrogène a été analysé. La plupart des rapports comprenaient différents scénarios d'évolution des prix concernant les conditions de production, le prix de l'électricité et les heures de pleine charge de l'électrolyseur ayant la plus grande influence. Sur cette base, trois corridors de prix différents ont été développés, indiquant la fourchette dans laquelle le prix futur de l'hydrogène renouvelable est susceptible de tomber.

Figure 2. Dynamique des coûts de l'hydrogène renouvelable d'ici 2050



## 2.2. Dynamique de production des coûts : une forte baisse des prix est anticipée

Actuellement, le prix de production de l'hydrogène dit « vert » varie globalement entre 2,7 et 8,8 \$/kg, et toutes les études prévoient une baisse significative des prix d'ici 2030, dans une fourchette de 2 à 6 \$/kg en raison de la baisse des coûts de l'électricité renouvelable et du fait que les technologies de l'hydrogène suivent une courbe d'apprentissage grâce aux améliorations technologiques et aux économies d'échelle. Pour l'hydrogène vert, les dépenses d'exploitation (OPEX) sont directement liées aux coûts de l'électricité renouvelable et sont donc les principaux facteurs de réduction des coûts de production. Ceux-ci devraient continuer à diminuer, l'électricité solaire atteignant déjà des coûts actualisés inférieurs à 17,5 \$/MWh. En ce qui concerne les dépenses d'investissement (CAPEX), le coût des électrolyseurs devrait diminuer considérablement avec le temps, grâce aux économies d'échelle et à la rationalisation de leur production à l'avenir. Avec de nouvelles améliorations technologiques et la mise en œuvre de projets, le coût de la production d'hydrogène bleu diminuera également.

D'ici 2050, les études estiment que la fourchette de prix se situera entre 1,5 et 5 \$/kg, certains prévoyant un coût de 1 \$/kg ou moins pour l'hydrogène vert dans les pays disposant d'excellentes ressources renouvelables. Cependant, il y aura des différences significatives entre les pays et les sites de production en fonction du prix de l'électricité renouvelable, la production étant moins chère dans des pays comme l'Australie ou le Chili qui ont des coûts d'électricité renouvelable plus faibles et, par association, des taux d'utilisation plus élevés pour l'électrolyseur.

Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour comprendre les différents coûts de production de l'hydrogène, le montant que les différentes parties prenantes pourraient ou seraient prêtes à payer pour l'hydrogène ainsi que les émissions de CO<sub>2</sub> des différentes sources de production et le prix du CO<sub>2</sub> nécessaire pour rendre la production d'hydrogène à faible teneur en carbone plus attrayante sur le plan économique.

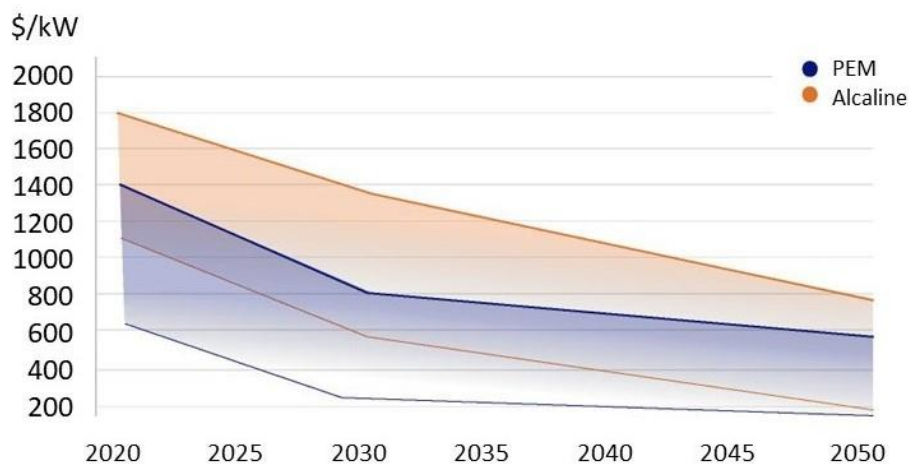


Figure 3 - Dynamique des coûts des électrolyseurs d'ici 2050

Source : Conseil Mondial de l'Énergie

La réduction des coûts des équipements informatiques est également importante. La normalisation et la production en série ainsi que les enseignements tirés des projets permettront de réduire le coût des électrolyseurs, des systèmes de capture du carbone, des équipements généraux ainsi que les coûts de

construction globaux. La figure 3 montre les trajectoires potentielles des coûts d'investissement des électrolyseurs pour les deux principales technologies actuelles, à savoir les électrolyseurs alcalins et à membrane d'électrolyte polymère (PEM). En outre, l'augmentation de la capacité des projets d'hydrogène à faible teneur en carbone entraînera une nouvelle baisse des coûts de production. Des recherches importantes étant en cours, les améliorations technologiques devraient permettre de réduire encore les coûts de production, tandis que l'augmentation du nombre de projets fera également baisser les coûts financiers.

***« Pour faire baisser le coût des technologies de l'hydrogène, nous n'avons pas besoin de nouvelles innovations, mais d'une production de masse. »***

***A.J.M. VAN WIJK, TU DELFT, PAYS-BAS***

Annexe : les scénarios de demande d'hydrogène source World Energy Council)

	Acil Allen Report	BP Energy Outlook 2020	Hydrogen Economy Outlook	Hydrogen Council – 2DS	International Energy Agency	Powerfuels in a Renewables World	Shell – Sky scenario	World Energy Council
Estimation de la demande totale d'hydrogène (Mt)	<b>High</b> 2030: 93 2040: 161 2050: 401 <b>Medium</b> 2030: 84 2040: 113 2050: 213 <b>Low</b> 2030: 77 2040: 94 2050: 148	<b>Net Zero</b> 2030: 104 2040: 282 2050: 560 <b>Rapid:</b> 2030: 102 2040: 173 2050: 284	<b>Strong policy</b> 2030: N/A 2040: N/A 2050: 696 <b>Weak policy</b> 2030: N/A 2040: N/A 2050: 187	2030: 111 2040: 201 2050: 567	<b>ETP 2020 - SDS</b> 2030: 90 2040: 135 2050: 290 <b>Net Zero Scenario</b> 2030: 212 2040: 391 2050: 528	2030: 86 2040: 164 2050: 346	2030: 80 2040: 94 2050: 149	<b>Unfinished symphony:</b> 2030: 117 2040: 164 2050: 228 <b>Modern Jazz:</b> - 2030: 99 2040: 125 2050: 185
Modes de production de l'hydrogène	Hydrogène vert, bleu, gris				<b>ETP 2020 :</b> Electricité, fossiles avec ou sans CCUS, CNR <b>Net Zero Scenario :</b> Fossiles, CNR avec CCUS, électricité, biomasse	Hydrogène vert		
Demande Prévue par secteur	Transport, chauffage et climatisation, électricité	Électricité, bâtiments, transports, industrie	Électricité, bâtiments, transports, industrie	Électricité, bâtiments, transports, industrie, systèmes énergétiques	Net Zero Scenario : Transport (air, bateau, route) métallurgie, chimie		Transport (air, bateau, route) Industrie (lourde et légère)	
Ambition climatique	<b>High/Medium/Low</b> une chance sur deux de limiter la hausse de la température mondiale entre 1,5-2°C / 2°C / entre 2-4°C	<b>Net Zero:</b> hausse de temp. à 1,5°C au-dessus des niveaux préindustriels <b>Rapid:</b> hausse de temp. bien en dessous de 2°C au-dessus des niveaux préindustriels	<b>Strong / Weak policy:</b> H2 fournit 27EJ / 99 EJ, soit 4 % / 15 % de la demande finale en 2050 ou 7 % / 24 % dans le scénario 1,5°C.	hausse de temp. limitée à 2°C	<b>ETP 2020:</b> 66 % de probabilité de limiter la hausse de temp. à 1,8°C (indépendamment des émissions négatives) <b>Net Zero Scenario</b> 50 % de probabilité de limiter la hausse de temp. à 1,5°C	Atteint les objectifs de l'accord de Paris, à savoir absence d'émissions de GES dans le secteur de l'énergie d'ici à 2050	Limiter la hausse de la température moyenne mondiale à un niveau bien inférieur à 2°C par rapport aux niveaux préindustriels.	<b>Unfinished symphony:</b> hausse de temp. limitée à 2,3°C <b>Modern Jazz:</b> hausse de temp. supérieure à 2,3°C (confirmation des auteurs de l'étude)

CCUS : captage, utilisation et stockage du carbone – CNR : reformage catalytique du naphta

# Bibliographie

## Chapitre 1

Allen, A., 2018. *Opportunities for Australia from Hydrogen Exports*, Sydney: ARENA.

CertifHy, n.d. *Designing the first EU-wide Green Hydrogen Guarantee of Origin for a new hydrogen market*. [Online]

Available at : <https://www.certifhy.eu/project-description/project-description.html>

Council of Australian Governments Energy Council, 2019. *Australia's National Hydrogen Strategy*, s.l.: Commonwealth of Australia 2019.

European Commission, 2020. *A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*, Brussels: s.n.

Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, Germany, 2020. *The National Hydrogen Strategy*, s.l.: s.n.

Flower, A. & Liao, J., 2012. *The Pricing of Internationally Traded Gas*, Oxford: Oxford Institute for Energy Studies.

GEI (Global Energy Infrastructure), 2021. *Hydrogen – data telling a story*. [Online]

Available at : <https://globalenergyinfrastructure.com/articles/2021/03-march/hydrogen-data-telling-a-story/> [Accessed 11 May 2021].

Goldstein, S., 2020. *'Green Hydrogen' Could Become a \$12 Trillion Market. Here's How to Play It..* [Online]

Available at : <https://www.barrons.com/articles/goldman-sachs-says-so-called-green-hydrogen-will-become-a-12-trillion-market-heres-how-to-play-it-51600860476>

Government of Canada, 2020. *The Hydrogen Strategy for Canada*, s.l.: s.n.

Government of France, 2020. *Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France*, s.l. : s.n.

Government of Netherlands, 2020. *Government Strategy on Hydrogen*, s.l.: s.n.

Hydrogen Council, 2020. *Projected global demand for hydrogen in a +2 degree Celsius global warming scenario from 2015 to 2050*. [Online]

Available at: <https://www.statista.com/statistics/435467/hydrogen-demand-worldwide/>

Hydrogen Council, 2021. *Hydrogen Insights, A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness*, s.l.: Hydrogen Council.

Ministry of Ecological Transition & Solidarity, Government of France, 2018. *Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique*, s.l. : s.n.

Ministry of Ecological Transition and Demographic Challenge, Government of Spain, 2020. *Hoja de Ruta del Hidrógeno : Una apuesta por el hidrógeno renovable*, s.l.: s.n.

Ministry of Ecological Transition and Demographic Challenge, Government of Spain, 2020. *Hydrogen Roadmap: a commitment to renewable hydrogen - Executive Summary*, s.l.: s.n.

Ministry of Economy, Trade and Industry, Government of Japan, 2019. *The Strategic Road Map for Hydrogen and Fuel Cells*, s.l.: s.n.

Ministry of Energy, Government of Chile, 2020. *National Green Hydrogen Strategy*, s.l.: s.n.

Ministry of State for Energy and Climate Policy, 2021. *Hungary's National Hydrogen Strategy*, s.l.: s.n.

Ministry of Trade, Industry and Energy, Government of South Korea, 2019. *Hydrogen Economic Roadmap of Korea*, s.l.: s.n.

Norwegian Ministry of Petroleum and Energy, Norwegian Ministry of Climate and Environment, 2020. *The Norwegian Government's hydrogen strategy*, s.l.: s.n.

Plumer, B., 2010. *Lessons From Spain's Solar Bubble*, s.l.: The New Republic. Republic of Portugal, 2020. *Estratégia Nacional Para O Hidrogénio*, s.l.: s.n.

World Energy Council - Germany/ Weltenergierat - Deutschland, 2020. *International Hydrogen Strategies: A study commissioned by and in cooperation with the World Energy Council Germany*, Berlin: World Energy Council - Germany.

Zinglensen, C., 2021. *The role of regulation in 'unlocking' the hydrogen economy*, Lisbon: European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators.

## Chapitre 2

World Energy Council - Germany/ Weltenergierat - Deutschland, 2020. *International Hydrogen Strategies: A study commissioned by and in cooperation with the World Energy Council Germany*, Berlin: World Energy Council - Germany.

Carr-Cornish, S., Lamb, K., Rodriguez, M. & Gardner, J., 2019. *Social science for a hydrogen energy future*, s.l.: s.n.

Mourato S, S. B. H. D., 2004. *Greening London's black cabs: a study of driver's preferences for fuel cell taxis*, s.l.: Energy Policy.

Kontogianni A, T. C. P. E., 2013. *Revealing market adaptation to a low carbon transport economy: tales of hydrogen futures as perceived by fuzzy cognitive mapping*, s.l.: International Journal of Hydrogen Energy.

IRENA, 2020. *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal*, Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.

## Chapitre 3

Agora, 2020. *Klimaneutrales Deutschland*, Berlin: Klimaneutral Druckprodukt.

Allen, A., 2018. *Opportunities for Australia from Hydrogen Exports*, Sydney: ARENA.

BP, 2021. *Hydrogen*. [Online]

Available at : <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook/demand-by-fuel/hydrogen.html> [Accessed 11 May 2021].

Bukold, D. S., 2020. *Blauer Wasserstoff*, s.l.: Greenpeace Energy.

Deutscher Bundestag, 2020. *Kosten der Produktion von grünem Wasserstoff*, Berlin: Deutscher Bundestag.

Hydrogen Council, 2020. *Projected global demand for hydrogen in a +2 degree Celsius global warming scenario from*

*2015 to 2050*. [Online]

Available at : <https://www.statista.com/statistics/435467/hydrogen-demand-worldwide/>

Hydrogen Council, 2021. *Hydrogen Insights, A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness*, s.l.: Hydrogen Council.

IEA, 2019. *The Future of Hydrogen*, Paris: IEA.

IEA, 2020. *Energy Technology Perspectives 2020*, Paris : IEA.

IRENA (2019), *Hydrogen: A renewable energy perspective*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi

Kombargi, Dr. Raed; Elborai, Dr. Shihab; Anouti, Dr. Yahya; Hage, Ramzi, 2020. *The dawn of green hydrogen*, Abu Dhabi: Strategy&.

Mayyas, A. T. et al., 2019. *Manufacturing Cost Analysis for Proton Exchange Membrane Water Electrolyzers*, United States: National Renewable Energy Laboratory (NREL).

Peterson, D., Vickers, J. & DeSantis, D., 2020. *Hydrogen Production Cost From PEM Electrolysis*, Washington D.C.: DOE Hydrogen.

Shell, 2021. *Shell - Sky Scenario*. [Online]

Available at : <https://www.shell.com/energy-and-innovation/the-energy-future/scenarios/shell-scenario-sky.html>

World Energy Council, 2019. *World Energy Scenarios*, London: World Energy Council.

## Entretiens – chapitre 2

Le Conseil Mondial de l'Énergie, l'EPRI et PwC tiennent à remercier les 28 personnes interrogées qui ont contribué au chapitre 2. (par ordre alphabétique)

<b>Stefano Besseghini</b>	President, Italian Regulatory Authority for Energy, Networks and Environment (ARERA), Italy
<b>Jose Luis Cabo Sánchez</b>	Subdirector General for Hydrocarbons and New Fuels, Ministry of Ecological Transition and Demographic Challenge, Spain
<b>Daniel Cámac</b>	President, H2 Perú (Hydrogen Peruvian Association), Peru
<b>Michelle Carvalho Hallack</b>	Inter-American Development Bank, USA
<b>Massimiliano Cervo</b>	Director of Business Development, H2 Helium, Brazil
<b>Max Correa Achurra</b>	Head of Fuels and New Energy Division, Ministry of Energy, Chile
<b>Isabel Francois</b>	Project Manager, WatersofNet, Belgium
<b>Mónica Gasca Rojas</b>	Energy Economist, Advisor, Ministry of Energy, Colombia
<b>Marra José Gonzalez</b>	Project Coordinator, Ministry of Industry, Energy and Mining, Uruguay
<b>Jeff Grant</b>	Principal, Zen Clean Energy Solutions, Canada
<b>Philipp Hasler</b>	Investment Director, Energy and Advanced Materials, Emerald Ventures, Switzerland
<b>Pierre Herben</b>	Group Head of Carbon Neutrality, Anglo American, South Africa
<b>Didier Holleaux</b>	Executive VP, ENGIE, France
<b>Cristina Martin</b>	Head of Business Development in Latin America, HDF Energy
<b>Eric Miller</b>	Hydrogen and Fuel Cells Technologies Office, US Department of Energy, USA
<b>Robin Mills</b>	CEO, Qamar Energy, United Arab Emirates
<b>Evgeny Pakermanov</b>	President, Rusatom Overseas, Russia
<b>David Muthike</b>	Strategy & Innovation Director, Kenya Electricity Generating Company PLC (KenGen), Kenya
<b>Paddy Padmanathan</b>	President and CEO, ACWA Power, Saudi Arabia



<b>Nicolas</b>	<b>Pocard</b>	Vice President for Marketing & Strategic Partnerships, Ballard Power Systems, Canada
<b>Sabina</b>	<b>Russell</b>	Principal, Zen Clean Energy Solutions, Canada
<b>Monica</b>	<b>Saraiva Panik</b>	Director of Institutional Relations, Brazilian H2 Association, Brazil
<b>Martrn</b>	<b>Scarone</b>	Renewable Energy & Hydrogen Advisor, Ministry of Industry, Energy and Mining, Uruguay
<b>Wilson</b>	<b>Sierra</b>	Coordinator of Renewable Energy, Ministry of Industry, Energy and Mining, Uruguay
<b>Jim</b>	<b>Skea</b>	Professor of Sustainable Energy, Imperial College London and Chair, Just Transition Commission, Scotland, UK
<b>A.J.M.</b>	<b>van Wijk</b>	Professor, TU Delft, The Netherlands
<b>Daryl</b>	<b>Wilson</b>	Executive Director, Hydrogen Council, Canada
<b>Frank</b>	<b>Wouters</b>	Director, EU-GCC Clean Energy Network, United Arab Emirates

Le Conseil Mondial de l'Énergie, l'EPRI et PwC tiennent également à remercier 10 hauts responsables du secteur de l'énergie, interrogés dans le cadre de l'examen spécifique des stratégies nationales asiatiques, sous la direction de **Sam Muraki** et **Takahiro Nagata**, qui ont fourni des informations supplémentaires utiles pour la préparation de ce travail :

**Keigo Akimoto** (Research Institute of Innovative Technology for the Earth, Japan), **Tim Buckley** (Institute for Energy Economics and Financial Analysis, Australia), **Andrew Clennett** (Hiringa Energy, New Zealand), **Ben Gerritsen** (Firstgas Group, New Zealand), **Jian Liu** (Energy Research Institute China), **Susumu Miyazaki** (Clean Fuel Ammonia Association, Japan), **Ken Okazaki** (Tokyo Institute of Technology, Japan), **Fiona Simon** (Australian Hydrogen Council, Australia), **Linda Wright** (Hydrogen Association, New Zealand), **Caifu Zhong** (Energy Research Institute, China).

Enfin, le Conseil Mondial de l'Énergie, l'EPRI et PwC tiennent à remercier 10 hauts responsables du secteur de l'énergie interrogés par le Conseil dans le cadre des études du comité allemand sur l'hydrogène, dont les idées ont été utiles pour la préparation de ce travail :

**Laurent Antoni** (CEA - LITEN, France), **Alan Finkel** (Chief Scientist, Australia), **Brian Goldstein** (Energy Independence Now, USA), **Noe van Huslt** (Ministry of Energy, the Netherlands), **Badr Ikken** (IRESEN, Morocco), **Cosma Panzacchi** (Snam, Italy), **Carsten Rolle** (Federal Association of German Industries, Germany), **Yoshiaki Shibata** (Institute of Energy Economics, Japan), **Walter Steinmann** (Swiss Federal Office of Energy, Switzerland), **Wei Wei** (Institute of World Economics and Politics, China).

## Remerciements

### PROJECT MANAGEMENT

Dr. Angela Wilkinson (Secretary General & CEO), Neil Hughes (International Executive Director, EPRI), Jeroen van Hoof (Global Power & Utilities Leader, Partner, PwC Netherlands), Martin Young (Senior Director, Insights), Clíodhna O'Flaherty-Mouscadet (Senior Manager, Partners), Gina Domanig (Innovation Executive Co-chair), Richard Lancaster (Innovation Executive Co-chair), Sam Muraki (Vice Chair of Asia Pacific and South Asia), Jeffery Preece (Senior Program Manager, EPRI), Adj. Prof. Dr. Juergen Peterseim (Global H2 industry lead, PwC), Dr. Olesya Hatop (Global Clients & Markets Industry Executive, PwC)

## PROJECT TEAM

Lucie Togni, Rami Fakhoury, Aaliya Deen, Joseph Stekli, Florian Schäfer, Nils Babenhauserheide, Moritz Zahn, Carlo Steinbach

## WORLD ENERGY COUNCIL STUDIES COMMITTEE

Leonhard Birnbaum (Chair, Germany) - Martin Young (Secretary, World Energy Council) - Alejandro Perroni (Uruguay) - Andrea Heins (Argentina) - Andrea Maria Quaggia (Italy) - Andrey Logatkin (Russian Federation) - Atul Sobti (India) - Barış Sanlı (Turkey) - Berardo Guzzi (Italy) - Burkhard Von Kienitz (Germany) - Claudio Huepe Minoletti (Chile) - Edouard Sauvage (France) - François Dassa (France) - Hans-Wilhelm Schiffer (Germany) - Herwig Klima (Austria) - Jean-Baptiste Galland (France) - Jeanne Chi Yun Ng (Hong Kong) - Joseph Al Assad (Lebanon) - Juan Benavides (Colombia) - Kambiz Rezapour (Iran, Islamic Republic of) - Katerin Osorio Vera (Colombia) - Klaus Hammes (Sweden) - Lawrence Ezemonye (Nigeria) - Mamadou Diarra (Niger) - Mehdi Sadeghi (Iran, Islamic Republic of) - Miguel Perez de Arce (Chile) - Muna Ahmad Almoodi (United Arab Emirates) - Nalin Shinghal (India) - Rebecca Yuen (Hong Kong) - Stefan Gheorghe (Romania) - Tina Schirr (New Zealand) - Tom Kober (Switzerland) - William D'haeseleer (Belgium) - Yanbing Kang (China) - Yongping Zhai (China) - Yuji Matsuo (Japan)

## WORLD ENERGY COUNCIL WORKING GROUP MEMBERS

Abdulkareem Almutairi (Saudi Arabia) - Alan Sakar (Mexico) - Aman Verma (Canada) - Ana Angel (Colombia) - Ana Sousa (Portugal) - Andrew Clennett (New Zealand) - Andrey Logatkin (Russian Federation) - Angel Landa Ugarte (Spain) - Angela Ogier (New Zealand) - Ardit Cami (Belgium) - Ashutosh Shastri (United Kingdom) - Baldur Pétursson (Iceland) - Bartłomiej Kolodziejczyk (Australia) - Bassem Mneymne (Qatar) - Brock King (Canada) - Burkhard Von Kienitz (Germany) - Carlos Navas Pérez (Spain) - Charles Chibambo (Malawi) - Christian Diendorfer (Austria) - Christoph Schäfers (Germany) - Daða Þorstein Sveinbjörnsson (Iceland) - Daniel Gnoth (New Zealand) - Daniel Kroos (Austria) - David Eduardo Pena (Colombia) - Diego Oroño (Uruguay) - DMR Panda (India) - Egor Kvyatkovsky (Russian Federation) - Elena Pashina (Russian Federation) - Esam Al Murawwi (United Arab Emirates) - Francisco Imperatore (Argentina) - Gabriel Guggisberg (Chile) - Gassem Fallatah (Saudi Arabia) - Gintaras Adzgauskas (Lithuania) - Hans-Wilhelm Schiffer (Germany) - Hiroyuki Takeuchi (Japan) - James Tyrrell (Australia) - Jean-Eudes Moncomble (France) - Jón B. Skúlason (Iceland) - Jose Caceres Blundi (Switzerland) - Juan Celis (Colombia) - Ken Gafner (South Africa) - Leo Jansons (Latvia) - Lucia Fuselli (Luxembourg) - Luis-Martín Krämer (Germany) - Maria José González (Uruguay) - Mariya Trifonova (Bulgaria) - Martín Scarone (Uruguay) - Massimiliano Cervo (Argentina) - Mohamed El Gohary (Egypt, Arab Rep.) - Nabil Bouraoui (Tunisia) - Nabil Jedaira (Morocco) - Nii Ahele Nunoo (United States of America) - Nikola Tomasovic (Serbia) - Nishant Kumar Sharma (India) - Nujood Almulla (Saudi Arabia) - Ola Abdelmotaleb (Egypt) - Olawale Adenuga (Nigeria) - Olga Frolova (Russian Federation) - Oskar Sigvaldason (Canada) - Pedro Ernesto Ferreira (Portugal) - Rainer Block (Germany) - Rajneesh Agarwal (India) - Renata Viggiano (Italy) - Roberto Bencini (Italy) - Russell Pendlebury (Australia) - Sebastian Veit (Germany) - Shane Gowan (New Zealand) - Takahiro Nagata (Japan) - Theodor Zillner (Austria) - Tina Schirr (New Zealand) - Tom Meares (Australia) - Victor Andres Martinez (Panama) - Victorio Oxilia (Paraguay) - Vikas Meena (India) - Vytautas Keršiusis (Lithuania) - William D'haeseleer (Belgium) - Wilson Sierra (Uruguay) - Yena Chae (Korea, Rep. of) - Zlata Sergeeva (Russian Federation)

Nous tenons à remercier Didier Holleaux pour sa contribution personnelle avec l'arc-en-ciel de couleurs de l'hydrogène représenté à la figure 3 du chapitre 3.

Nous tenons également à remercier Pam Hurley, Ana Angel, Takahiro Nagata, Maira Kusch et Nicole Kaim pour leur aide précieuse.

Fondé en 1923, le **Conseil Mondial de l'Énergie (World Energy Council)** est la principale organisation multi-énergétique mondiale qui soutient activement les organisations intergouvernementales, les gouvernements et les entreprises dans la mise en place de systèmes énergétiques durables. Organisation à but non-lucratif et non gouvernementale, agréée par l'Organisation des Nations Unies, le Conseil Mondial de l'Énergie est partenaire stratégique d'autres organisations clés dans le domaine de l'énergie.

Il représente l'ensemble du spectre énergétique, avec des pays et partenaires membres dans plus de 90 pays ; il réunit ainsi toutes les zones économiques du monde, tous les types d'énergie, des énergies renouvelables aux combustibles fossiles, et tous les types d'organisation.

Le Conseil Mondial de l'Énergie produit des études et des publications considérées comme des outils essentiels par les gouvernements, l'industrie, les investisseurs, les OIG, les ONG et les universitaires à la recherche d'informations impartiales pour éclairer leurs processus décisionnels. Elles couvrent principalement trois thèmes : des scénarios énergétiques mondiaux, la politique et les risques (trilemme énergétique, résilience, risques extrêmes et cyber risques) et le suivi des enjeux (ce qui empêche les dirigeants de dormir la nuit) et l'innovation (blockchain, accès à l'énergie).

Le Conseil Mondial de l'Énergie organise de nombreuses manifestations - mondiales, nationales et régionales - dont le Congrès Mondial de l'Énergie, événement triennal majeur de l'industrie énergétique attirant plusieurs milliers de délégués, qui comprend un programme technique, des réunions, des séances de travail en réseau et une importante exposition sur l'énergie pour faciliter l'accès à l'information et le dialogue mondial sur la politique énergétique.

Plus d'informations sur [www.worldenergy.org](http://www.worldenergy.org)

L'**Electric Power Research Institute (EPRI)** et le Gas Technology Institute (GTI) ont créé la Low-Carbon Resources Initiative (LCRI) afin de relever les défis et de combler les lacunes dans la réduction des émissions de carbone dans l'énergie pour l'ensemble de l'économie. La LCRI se concentre sur la chaîne de valeur des vecteurs énergétiques alternatifs et des carburants à faible teneur en carbone, tels que l'hydrogène, l'ammoniac, les biocarburants (y compris le gaz naturel renouvelable et les carburants synthétiques), ainsi que sur la recherche, le développement et la démonstration pour permettre leur production, leur stockage, leur livraison et leur utilisation dans l'économie énergétique. Ces vecteurs énergétiques ou carburants sont nécessaires pour permettre des trajectoires abordables vers une décarbonation de l'ensemble de l'économie d'ici le milieu du siècle. Cette collaboration mondiale de cinq ans permettra d'identifier et d'accélérer l'indispensable développement de technologies prometteuses, de démontrer et d'évaluer la performance des technologies et des processus clés, en identifiant les voies d'amélioration possibles, et d'informer les principales parties prenantes et le public sur les options technologiques et les trajectoires potentielles vers un avenir à faible émission de carbone.

Plus d'informations sur [www.epri.com](http://www.epri.com)

**PricewaterhouseCoopers (PwC)** est un réseau d'entreprises réparties dans 155 pays et comptant plus de 284 000 personnes engagées à fournir des services d'assurance, de conseil et de fiscalité de qualité, dont plus de 20 000 professionnels engagés dans les secteurs de l'énergie, des services publics et des ressources. Avec sa stratégie globale, The New Equation, PwC répond aux défis qui façonnent le monde d'aujourd'hui, en mettant l'accent sur l'instauration de la confiance et l'obtention de résultats durables qui créent de la valeur pour les organisations, leurs parties prenantes et la société en général. Le changement climatique est l'un des problèmes les plus urgents au monde. PwC s'est engagé à atteindre des émissions nettes de gaz à effet de serre nulles d'ici 2030 et collabore avec des organisations pour accélérer leur propre transformation en fonction du climat. PwC et le Conseil Mondial de l'Énergie ont pour objectif commun de promouvoir la transition énergétique et la durabilité en s'engageant auprès des décideurs politiques et des principaux acteurs du secteur. Ils partagent l'idée que la transition énergétique et la durabilité sont possibles grâce à l'interaction de cadres politiques solides et d'une industrie énergétique forte et compétitive.

Plus d'informations sur [www.pwc.fr](http://www.pwc.fr)

## Le Conseil Français de l'Énergie

Le Conseil Français de l'Énergie est une association qui a pour objectif de promouvoir la fourniture et l'utilisation durables de l'énergie pour le plus grand bien de tous. Fondée en 1923, elle est le comité national français du Conseil Mondial de l'Énergie. Ce dernier rassemble plus de 3 000 organisations et représente une centaine de pays dont les deux tiers de pays en développement. Le Conseil Français de l'Énergie représente ses membres dans toutes les activités internationales du Conseil Mondial de l'Énergie.

Le Conseil Français de l'Énergie regroupe les principaux acteurs français du secteur de l'énergie (entreprises, administrations, organisations professionnelles, centres de recherche ou universités) impliqués dans des réflexions qui privilégient les dimensions d'accessibilité, de disponibilité et d'acceptabilité de l'énergie dans une perspective mondiale ; toutes les ressources et les technologies de l'énergie sont représentées.

Le Conseil Français de l'Énergie participe aux débats énergétiques, notamment par l'intermédiaire de publications, par la participation à diverses manifestations et l'organisation de séminaires et forums mais aussi à travers l'édition, depuis fin 2017, de *La Revue de l'Énergie*, une revue bimestrielle qui est depuis 70 ans l'un des lieux de débat sur les questions énergétiques, en France et dans le monde, à l'interface des milieux académiques, politiques et industriels.

Le Conseil Français de l'Énergie assure également la diffusion des résultats des recherches ou études qu'il a financées. Le français étant l'une des deux langues officielles du Conseil Mondial de l'Énergie, le Conseil Français de l'Énergie contribue à la promotion de la francophonie en traduisant en français et en diffusant les travaux les plus importants du Conseil Mondial de l'Énergie.

### Conseil Français de l'Énergie

12 rue de Saint-Quentin

75010 Paris

France

T (+33) 1 40 37 69 01

E [cfe@wec-france.org](mailto:cfe@wec-france.org)

[www.wec-france.org](http://www.wec-france.org)

 @CFE\_wec