



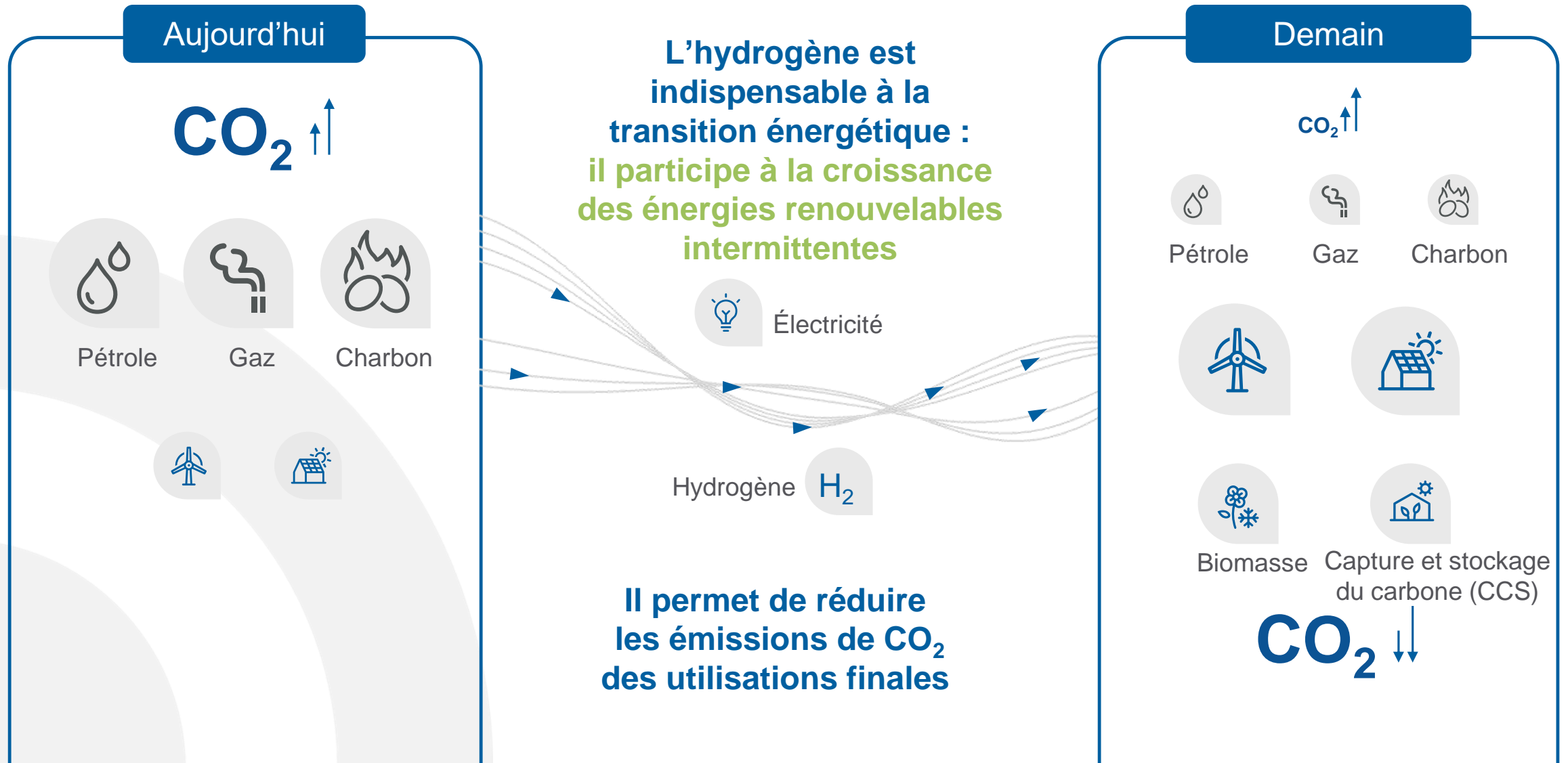
L'énergie hydrogène au cœur de la transition énergétique

Cycle PDSI : Pour le Développement des Sciences, de l'Innovation au service des transitions
Organisé par la SEIN (Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale), l'AFAS (l'Association française pour l'avancement des sciences), IESF Ile de France (les Ingénieurs et Scientifiques de France) et l'Association Bernard Grégory



La transition énergétique :
de nombreux défis à relever

Les transformations du système énergétique mondial



Le rôle de l'hydrogène dans la transition énergétique

L'hydrogène permet de limiter le réchauffement climatique et les émissions de carbone :

En développant les énergies renouvelables intermittentes

En facilitant le développement des sources d'énergie renouvelable, ainsi que le stockage et le transport de l'énergie sur toute la planète.



Énergie pour l'industrie



Transport



Chauffage et électricité



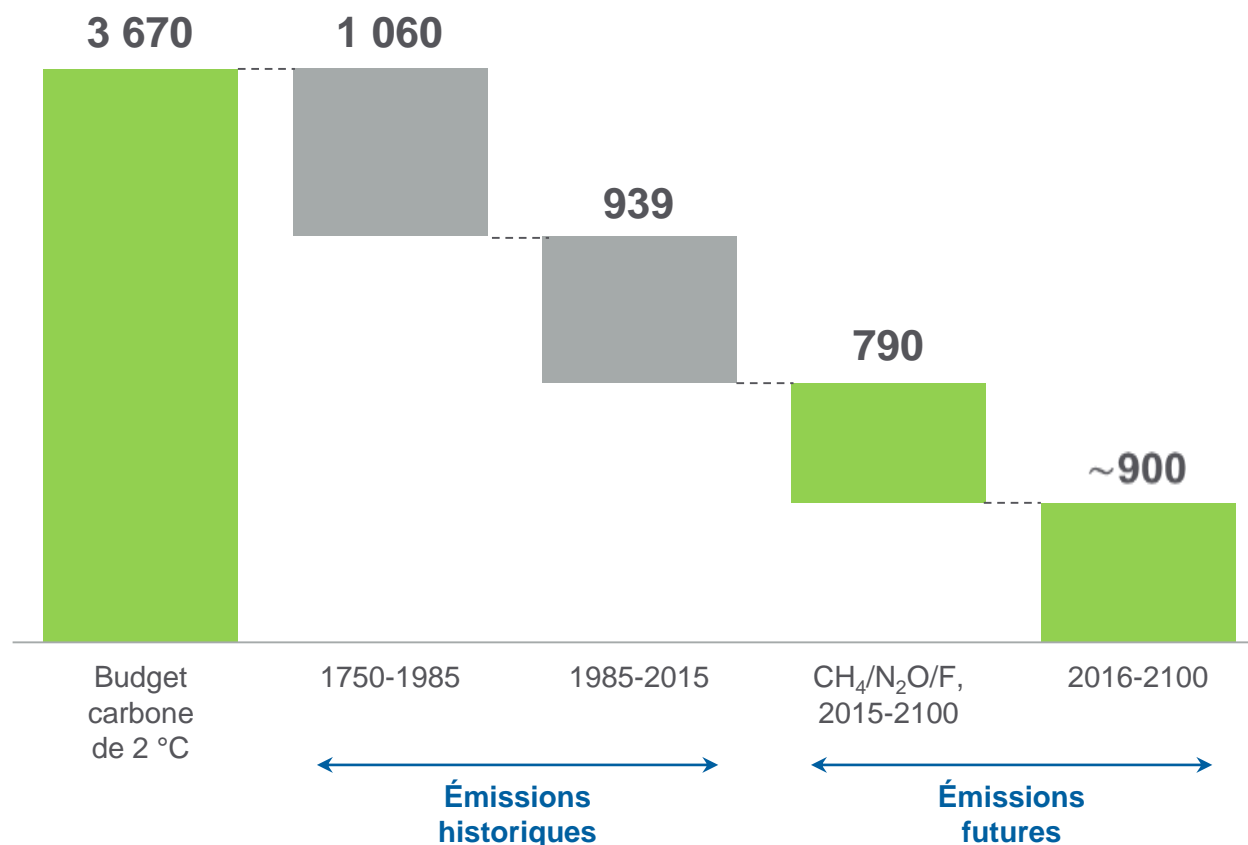
Matière première décarbonée

En réduisant les émissions de CO₂ des utilisations finales

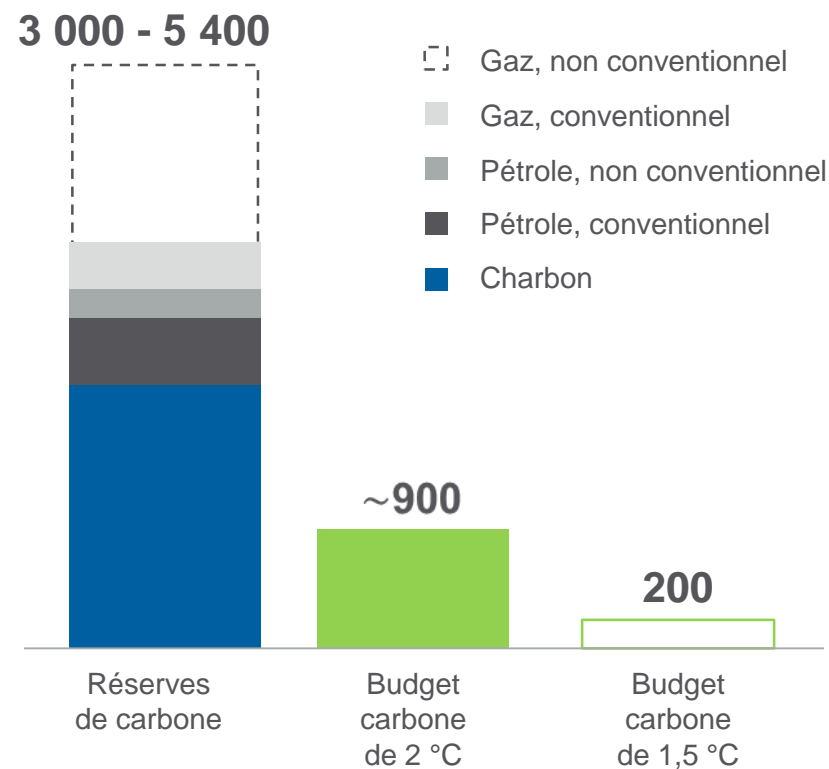
Un budget carbone nous permet de limiter le réchauffement climatique

Éq. en Mds de tonnes de CO₂

Émissions du budget carbone de 2 °C jusqu'en 2100

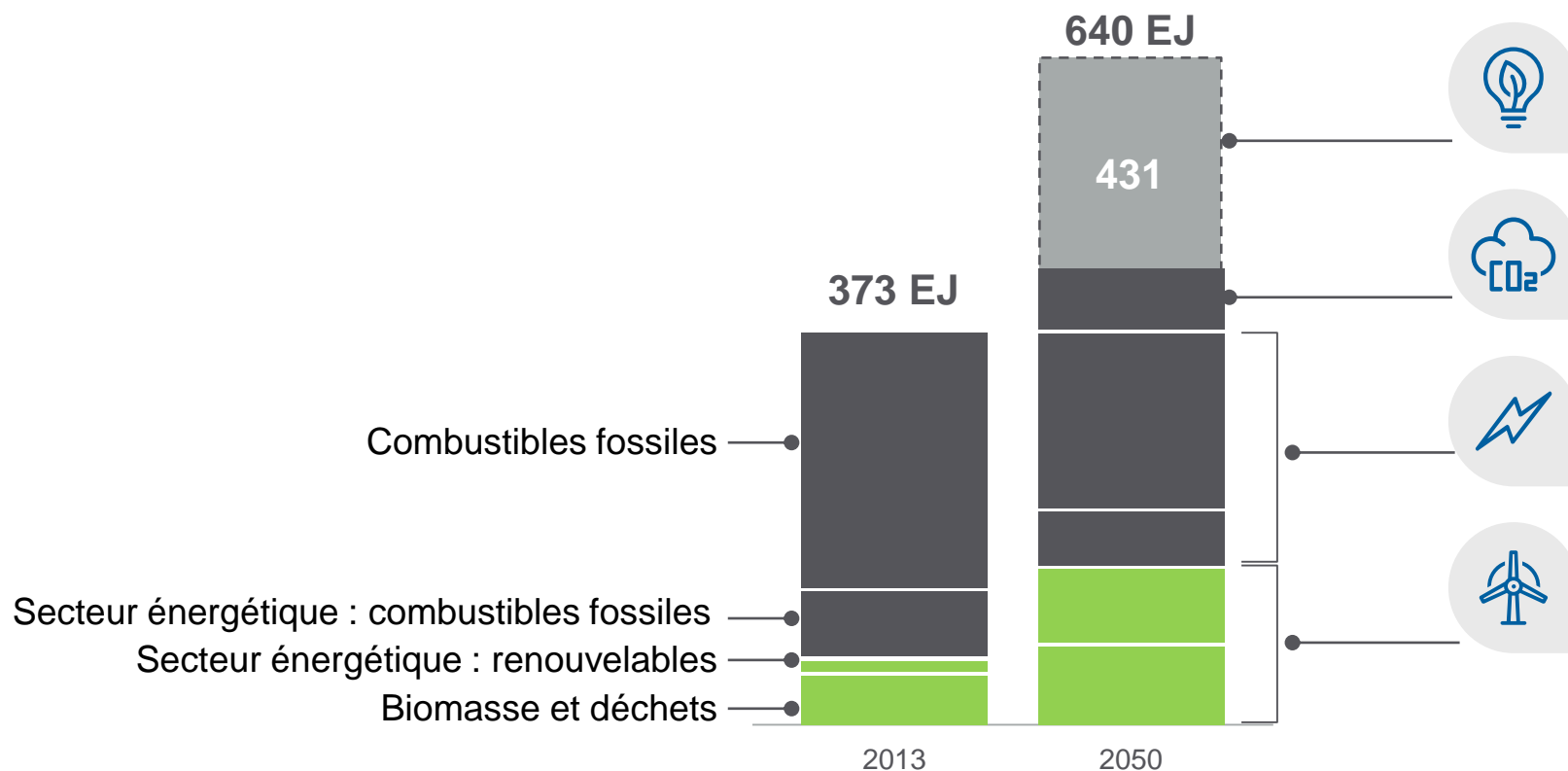


Budget carbone comparé aux réserves de carbone



Les 4 principaux leviers nécessaires pour favoriser la transition énergétique

Consommation énergétique finale¹ en 2013 et 2050, en EJ



1. L'augmentation l'efficacité énergétique limite la hausse de la consommation d'énergie
2. La capture/valorisation du carbone (CCS/U) lors de l'utilisation des combustibles fossiles³
3. L'adoption de vecteurs énergétiques bas carbone, par ex. électricité ou hydrogène
4. Les énergies renouvelables remplacent les combustibles fossiles

¹ Consommation énergétique finale dans le scénario +2°C de l'AIE

² L'augmentation de la demande énergétique est déterminée via l'augmentation relative des émissions de CO₂ sans impact énergétique

³ La quantité de combustibles fossiles traitée via La capture/valorisation du carbone a été fixée à 25 % de la quantité totale de combustibles fossiles par rapport à la réduction comparée d'émissions de CO₂ pour les 2DS et les 6DS

⁴ Le secteur de l'énergie des combustibles fossiles comprend également l'énergie nucléaire

Les nombreux défis posés par la transition énergétique

Favoriser les énergies renouvelables



Diminuer les émissions des utilisations finales

Production
électrique
renouvelable
intermittente

x10

d'ici 2050 à 50+ TWh
par jour

Stockage d'énergie
renouvelable

+18 EJ

Du stockage d'énergie
issue de combustibles
fossiles (aujourd'hui)
au renouvelable
(d'ici 2050)

Électrification
des secteurs
d'utilisation finale

+75 %

De ~70 EJ aujourd'hui
à ~130 EJ d'ici 2050

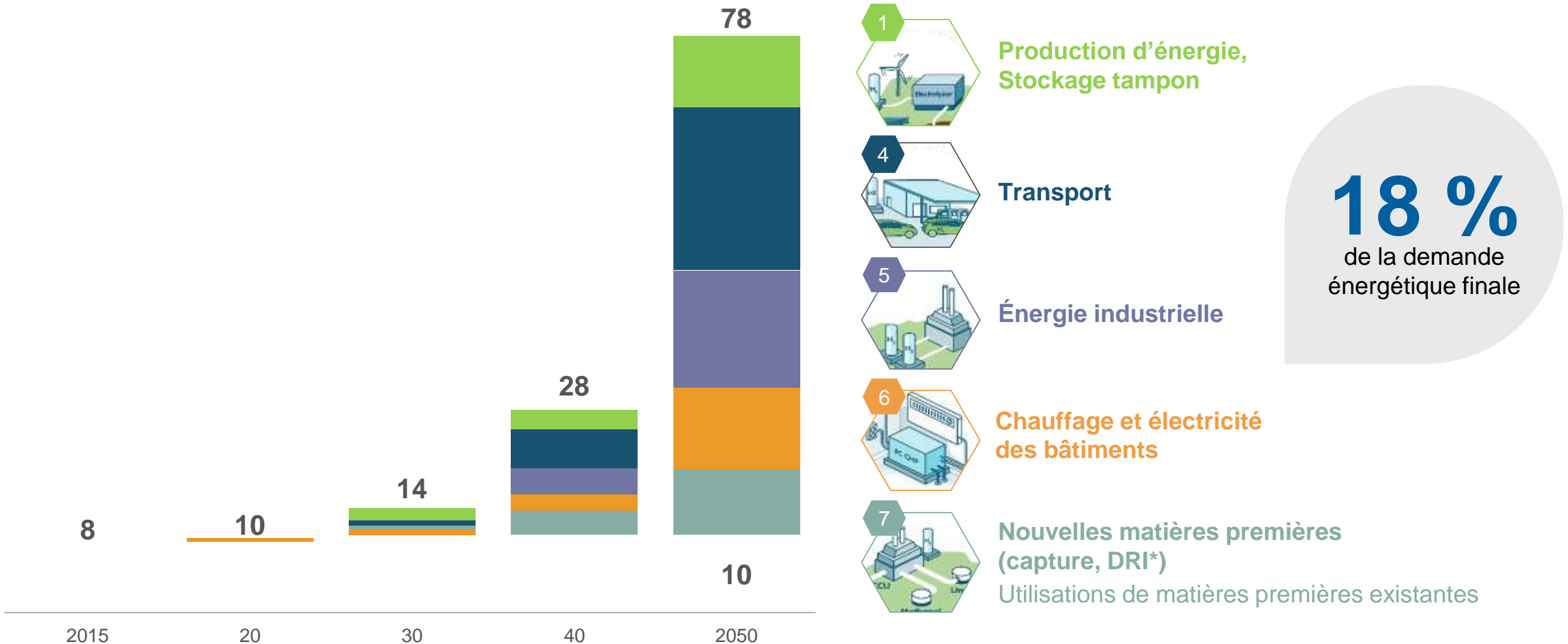
Utilisation
ou stockage
du carbone

+5,5 Gt

de très peu aujourd'hui
à 5,5 Gt d'ici 2050

Pour limiter le réchauffement à 2 °C, l'hydrogène pourrait contribuer à ~18 % de la demande

Demande énergétique potentielle dans le monde satisfaite avec de l'hydrogène, en exajoule (EJ)



Les sept rôles de l'hydrogène dans la transition énergétique

Favoriser les énergies renouvelables

Diminuer les émissions des utilisations finales

Permettre l'intégration à grande échelle des renouvelables et la production d'énergie

Distribuer de l'énergie dans tous les secteurs et régions

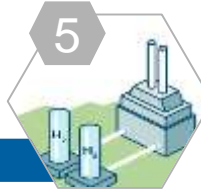
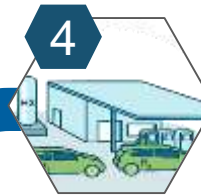
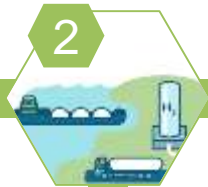
Servir de **stockage tampon** pour accroître la résilience du système

Diminuer les émissions des **transports**

Diminuer les émissions liées à la consommation d'**énergie de l'industrie**

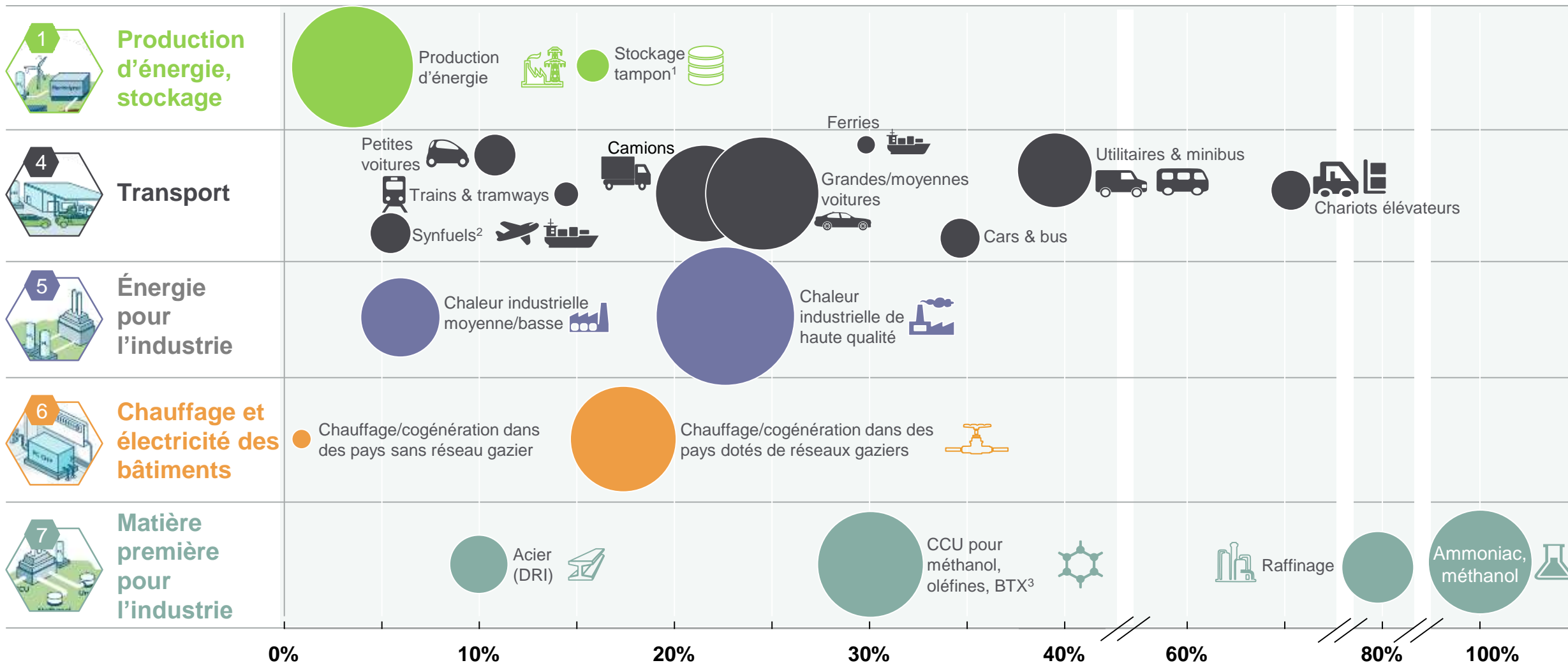
Diminuer les émissions liés **le chauffage et l'électricité des bâtiments**

Servir de **matière première**, avec le carbon capturé



L'hydrogène a un potentiel important dans toutes les applications

○ La taille des bulles indique le potentiel de l'hydrogène en 2050 en EJ (1 EJ)

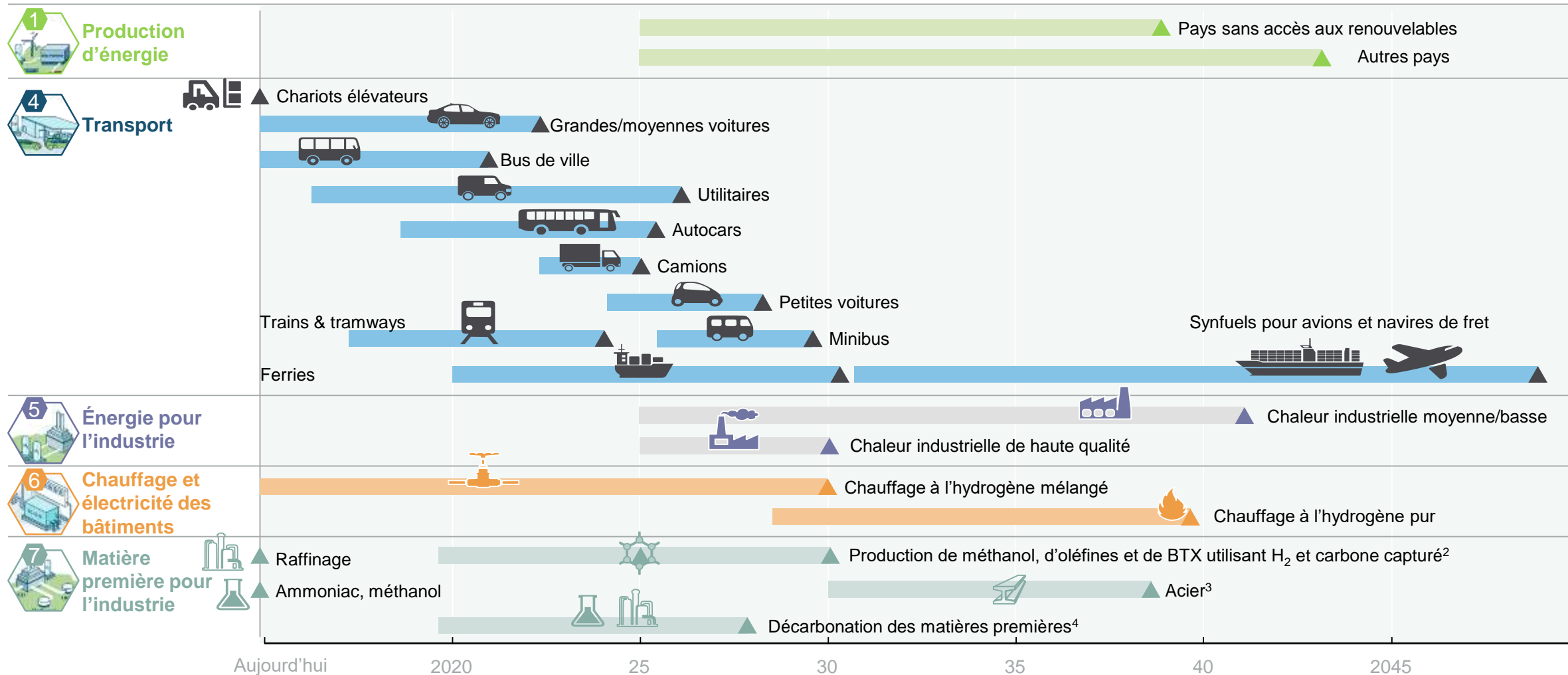


1 Pourcentage de la croissance annuelle totale de la demande énergétique hydrogène et des renouvelables variables

2 Essences synthétiques pour l'aviation et les navires de fret

3 Pourcentage de la production totale de méthanol, d'oléfine et de BTX utilisant des oléfines et du carbone capturé

Les technologies existent et sont prêtes à être déployées



1 Acceptabilité par le grand public définie telle que les ventes >1 % dans le segment des marchés prioritaires

Source: McKinsey & Hydrogen Council 2017

2 Part de marché signifie quantité de production qui utilise de l'hydrogène et du carbone capturé pour remplacer les matières premières

3 DRI avec hydrogène vert, réduction du fer dans les hauts fourneaux et autres procédés de fabrication de l'acier bas carbone utilisant de l'hydrogène

4 Part de marché signifie quantité de matières premières produite à partir de sources bas carbone

L'hydrogène d'ici 2050 : une vision quantifiée de son rôle clé dans la transition énergétique

18 %
de la demande
énergétique finale



30 millions
d'emplois créés



6 Gt
de baisse annuelle
d'émissions de CO₂



2 500 \$ milliards
de chiffre d'affaires annuel
(hydrogène et équipement)



Potentiel de l'hydrogène dans l'économie française, d'ici 2050

20 %
de la demande
énergétique
française

18 %
des véhicules

55 millions
de tonnes d'émissions
de carbone en moins

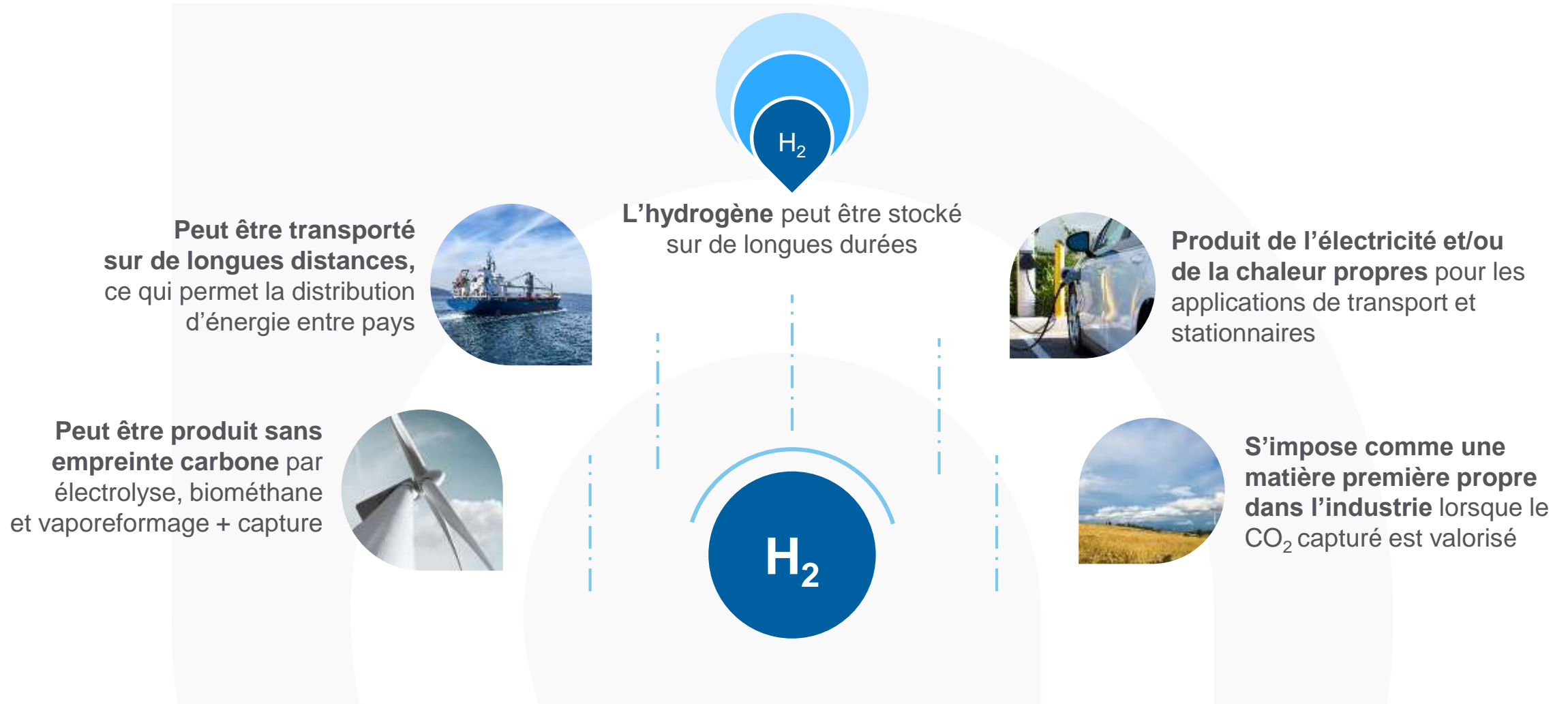
Plus de

150 000 emplois

40 milliards d'€
de chiffre d'affaires annuel



L'hydrogène est un vecteur énergétique propre, sûr et polyvalent



De nombreuses applications existent déjà



Traitement thermique



Verre



Hydrogène ultra pur (<1 ppb)



Chimie et raffinage du pétrole



Fusées



Voitures électriques à hydrogène

Les marchés de la mobilité hydrogène sont déjà prêts pour passer à l'échelle AUJOURD'HUI

Ferries
1 T/jour



Bateaux de croisière
10 T/jour



Véhicules de manutention de matériaux
100 kg/jour par site



Camions
100 kg/jour par camion



Bus
20 kg/jour par bus



Trains
150 kg/jour par train



Voitures individuelles
100-1000 kg/jour par station



Drones

Applications aéronautiques



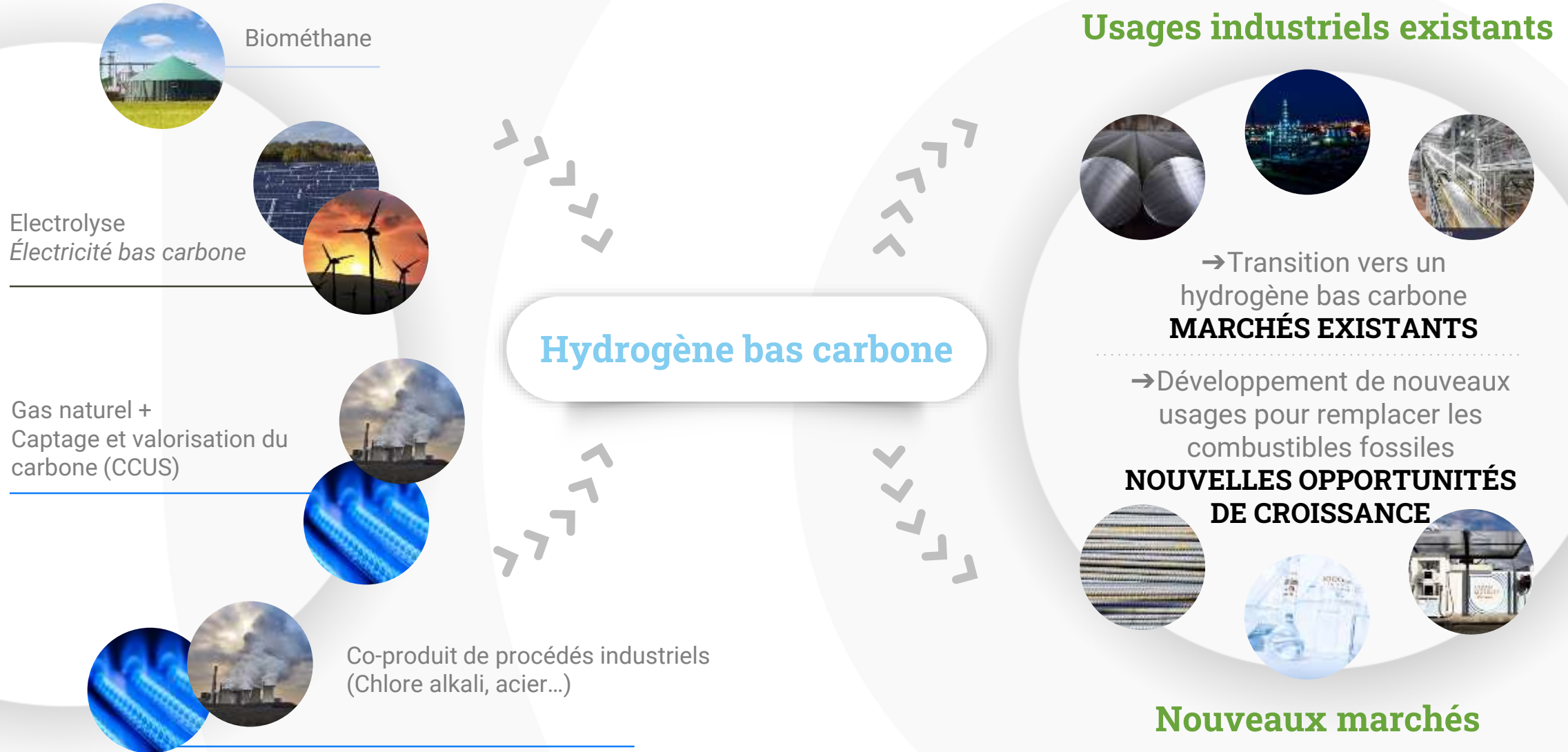
Vélos et scooters



Des développements marchés & soutien publics significatifs



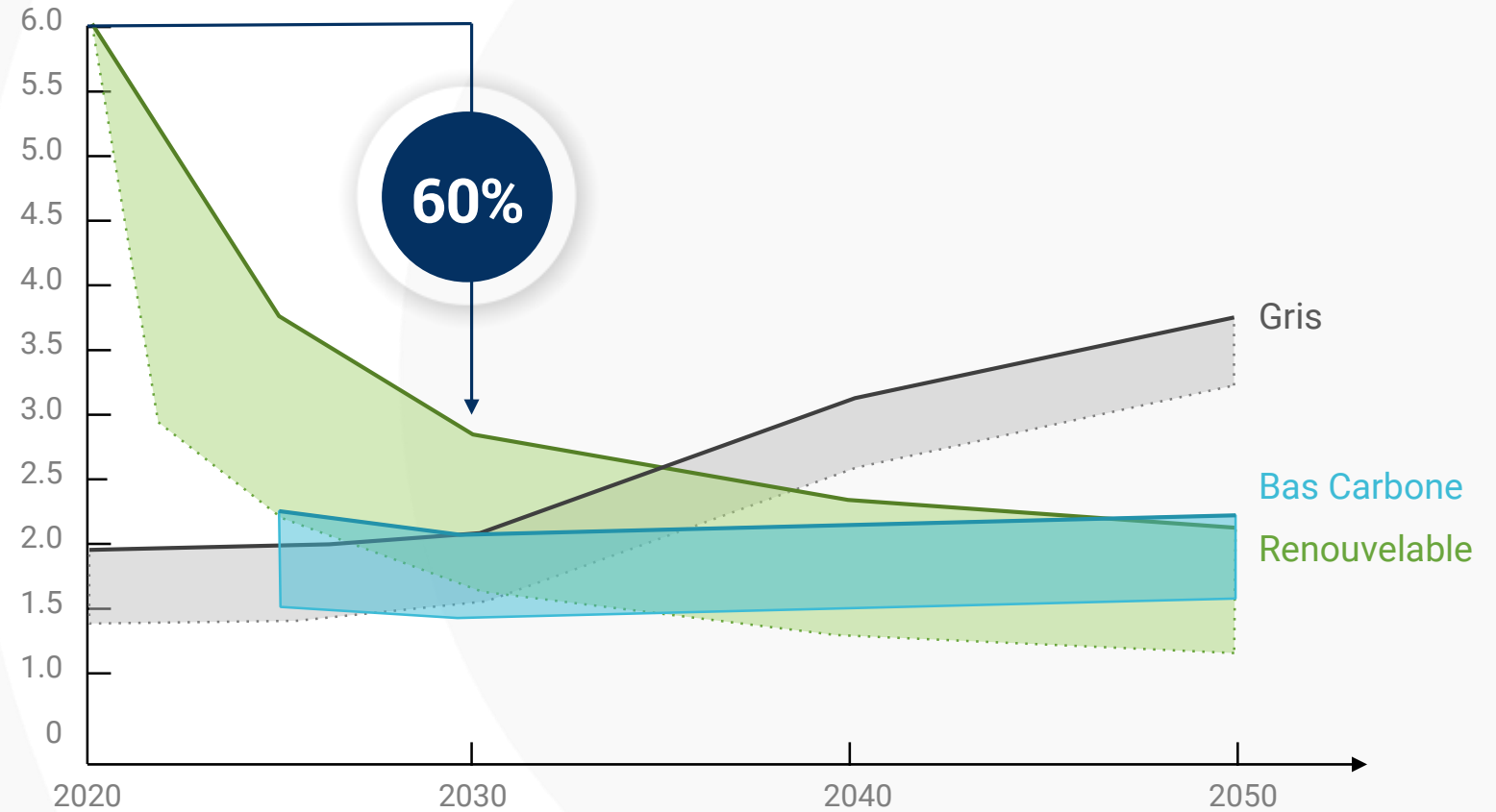
Les filières de l'hydrogène bas carbone



Le coût de l'hydrogène décarboné peut être compétitif

Les coûts de l'hydrogène renouvelable peuvent être diminués de 60% d'ici 2030

Coût de production
de l'hydrogène
(USD/kg)



Compétitivité: des baisses de coût significative en vue

Coût de la production H2

-60%

Giga factory d'électrolyseurs

Coût de la distribution H2

-70%

** Capacité et utilisation des assets plus importants
* distribution par l'hydrogène liquide et hydrogène haute pression*

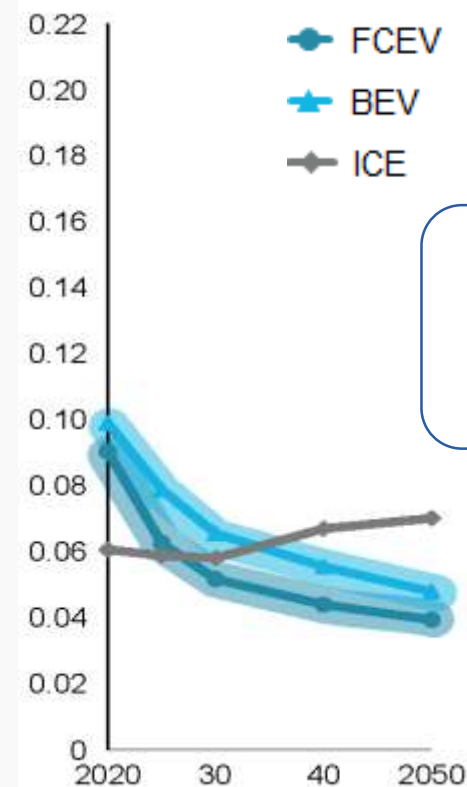
Coût des applications H2

-45%

Passage à l'échelle de la fabrication des piles à combustibles et autres composants

Transport moyen courrier régional

réduction du TCO



Range in tank
500 km

La sécurité hydrogène: une condition du succès

Tout comme les autres énergies, l'hydrogène présente des risques particuliers à maîtriser



Un travail collectif indispensable pour la filière

Les ambitions d'Air Liquide

Mener **l'activation des marchés de l'énergie hydrogène avec des partenaires stratégiques**, notamment pour la mobilité et l'industrie

Conserver le leadership sur toute la chaîne de valeur de l'hydrogène, depuis sa **production jusqu'à sa livraison au point d'utilisation**



**EXPÉRIENCE
CLIENT**

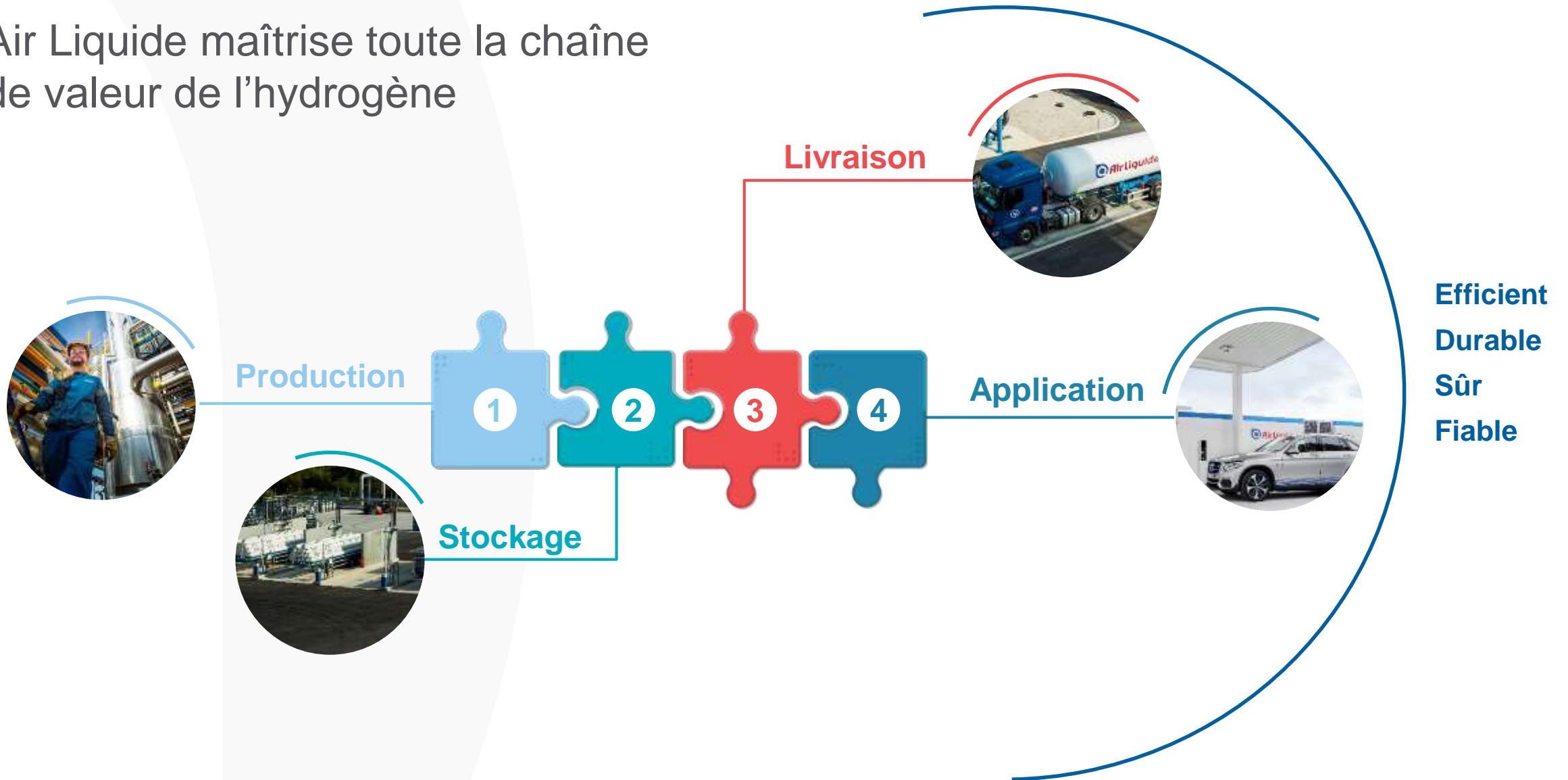
TECHNOLOGIE



INVESTISSEMENT

Maîtrise technologique de toute la chaîne de valeur

Air Liquide maîtrise toute la chaîne de valeur de l'hydrogène



Tout est déjà en place pour monter en puissance



Démarrage des
marchés initiaux



Efforts entrepris
pour se préparer
au déploiement



Politiques de
soutien existantes



Besoin
systémique



Fort potentiel
technologique



Premiers signes
d'acceptation sociale

Air Liquide investit déjà



Conversion d'électricité en gaz
Danemark
1 électrolyseur



Mobilité pour les particuliers
Paris, Bruxelles et Rotterdam
6 HRS



Mobilité poids lourds
Rotterdam
25 HRS
1 000 camions



Mobilité poids lourds
Fos-sur-Mer
1 HRS
8 camions
3 bus



Mobilité pour les particuliers
Allemagne
31 HRS



Mobilité pour les professionnels
USA+EUROPE
9 HRS



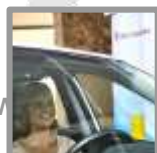
Mobilité pour les particuliers
Nord-est des USA
12 HRS
+ approvisionnement



Mobilité pour les particuliers
Californie
4 HRS



Conversion d'électricité en gaz
Bécancour
Électrolyseur 20 MW
Technologie PEM



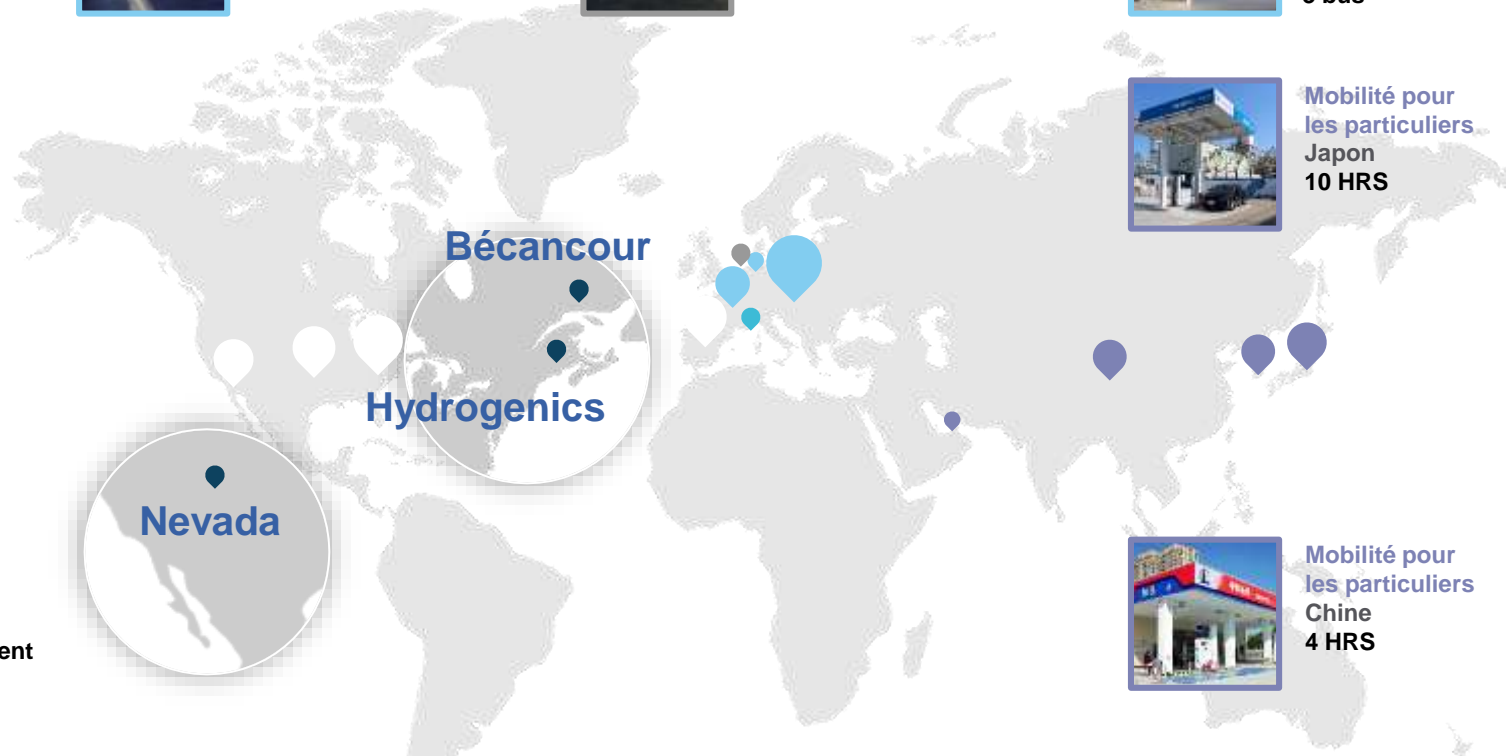
Hydrogène Liquide
Nevada
30 tonnes/jour



Mobilité pour les particuliers
Dubai
1 HRS



Mobilité pour les particuliers
Corée du Sud
3 HRS



Plus de 120 stations hydrogène installées par Air liquide dans le monde, dont plus de 50 sont opérées par le Groupe

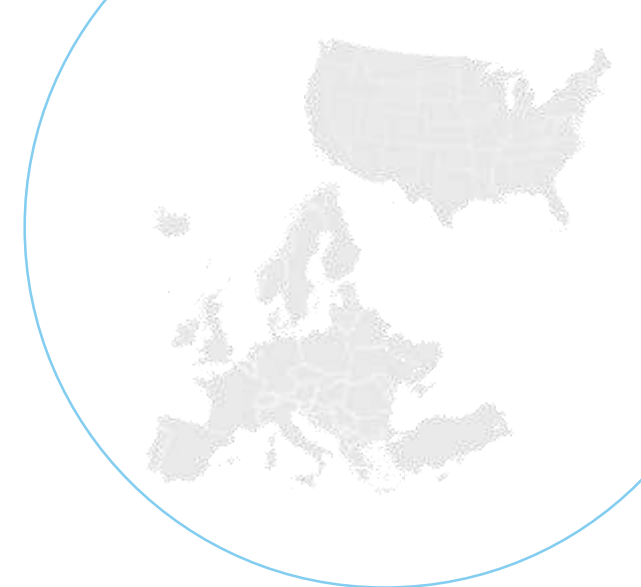
ALIAD :
12 Mds € investis dans 5 start-ups

14 milliards de m³/an
1 850 km de gazoducs H₂
46 grandes centrales H₂/CO
40 électrolyseurs en fonctionnement
2 Mds € de chiffre d'affaires

Mobilité pour les professionnels ÉTATS-UNIS+EUROPE



Station hydrogène pour chariots élévateurs dans l'entrepôt logistique de Prelocentre à Orléans (France)



Hydrogène pour chariots élévateurs

À ce jour, on compte 25 000 chariots élévateurs à hydrogène déployés sur le marché nord-américain.

Le développement potentiel de ce marché en Europe pourrait être de 10 000 unités environ d'ici 2020.

- > Air Liquide conçoit des stations hydrogène pour chariots élévateurs
- > 11 stations sont installées en Amérique du Nord et en Europe
- > 270 chariots élévateurs alimentés par des stations hydrogène Air Liquide en Europe (projets HAWL et HyLift), dont 137 pour Carrefour (France) composant la plus grande flotte d'Europe
- > Fourniture d'hydrogène à Walmart (Canada) et à Coca-Cola (Californie)

Mobilité pour les particuliers

Nord-Est des États-Unis



New York



Connecticut



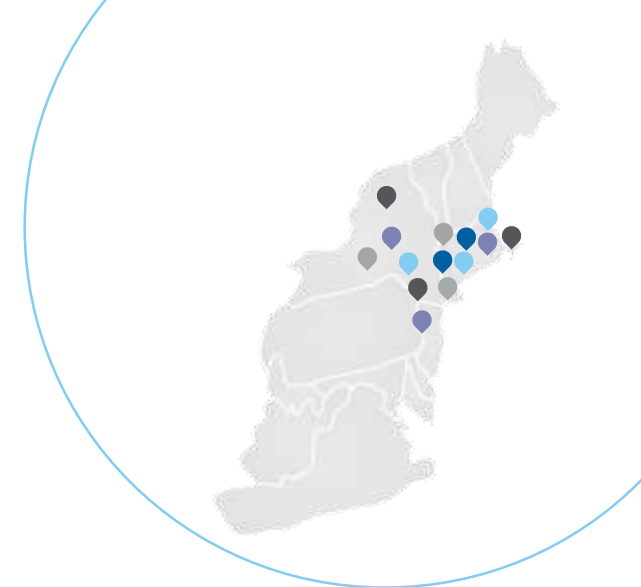
Massachusetts





New Jersey



Rhode Island



- Air Liquide construit un réseau de 12 stations hydrogène
- Premier électrolyseur sur site HRS à Braintree, MA
- Démarrage en 2020
- Chaîne d'approvisionnement hydrogène dédiée par  Air Liquide
- Projet en collaboration avec  TOYOTA

Mobilité

Californie - États-Unis



Anaheim

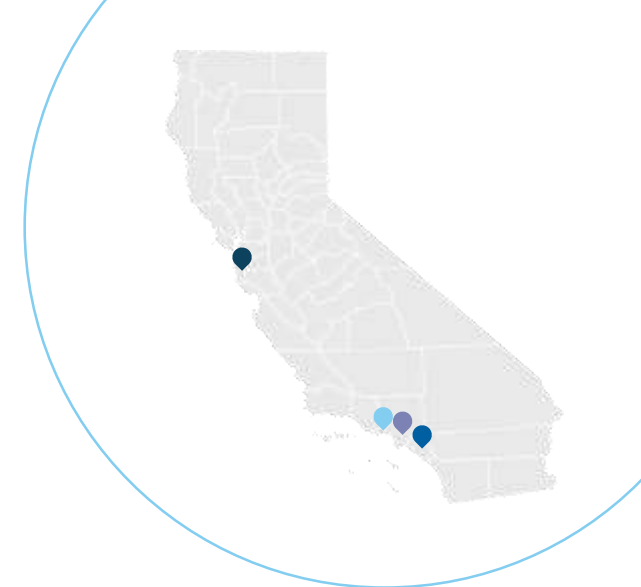


Long Beach

Air Liquide a construit et exploite la station hydrogène conçue pour le semi-remorque à pile à combustible de Toyota.



- Première station hydrogène installée à Anaheim en 2017, +63 000 ravitaillements depuis son ouverture
- 3 autres stations à Long Beach, à l'aéroport de Los Angeles et à Palo Alto
- Le projet Portal en partenariat avec Toyota : Air Liquide a construit et exploite la station hydrogène conçue pour le semi-remorque à pile à combustible de Toyota (Long Beach).
- Air Liquide a signé un accord de long terme avec FirstElement Fuel Inc. pour alimenter leur station en Californie.



Chiffres globaux du déploiement

Véhicules électriques à hydrogène

Stations hydrogène

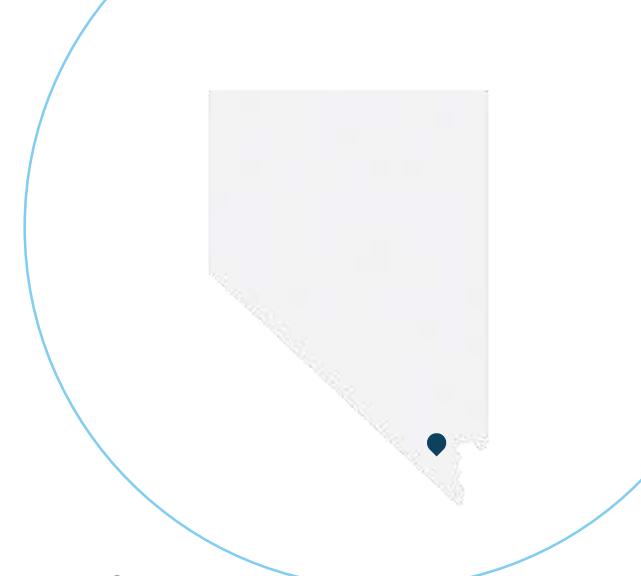


Production H2

Nevada - États-Unis



Nevada



26 nov. 2018 : Air Liquide construit la première centrale de production d'hydrogène liquide à échelle mondiale (à North Las Vegas) destinée à approvisionner les marchés hydrogène.

Grâce à cet investissement, Air Liquide permettra de déployer à grande échelle la mobilité hydrogène sur la côte ouest, apportant ainsi une solution fiable pour ravitailler les 40 000 véhicules électriques à hydrogène prévus en Californie d'ici 2022.

Production H2 Canada



Hydrogenics

- 24 janvier 2019 : Air Liquide prend une participation de 18,6 % dans le capital d'Hydrogenics Corporation, leader en piles à combustible et en équipement de production d'hydrogène par électrolyse. Il s'agit d'un investissement stratégique de 20,5 millions de dollars US (18 millions d'euros).

Air Liquide et Hydrogenics ont également signé un accord technologique et commercial pour développer conjointement les technologies par électrolyse PEM (membrane échangeuse de protons) à l'intention des marchés hydrogène en plein essor du monde entier.



Bécancour

- 25 février 2019 : Air Liquide investit dans le plus grand électrolyseur au monde avec membrane, en vue de développer sa production d'hydrogène d'origine renouvelable.

Air Liquide installera un électrolyseur de 20 MW qui augmente de 50 % la capacité actuelle de son unité de production d'hydrogène située à Bécancour au Québec (Canada). Ce nouveau électrolyseur PEM, doté de la technologie Hydrogenics, sera le plus grand au monde et répondra à la demande croissante d'hydrogène d'origine renouvelable.

Mobilité pour particuliers Japon



Gamagōri



Ōguchi



Air Liquide et 10 grandes entreprises japonaises ont arrêté un plan d'action pour la construction d'un réseau de stations hydrogène au Japon

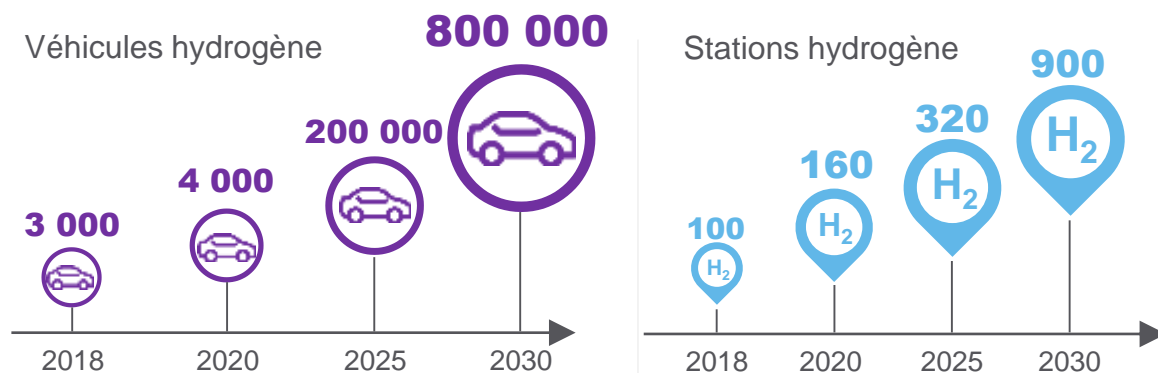
- > Ambition affichée du gouvernement japonais
- > Air Liquide installera et exploitera près de 20 stations d'ici 2021.



14 stations installées par Air Liquide à **Nagoya, Nagoya Nakagawa, Toyota, Kagoshima, Kasugai Katsugawa, Kawasaki, Kita-Nagoya Yamanokoshi, Kobe, Fukuoka, Saga, Miyata, Gamagōri, Ōguchi et Tokorozawa.**

Mars 2020, création du Groupe d'étude de la demande en hydrogène à Chubu pour répondre à la demande en applications mobilité ainsi que celle des clients industriels, en production électrique ou pour le secteur résidentiel.

Chiffres globaux du déploiement



Mobilité pour particuliers

Corée du Sud



L'hydrogène et les véhicules électriques à hydrogène font partie de la « Feuille de route de l'économie hydrogène de la Corée » (janvier 2019), financée par le ministère de l'Environnement (ME) et le ministère du Territoire, de l'Infrastructure et du Transport (MOLIT), qui est activement mise en œuvre.

Objectif : 310 stations H₂ d'ici 2022

Création de **H2 Korea** à but non lucratif comme passerelle entre le gouvernement et le secteur privé pour accélérer le développement de l'économie hydrogène

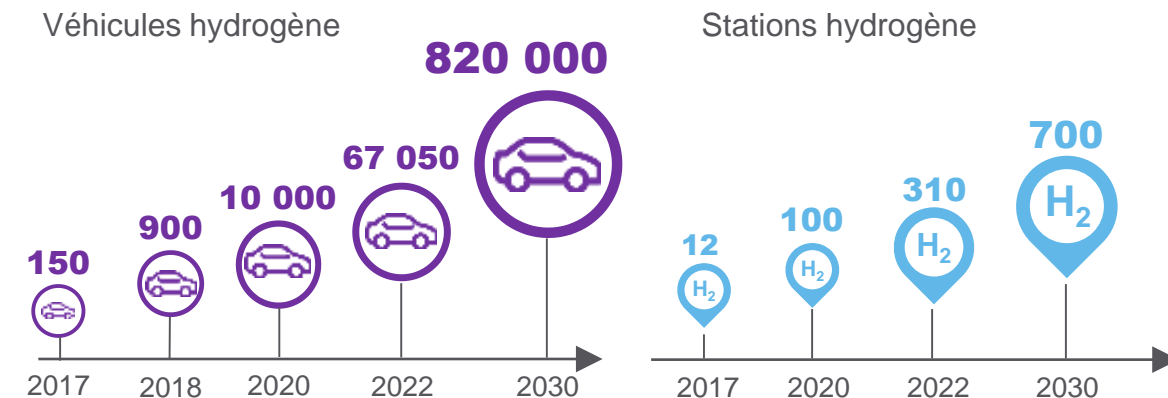
HyNet

Avril 2018 : signature d'un protocole d'accord entre le gouvernement coréen et des entreprises privées (industrie, secteur automobile) pour la création de H2 Mobility Korea.

Mars 2019 : accord de coentreprise (SPC) entre 13 entreprises du secteur privé, établi pour un déploiement de 100 stations dans tout le pays d'ici 2022. En exploitation jusqu'en 2028.

3 stations hydrogène sont équipées de la technologie Air Liquide.

Chiffres globaux du déploiement



Mobilité pour les professionnels Chine



Jiashan



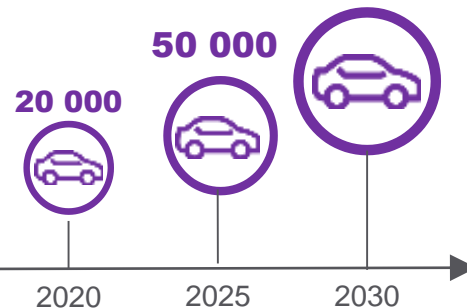
- Accord entre Air Liquide et **Yankuang Group** (11 janvier 2019) pour développer l'**infrastructure hydrogène dans la province orientale chinoise de Shandong**.
- Partenariat avec la startup chinoise **STNE** (3 juillet 2018) pour accélérer le déploiement de **flottes de camions électriques à hydrogène** pour des livraisons de marchandises en zones urbaines.
- Coentreprise entre Air Liquide et **Houpu** (2 novembre 2019) pour coopérer au **développement, à la fabrication et à la commercialisation** des stations **hydrogène**.
- Protocole d'accord entre Air Liquide et **Sinopec** (6 novembre 2019) pour **accélérer le déploiement de solutions de mobilité hydrogène en Chine**.
- La **première station hydrogène de la province de Zhejiang** a été inaugurée à l'automne 2019, équipée de la technologie Air Liquide et Houpu et exploitée par Sinopec. Elle peut ravitailler quotidiennement plus de 30 bus électriques à hydrogène sur les 100 bus que la municipalité a prévu de déployer. **Deux autres stations ont été ouvertes à Shanghai** en novembre 2019, pour ravitailler 200 véhicules utilitaires légers.
- Au total, 4 stations sont équipées de la technologie Air Liquide.



Chiffres globaux de déploiement

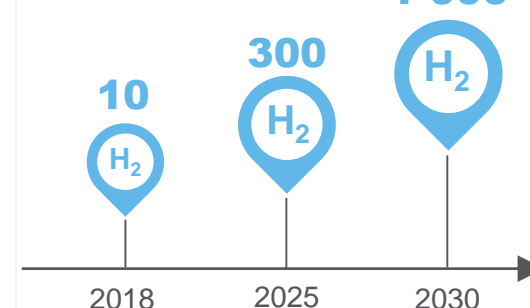
Véhicules hydrogène

1 million



Stations hydrogène

1 000



Mobilité pour particuliers

Station hydrogène à Dubaï



Dubaï



- Les essais ont démarré en septembre 2016, avec le déploiement des premières Mirai (Toyota).
- 1^{ère} station conçue et installée par Air Liquide en octobre 2017.
- Extension du déploiement des véhicules électriques à hydrogène à Dubaï jusqu'à l'Exposition universelle de 2020.
- Collaboration entre Air Liquide, ADNOC, Al Futtaim Motors / Toyota, Khalifa University et Masdar (fournisseur d'énergie verte) pour développer une feuille de route de mobilité à l'hydrogène dans les Émirats Arabes Unis.

Conversation d'électricité en gaz Danemark



40 %

de l'énergie renouvelable
issue du vent



Air Liquide maîtrise toute la chaîne de valeur de la production au stockage.

HyBalance

**Plus grand démonstrateur industriel européen
« power-to-hydrogen », projet piloté par Air Liquide**

- > Démarrage en janvier 2018
- > Électrolyseur PEM de 1,25 MW
- > Mise en évidence l'ensemble de la chaîne de valeur à partir de la production d'énergie d'origine renouvelable
- > Hydrogène livré aux clients industriels locaux
- > Hydrogène d'origine renouvelable utilisé pour une mobilité propre

Mobilité pour les professionnels France



Alma
(centre de Paris)



Aéroport d'Orly



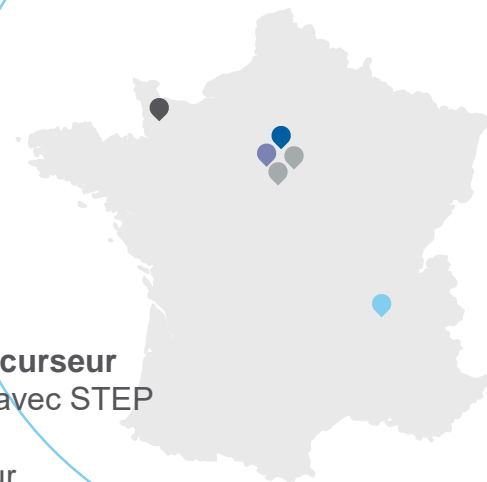
Les-Loges-en-Josas
(près de Versailles)



Aéroport de Roissy



Projet de flotte de taxis Paris

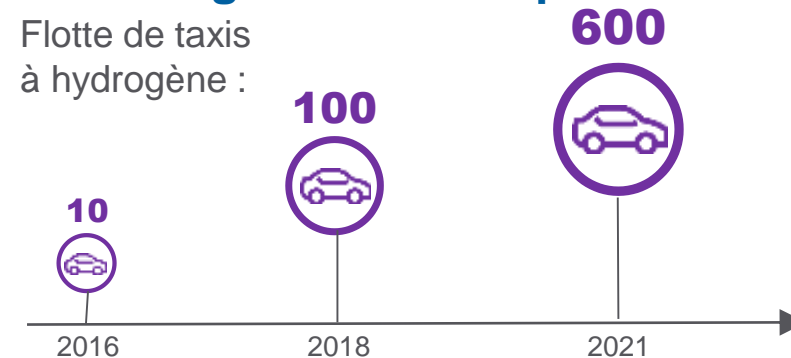


Projet de mobilité hydrogène innovant et précurseur

- > 1^{ère} flotte de taxis à l'hydrogène au monde, avec STEP
- > Lancement durant la COP21 en 2015
- > 5 taxis au lancement, puis 130 taxis à ce jour et cible 600 taxis d'ici 2021
- > 4 stations pour soutenir la croissance, 2 autres à Grenoble et à Saint-Lô.

Nov 2019 : signature d'un accord de coopération (Air Liquide, l'agglomération Durance, Luberon, Verdon (DLVA) et ENGIE) pour développer le projet « HyGreen Provence » qui vise à produire, stocker et distribuer de l'hydrogène vert. Il permettra de développer et de valider les conditions technico-économiques de la production de 1 300 GWh d'électricité solaire, soit l'équivalent de la consommation annuelle domestique d'environ 450 000 personnes, et également de la production d'hydrogène renouvelable sur une échelle industrielle par électrolyse de l'eau. Enfin, plusieurs dizaines de milliers de tonnes d'hydrogène renouvelable pourraient être produites de cette façon chaque année.

Chiffres globaux du déploiement



Mobilité poids lourds France



Fos-sur-Mer



HyAMMED

Juillet 2020 : Air Liquide a annoncé la construction de la première station hydrogène haute pression d'Europe :

- Pour alimenter la première flotte de camions à hydrogène longue distance
- Station de grande capacité jusqu'à 20 camions/jour (700 bar, 1t/jour)
- Site Air Liquide de Fos-sur-Mer (Région Provence-Alpes-Côte d'Azur).
- Partenaires : industriels, transporteurs, acteurs de la grande distribution (Carrefour, Coca-Cola European Partners, Monoprix)
- Réduction des émissions de CO2 : plus de 1 500 t/an (2 M km)
- Mise en service : début 2022
- Origine de l'hydrogène : bas carbone
- Station également conçue pour le ravitaillement de bus et autres utilitaires.



Mobilité poids lourds Pays-Bas



HyTruck

Juillet 2020 : Air Liquide et le port de Rotterdam ont annoncé le lancement d'une nouvelle initiative conjointe :

- 1 000 camions hydrogène zéro émission (dont 500 au port de Rotterdam)
- 25 stations grande capacité
- Capacité d'électrolyse nécessaire
- Réduction des émissions de CO2 : environ 100 000 t/an (110 M km)
- Relier les Pays-Bas, la Belgique et l'ouest de l'Allemagne d'ici 2025.
- Plusieurs partenaires : constructeurs (VDL Groep, Iveco/Nikola), sociétés de transport (Vos Logistics, Jongeneel Transport, HN Post), fournisseurs de piles à combustible.
- Il s'agit de l'un des plus grands projets européens de développement de camions à hydrogène et d'infrastructures connexes

Mobilité pour particuliers Allemagne



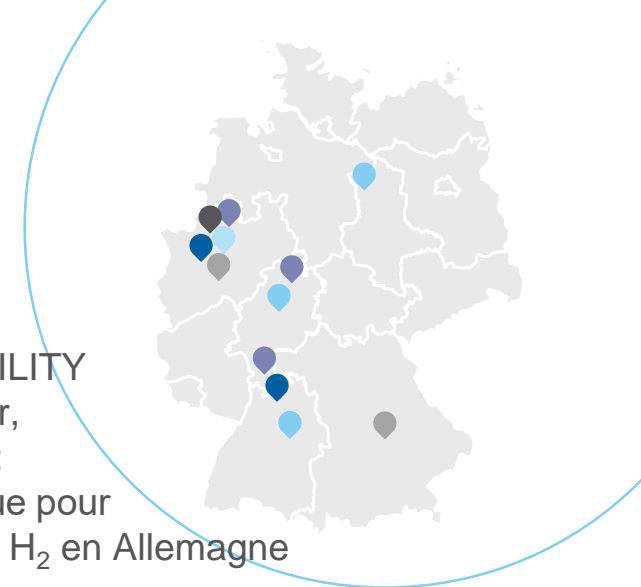
Ingolstadt



Düsseldorf II



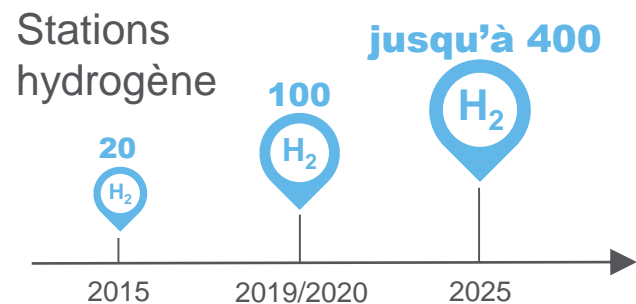
Mulheim



Création de la coentreprise H₂ MOBILITY Deutschland par Air Liquide, Daimler, Linde, OMV, Shell et Total en 2015 : accord sur un plan d'action spécifique pour élargir le réseau existant de stations H₂ en Allemagne jusqu'à 400 stations.

- > 350 M€ d'investissement
- > Max. 90 km de distance entre chaque station sur autoroute
- > 10 stations H₂ dans chaque zone métropolitaine
- > Air Liquide contribue à un grand nombre de ces stations
(en juin 2020, 32 stations publiques sur 82 étaient équipées de la technologie Air Liquide)

Chiffres globaux du déploiement



Élargissement du secteur et de l'intérêt géographique au niveau des PDG



LE CONSEIL DE L'HYDROGÈNE

couvre l'Europe, le Japon,
la Corée du Sud, les USA, le
Moyen-Orient et la Chine

Passage de 13 à **92 membres**
au troisième trimestre 2020, en 3 ans



D'importantes étapes pourront être franchies dès 2030



1 voiture de tourisme sur 12 vendues sur les marchés qui adoptent rapidement les produits nouveaux (Allemagne, Californie, Japon et Corée du Sud) seront des véhicules électriques à hydrogène



20 Mt de CO₂ seront converties en produits chimiques et intermédiaires tels que le **méthanol** utilisant de l'hydrogène

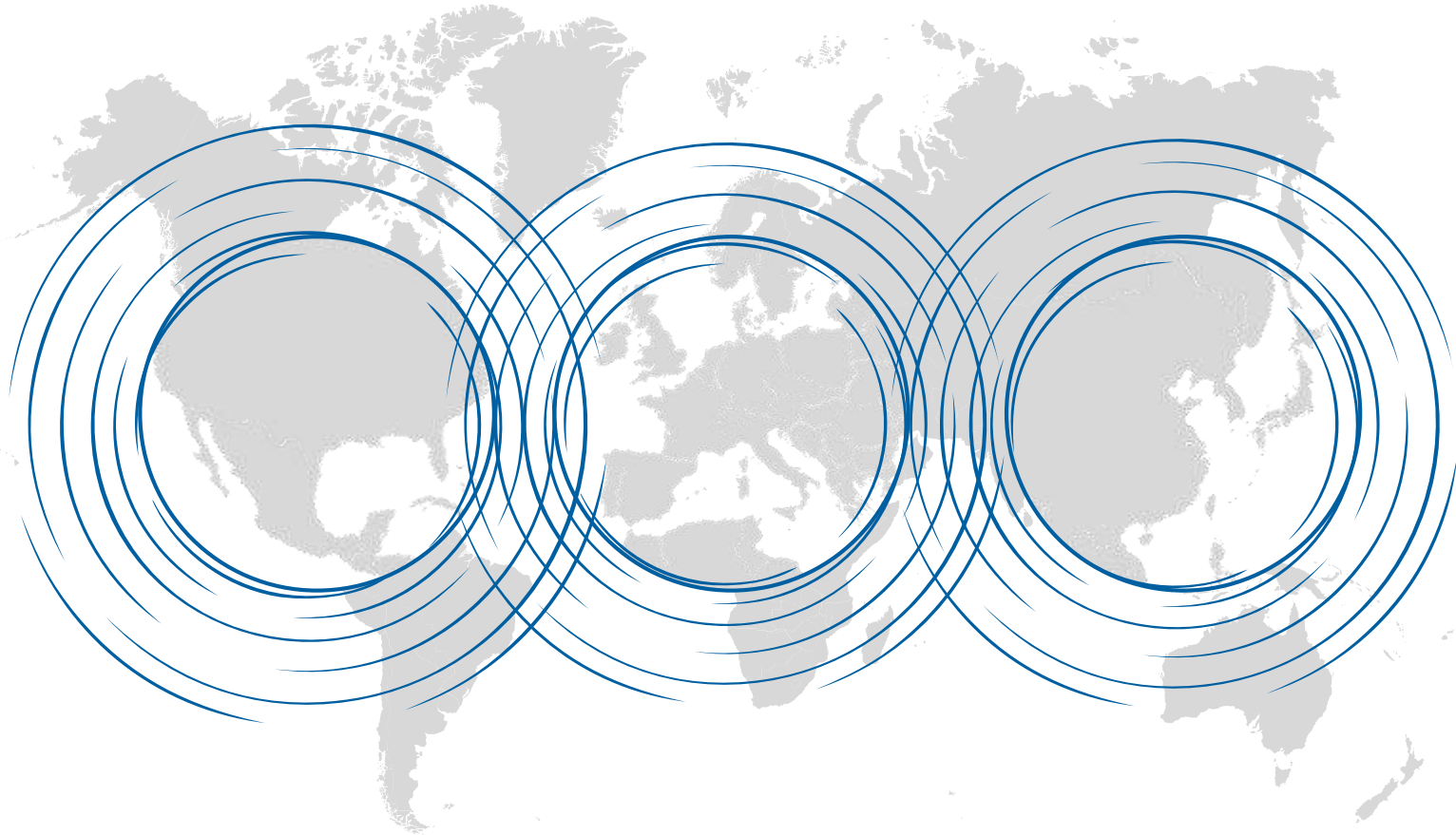


3,5 Mt d'hydrogène utilisées pour la **chaleur de haute qualité** dans les premiers projets de grande envergure



50 millions de foyers reliés à un réseau mélangeant en toute sécurité l'hydrogène et le gaz naturel

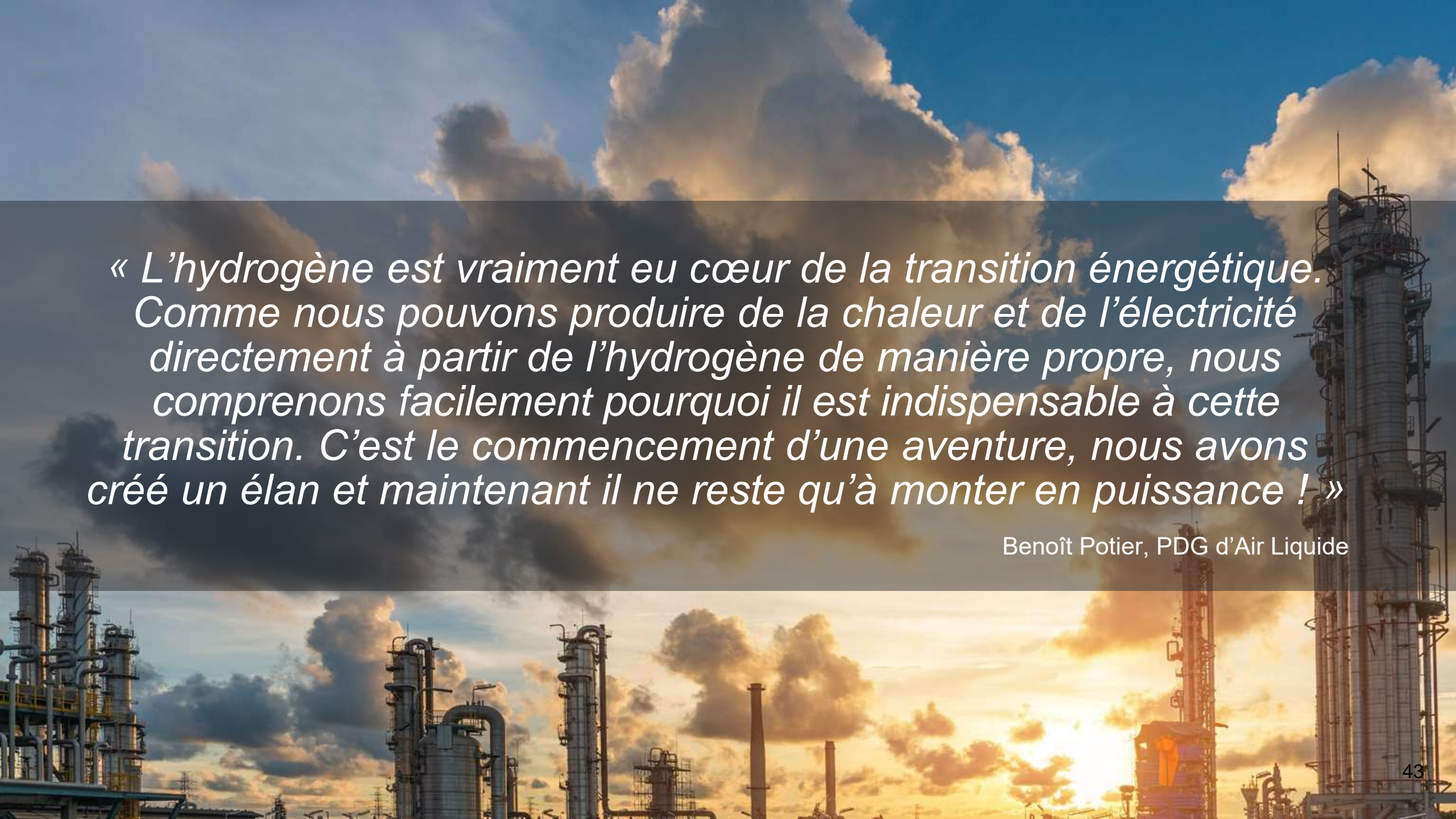
Perspectives



Les précurseurs
démontrent sa
durabilité

**Encourager la montée en
puissance :**

- > Mettre en œuvre des politiques incitatives
- > Assurer les déploiements
- > Coordonner les acteurs
- > Mettre en place les premiers projets d'envergure

A photograph of an industrial facility, likely an air separation plant, with several tall distillation columns and a complex network of pipes and ladders. The scene is set against a dramatic sky at sunset or sunrise, with the sun low on the horizon, casting a warm, golden glow over the clouds and the industrial structures. The sky transitions from a deep blue at the top to a bright orange and yellow near the horizon.

« L'hydrogène est vraiment au cœur de la transition énergétique. Comme nous pouvons produire de la chaleur et de l'électricité directement à partir de l'hydrogène de manière propre, nous comprenons facilement pourquoi il est indispensable à cette transition. C'est le commencement d'une aventure, nous avons créé un élan et maintenant il ne reste qu'à monter en puissance ! »

Benoît Potier, PDG d'Air Liquide