

Sortir des énergies fossiles  
grâce à l'hydrogène. A  
quelle échéance ? A quelles  
conditions ?

Une histoire en 2 temps



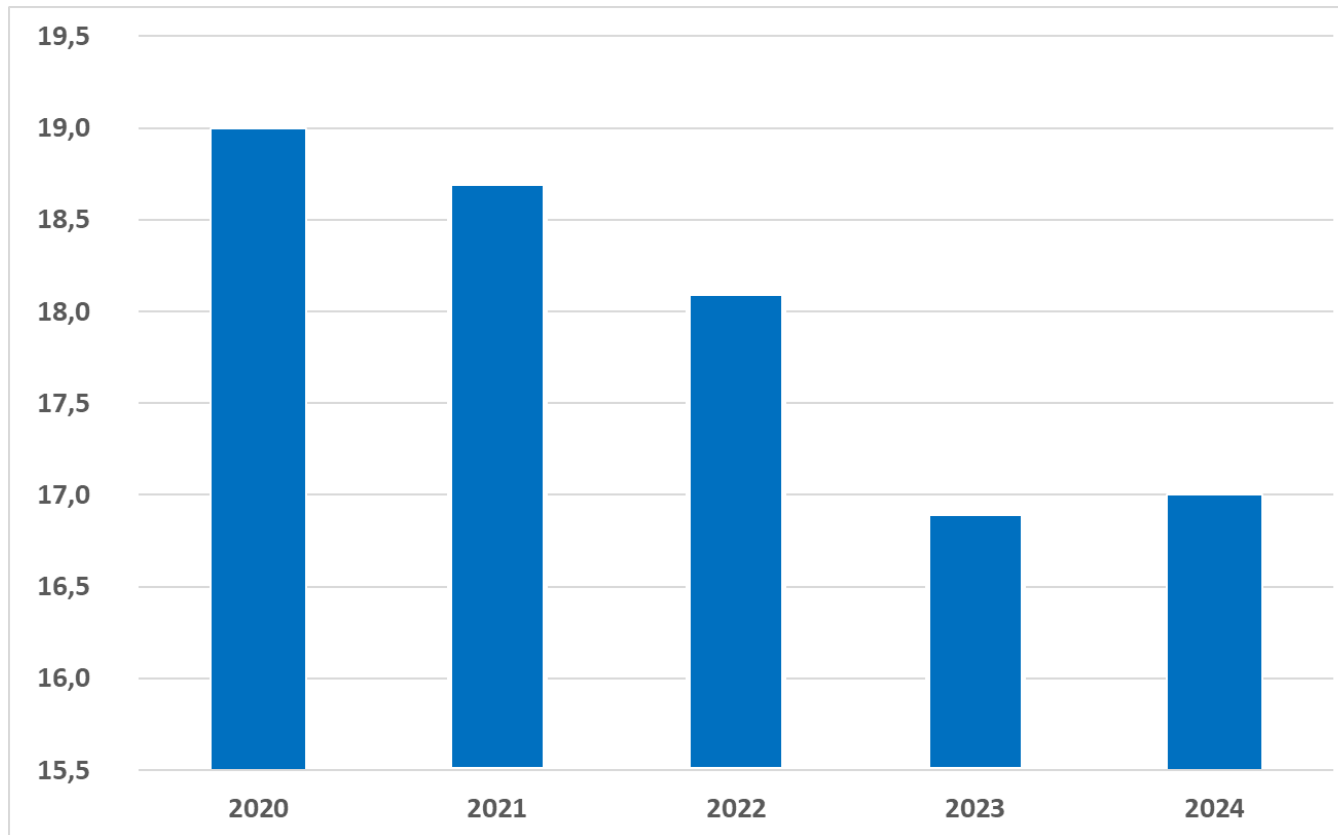
Ce ne sont pas les chutes du Niagara



# Réchauffement climatique : l'effondrement de l'Antarctique ?

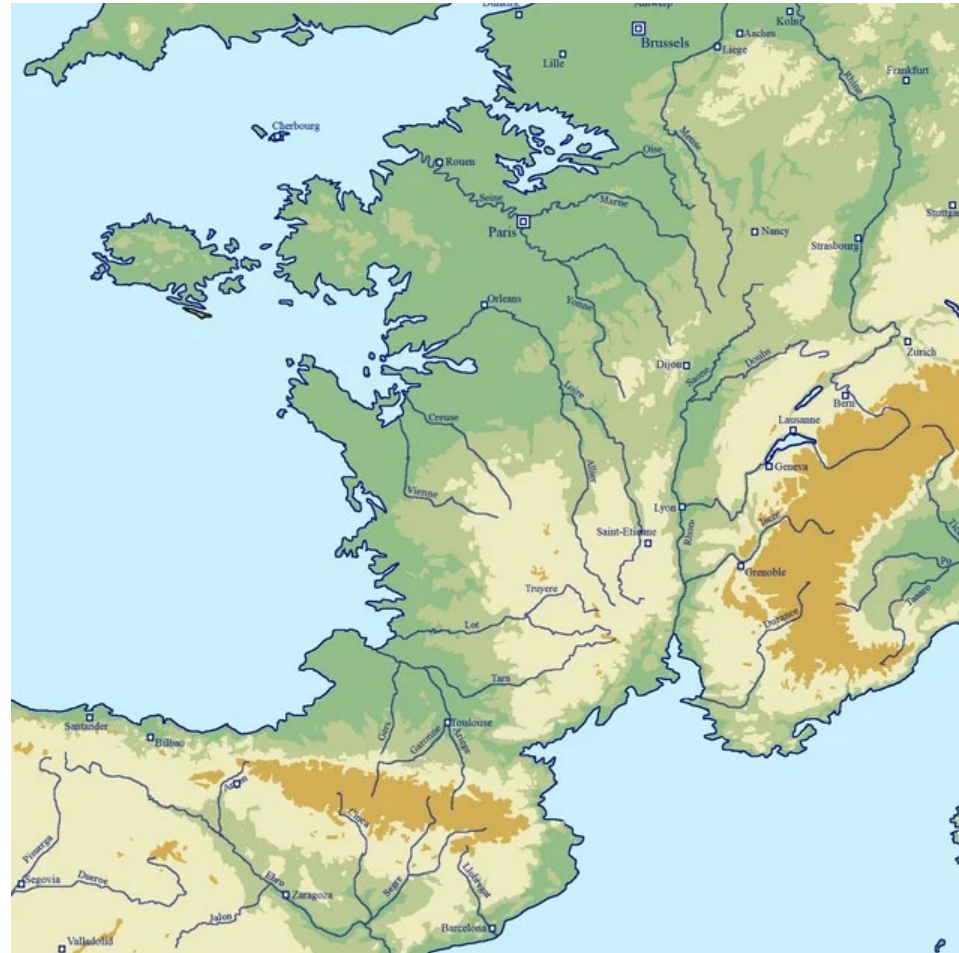
Etendue maximale de la banquise dans l'Antarctique

Millions de km<sup>2</sup>





## Bientôt une nouvelle carte de France ?



## **1. Le temps du solaire**

## **2. Le temps de l'hydrogène**

## Le temps du solaire : une expérience personnelle

2008 : Premier parc solaire  
en France  
(Vinon-sur-Verdon, 4,5 MW)



2011 : Prix record pour un projet  
solaire en Inde (85 €/MWh)



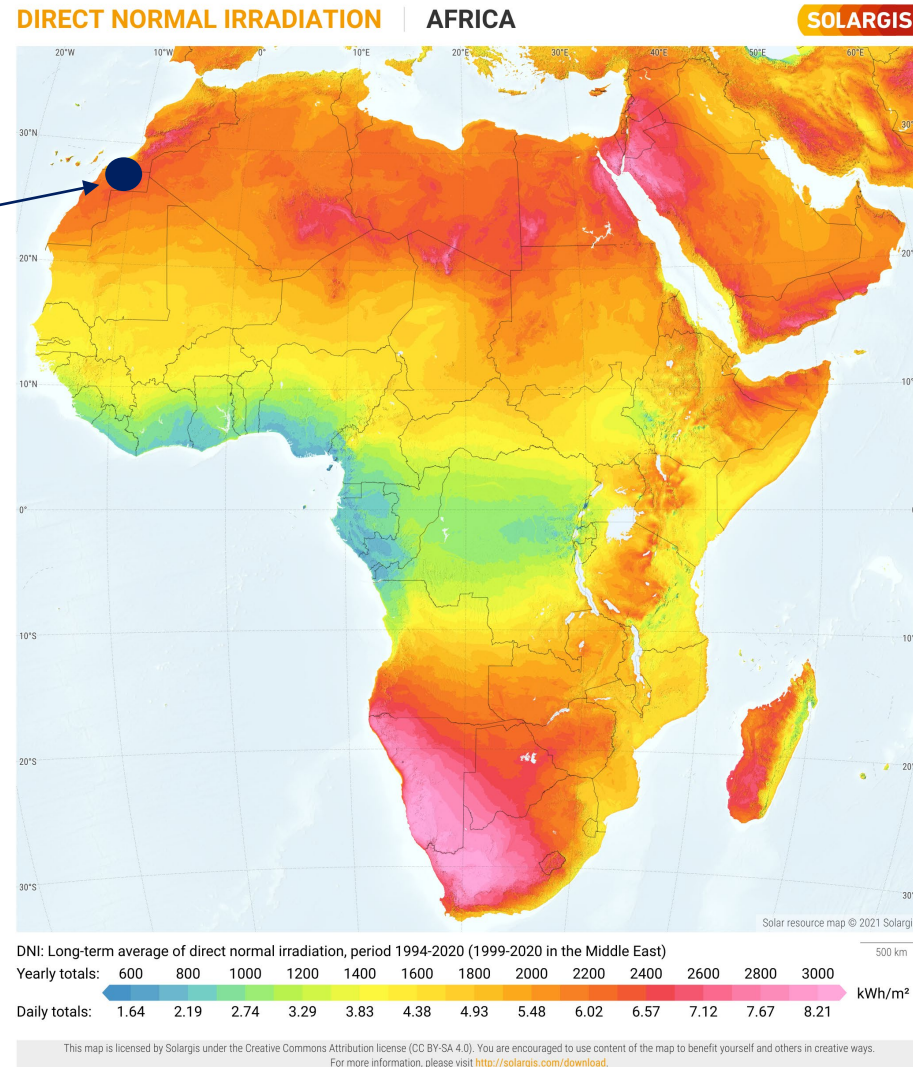
2013 : Premier parc solaire  
marchand au monde  
(Chili)



2017 : Premier parc solaire  
sous le seuil de 20 €/MWh  
(Mexique, 600 MW)

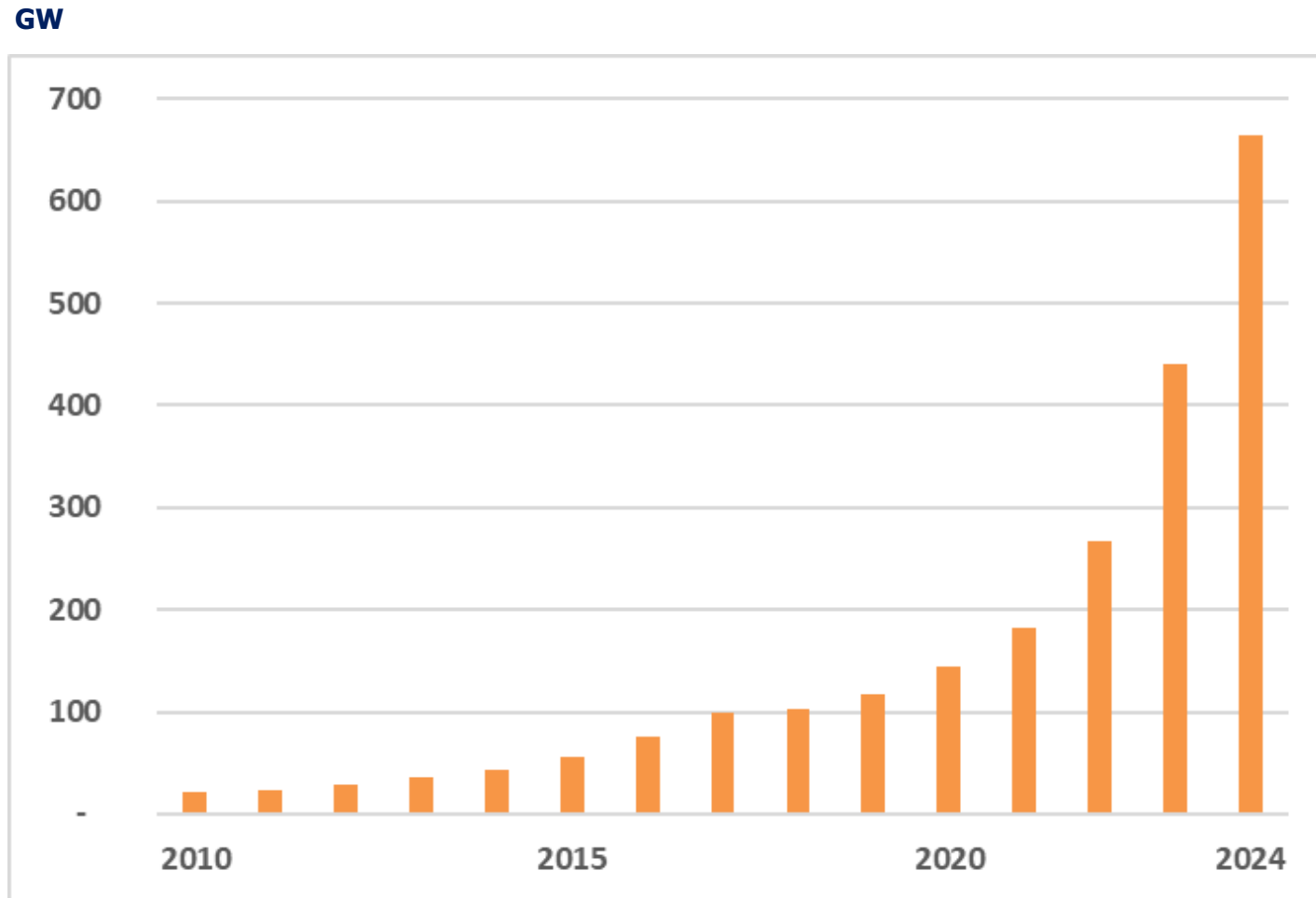


# Une ressource infinie : 1 000 fois la consommation mondiale d'énergie



- 52 000 km<sup>2</sup> = 100% de l'énergie finale consommée en Europe et en Afrique
- 15,6 Mt de silicium = 0,000000000000004% de la ressource planétaire

# Nouvelles capacités photovoltaïques : une exponentielle parfaite depuis plus de 50 ans et près de 2 GW installés par jour en 2024

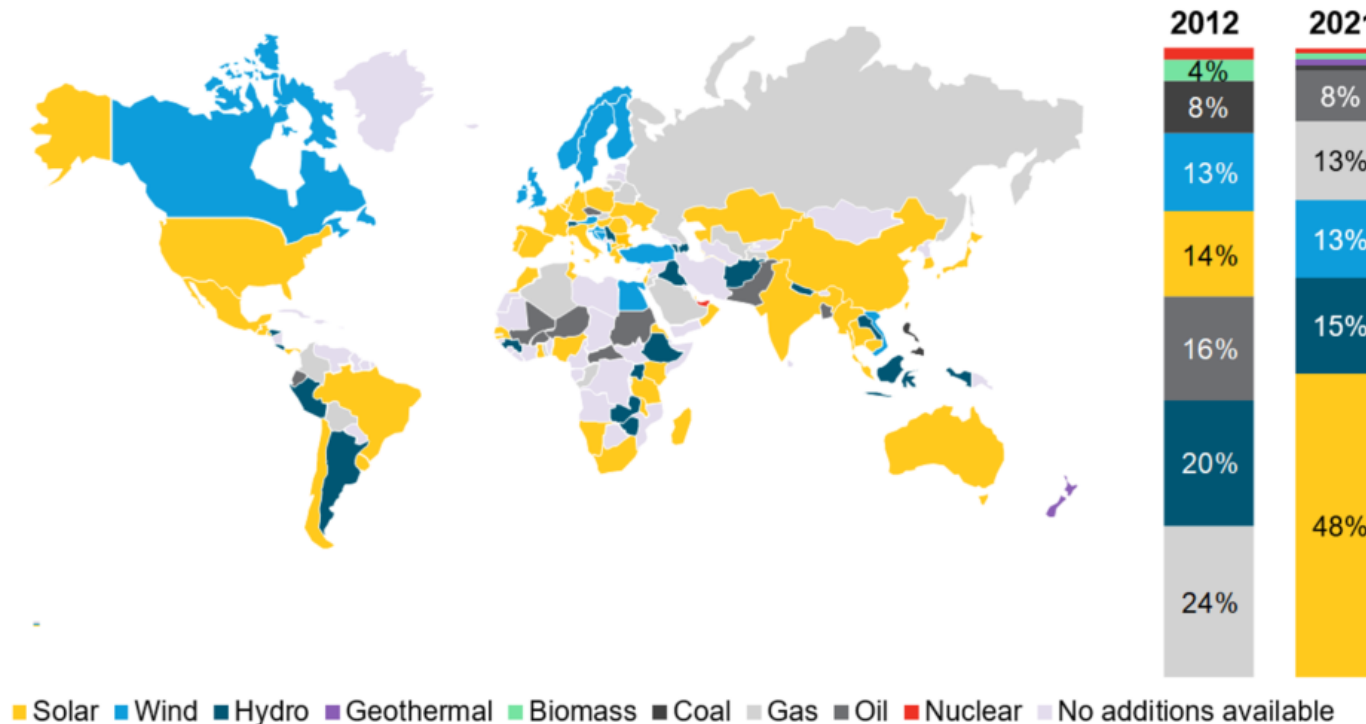


Source: BNEF



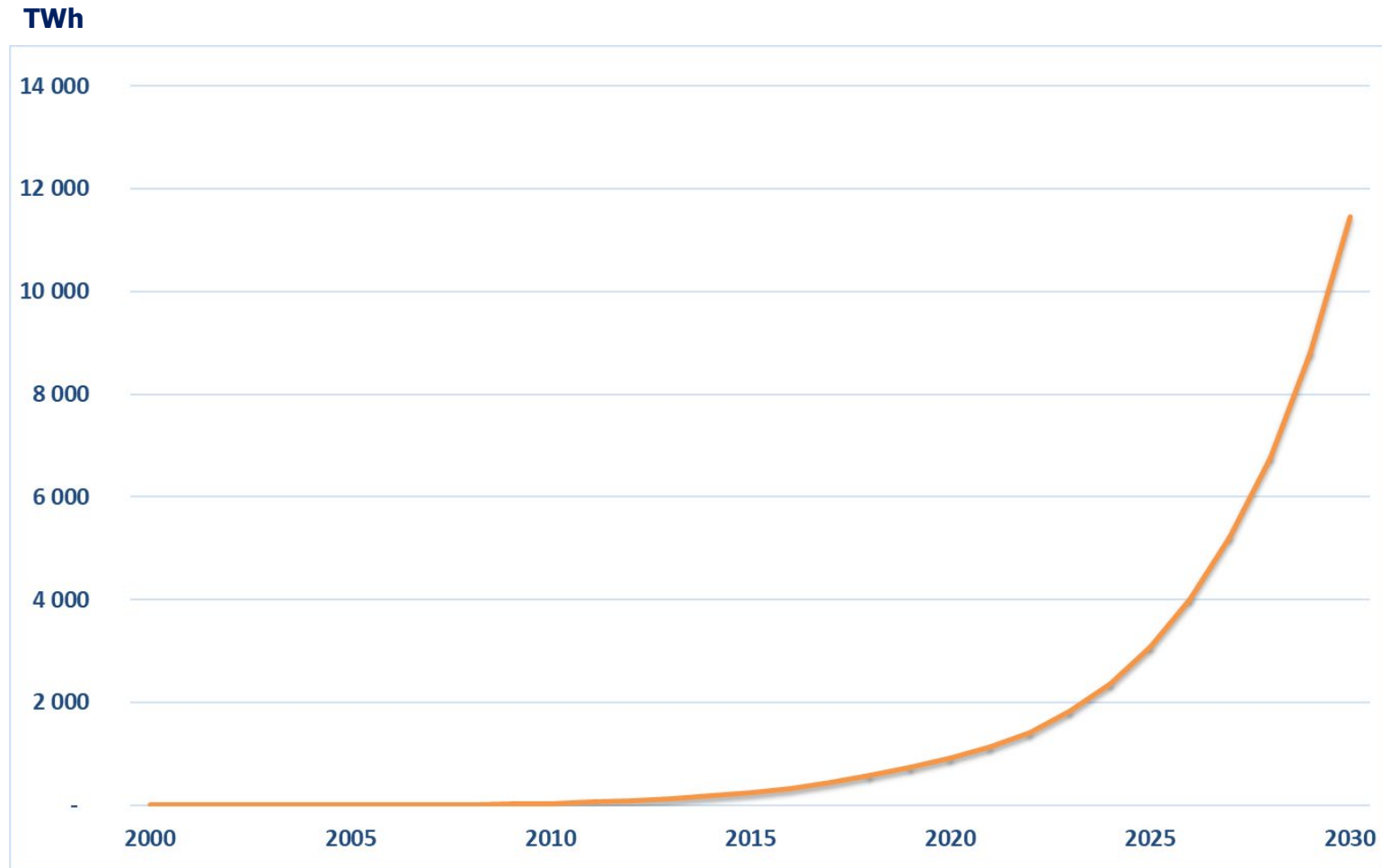
# Déjà la première source d'énergie électrique dans le monde par les nouvelles capacités

Figure 1: Most popular new power-generating technology installed, 2021

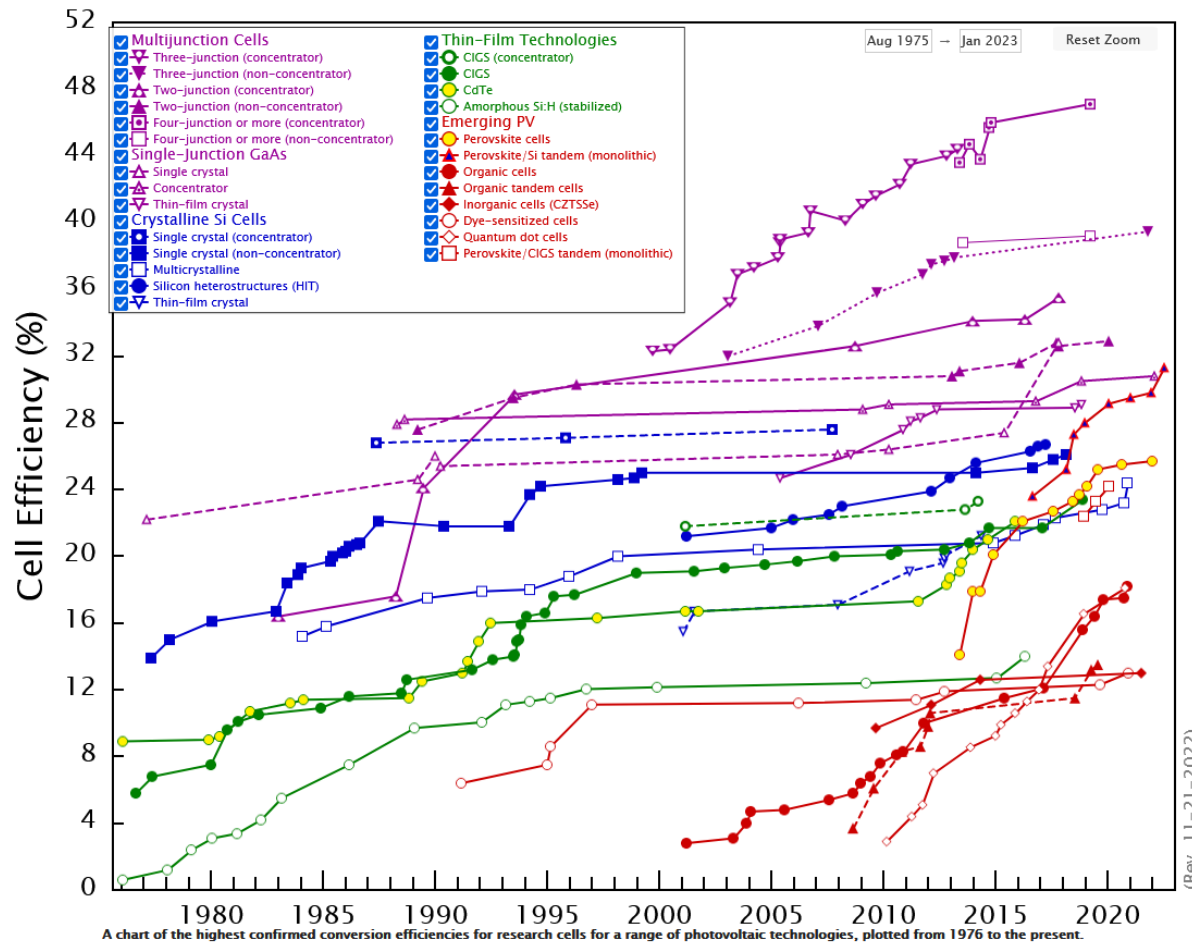


Source: BloombergNEF. Note: Map colored by which technology was most installed in 2021 alone. Depicts the percentage of nations that installed the most MW of each technology. It is based on country-level data for 136 countries but excludes countries that have not recorded any capacity additions. Solar includes small-scale PV.

Un tiers de l'électricité produite dans le monde en 2030 (équivalent à 1 200 EPR) ?



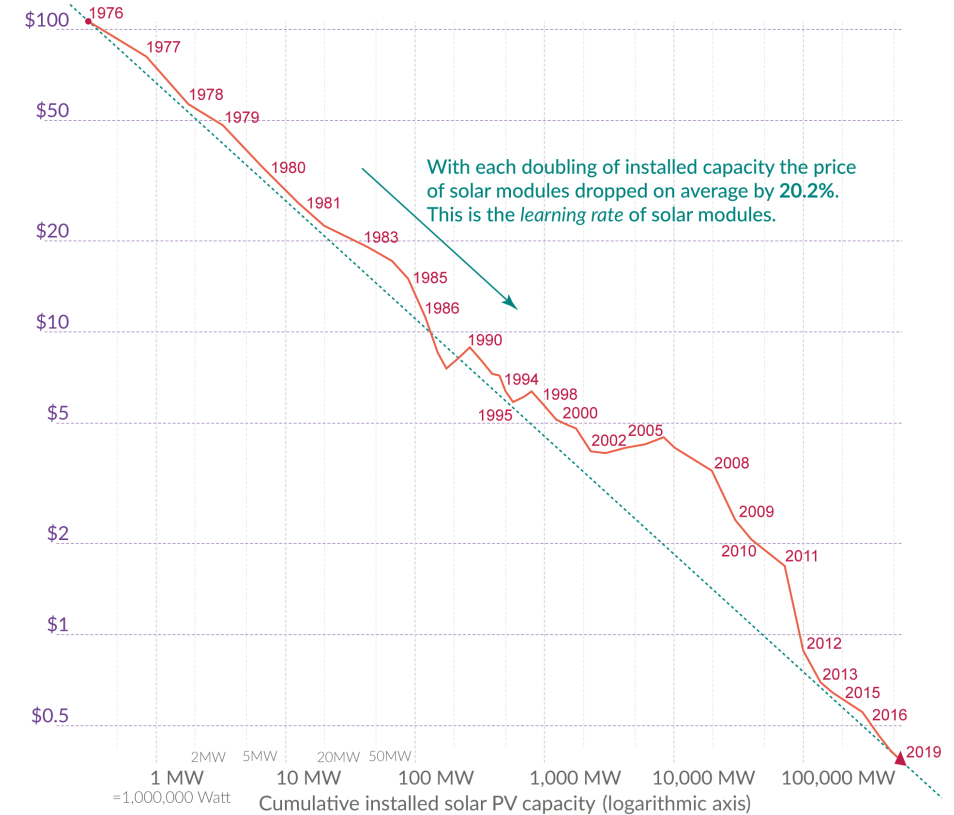
# La seule source d'électricité électronique - des technologies dont les rendements croissent sans interruption et sont structurellement déflationnistes (Loi de Swanson)



## The price of solar modules declined by 99.6% since 1976

Our World in Data

Price per Watt of solar photovoltaics (PV) modules (logarithmic axis)  
The prices are adjusted for inflation and presented in 2019 US-\$.

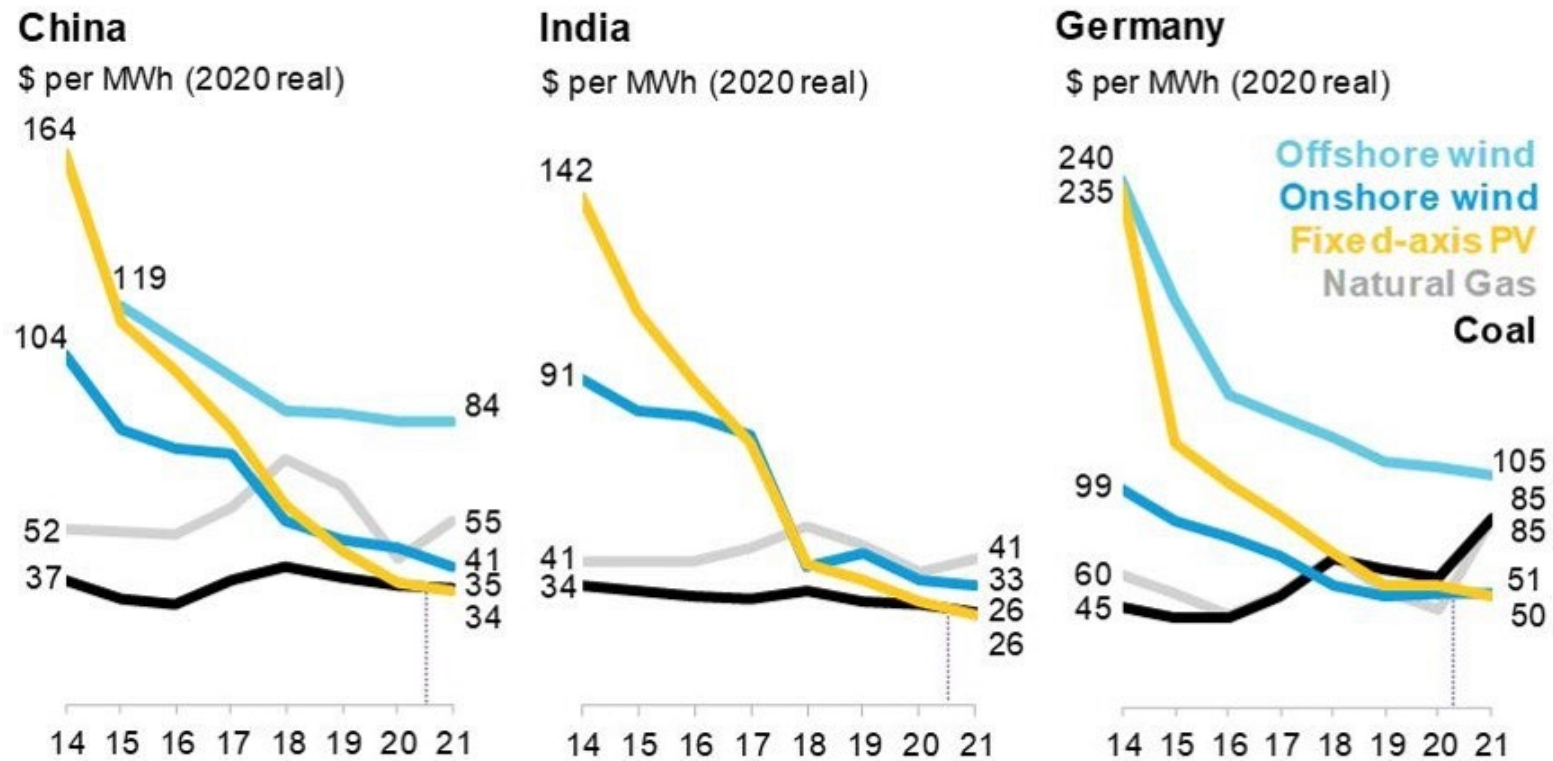


Data: Lafond et al. (2017) and IRENA Database; the reported learning rate is an average over several studies reported by de La Tour et al (2013) in Energy. The rate has remained very similar since then. OurWorldinData.org - Research and data to make progress against the world's largest problems.

Licensed under CC-BY by the author Max Roser

L'énergie électrique la moins chère, creusant un écart considérable avec les autres – en route vers 10 €/MWh, un niveau déjà atteint dans certains pays

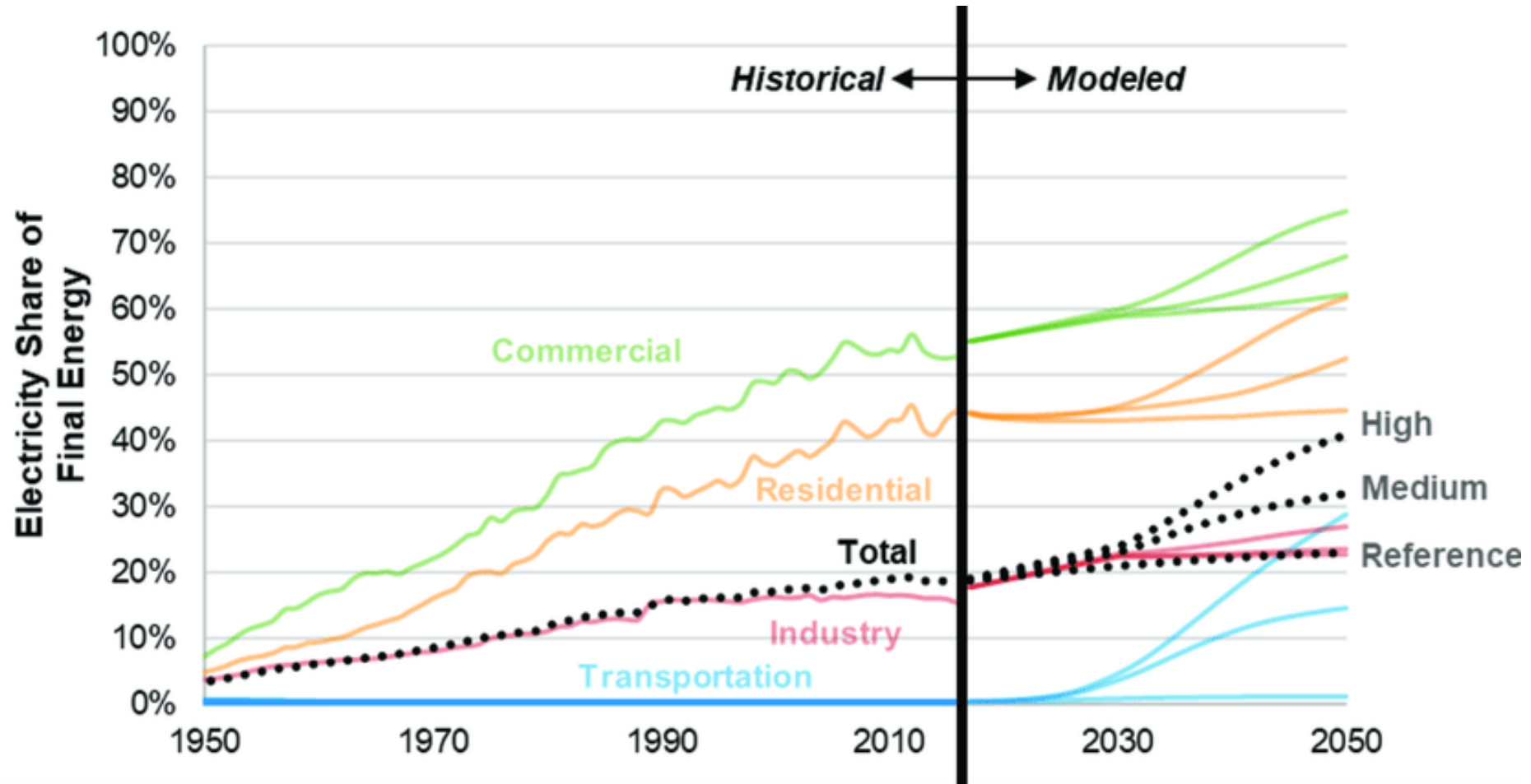
**Figure 1: Levelized cost of electricity for new solar and wind versus running costs of existing coal- and gas-fired power plants, 2014-2021**



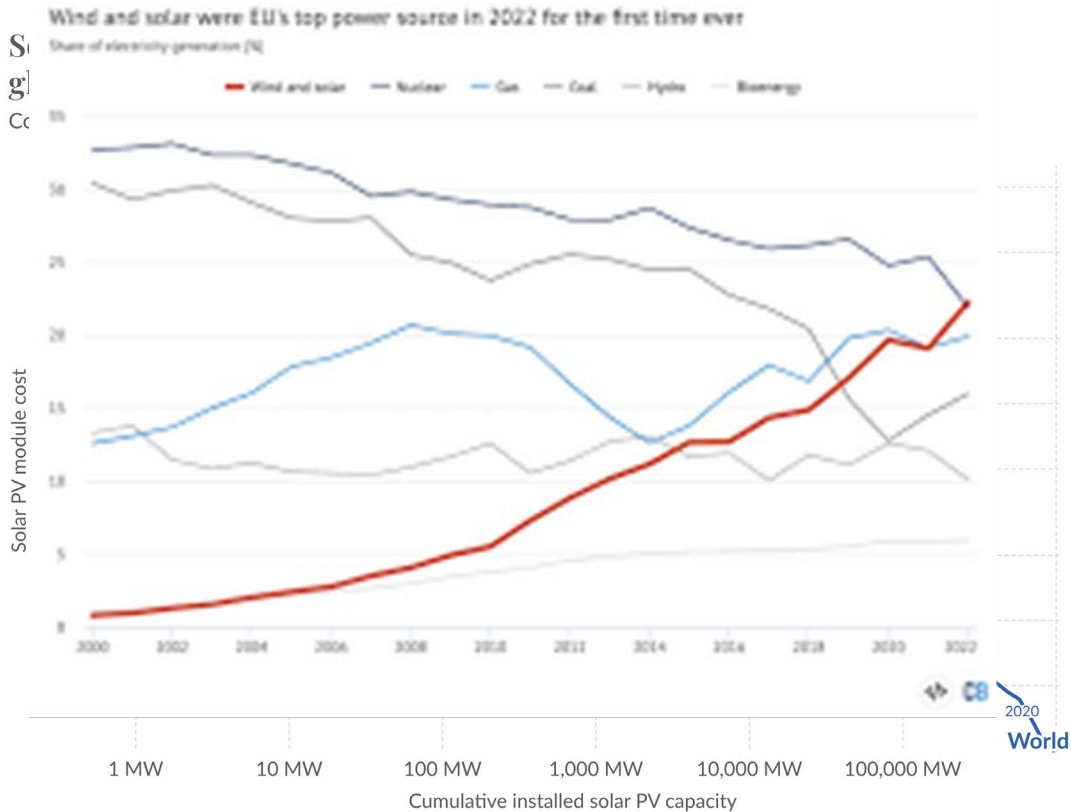
Source: BloombergNEF. Note: LCOE exclude subsidies or tax-credits and reflect utility-scale power plants.



Deux limites majeures pour l'électricité solaire : la part de l'électricité dans le mix énergétique pour remplacer les combustibles fossiles... et la variabilité de sa ressource



# La variabilité de l'électricité solaire (et éolienne) déstabilise déjà les marchés et systèmes électriques en Europe



Data source: IRENA (2023); Nemet (2009); Farmer and Lafond (2016)

CC BY

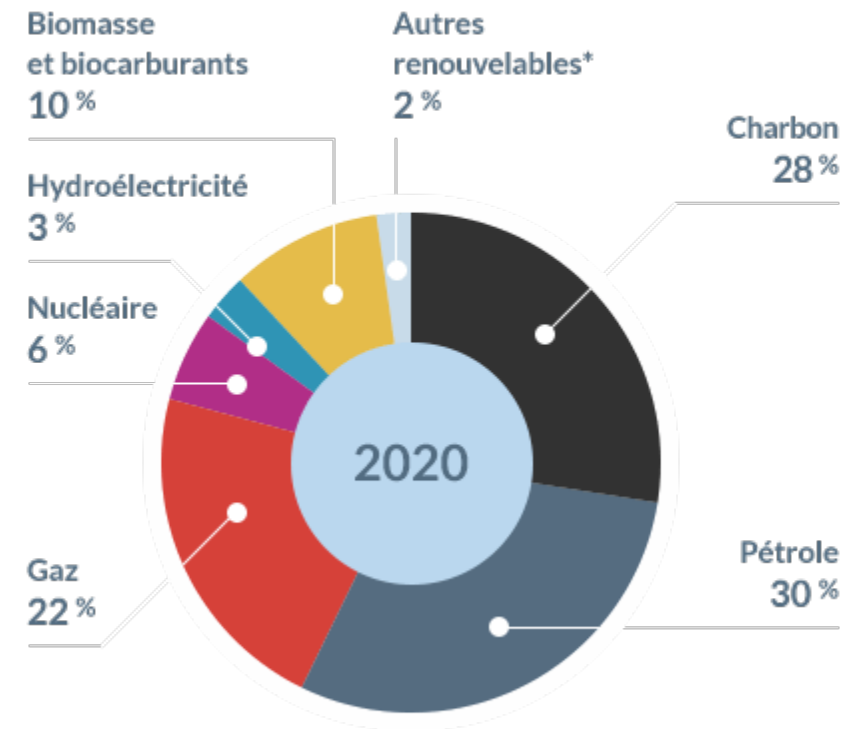
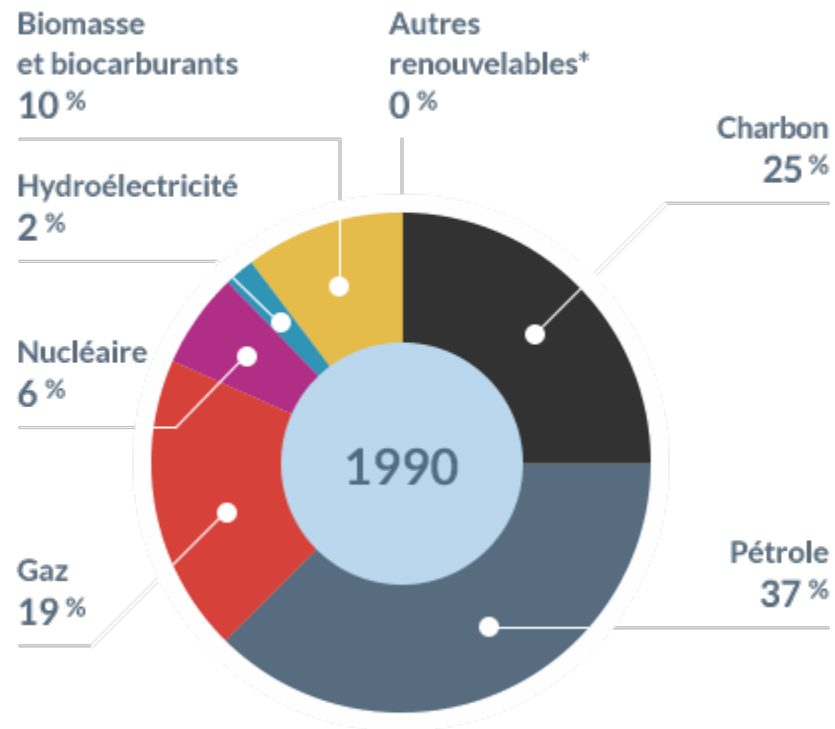
- Capacité photovoltaïque installée en Europe fin 2024 (333 GW) > 100% de la demande d'électricité en pointe
- Nombre de jours où les prix de gros de l'électricité sont nuls ou négatifs durant les heures de production solaire (plaque nord-ouest Europe) : 25 (2022), 62 (2023), 98 (2024)

1. Le temps du solaire

**2. Le temps de l'hydrogène**

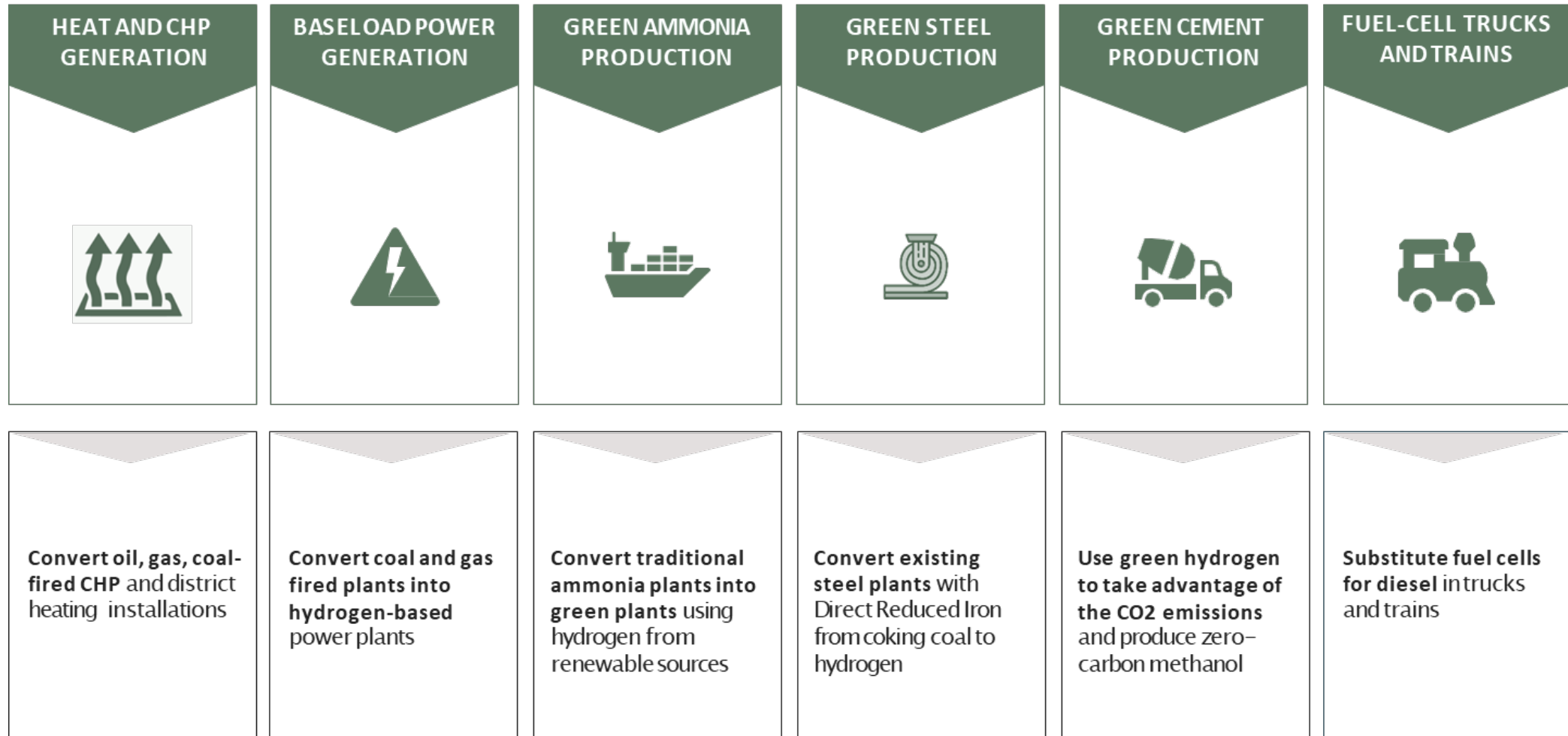
3. Le temps des nouveaux actifs financiers

Un enjeu existentiel : sortir des combustibles fossiles, dont la part dans le mix énergétique mondial est inchangée depuis un siècle, malgré 29 conférences climatiques

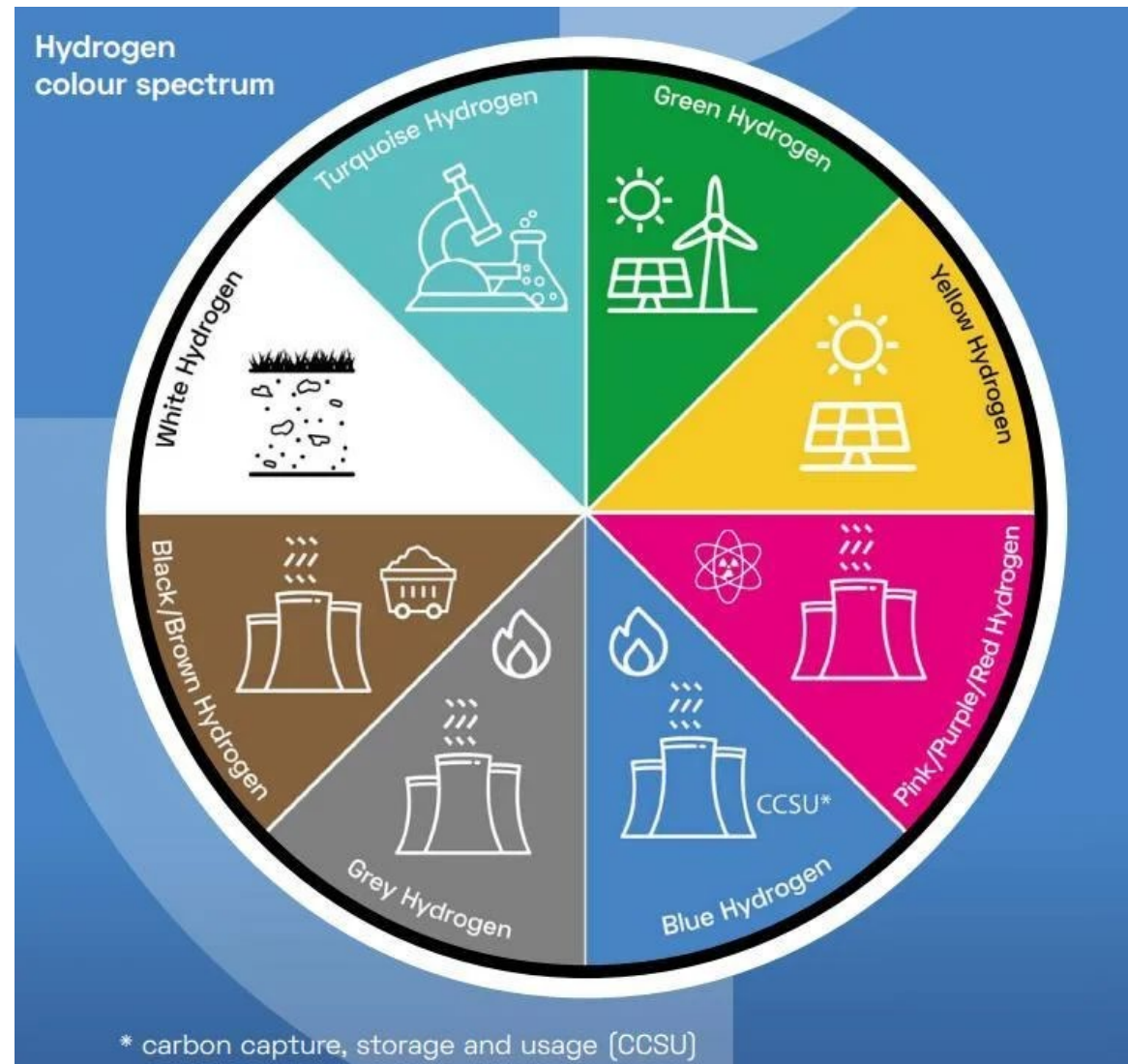




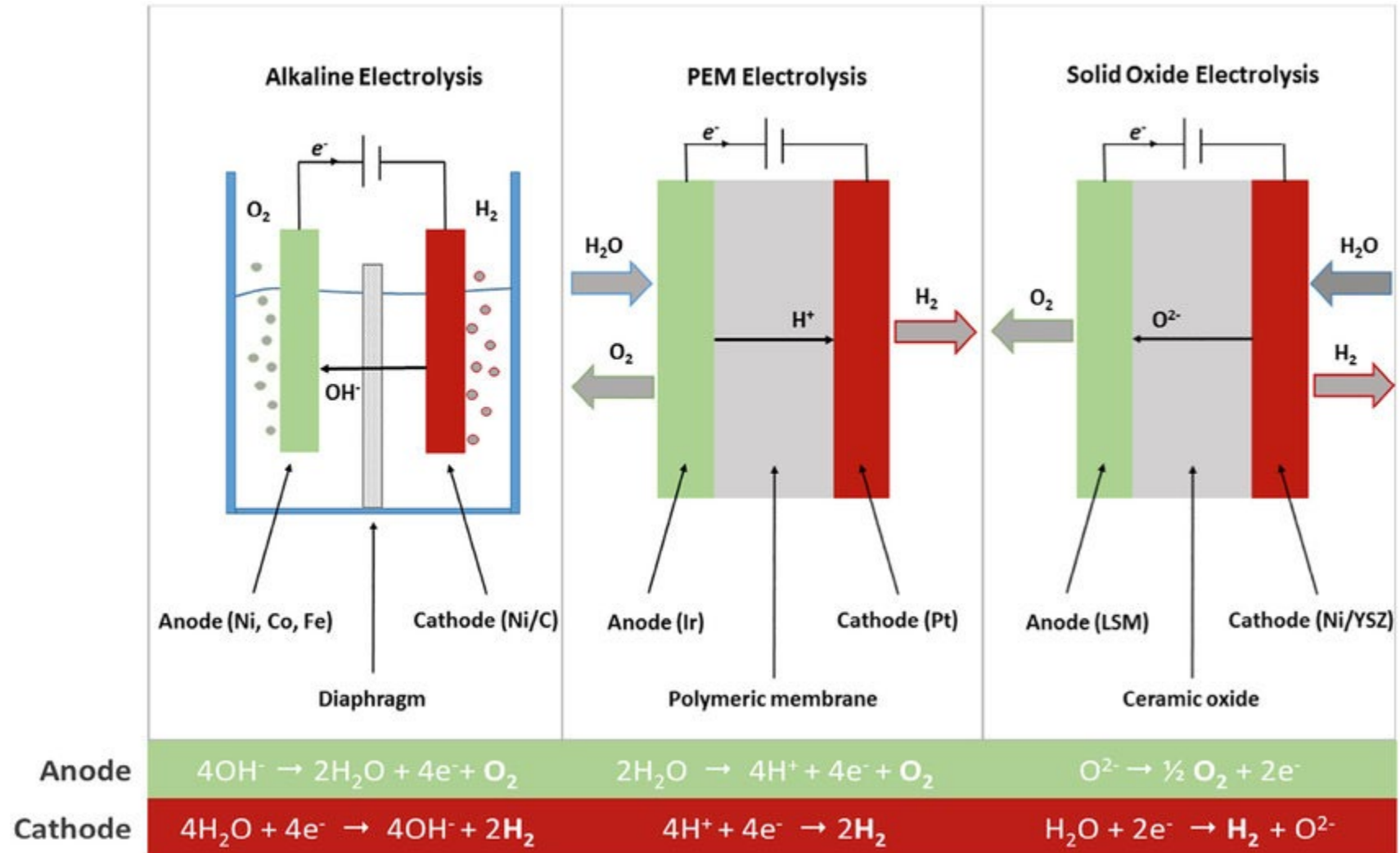
# L'hydrogène peut remplacer les combustibles fossiles dans tous les secteurs de l'économie



Et il y en a de toutes les couleurs !



### 3 principales technologies d'électrolyse : alcaline, PEM et SOEC



## Cinq idées reçues sur l'hydrogène

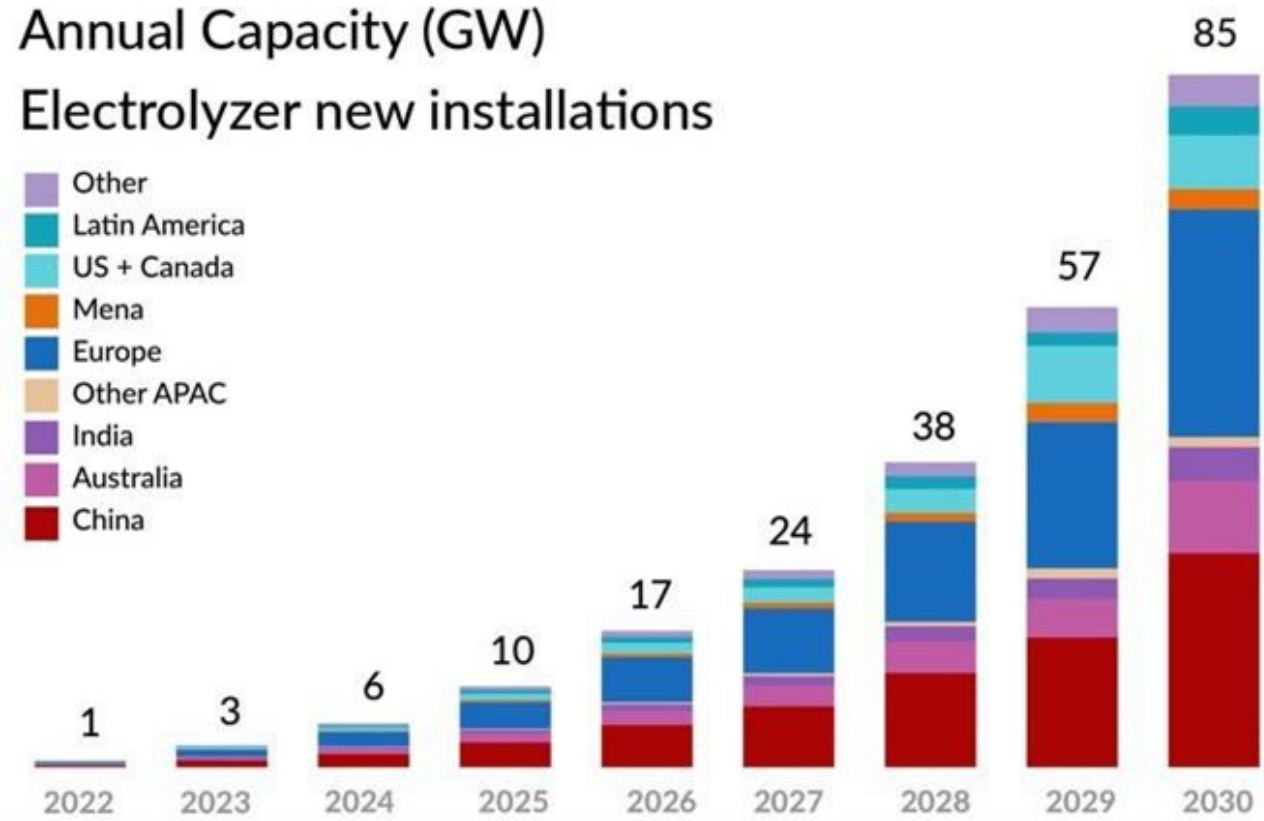
L'hydrogène, c'est nouveau et peu connu	<ul style="list-style-type: none"><li>• Marché mondial de 90 Mt (engrais et raffinage)</li><li>• Historique séculaire du gaz de ville</li></ul>
L'hydrogène, c'est dangereux	<ul style="list-style-type: none"><li>• Combustion rapide, moins explosif que le méthane</li><li>• 100 000+ véhicules dans le monde, sans problème particulier</li></ul>
L'hydrogène, c'est difficile et coûteux à transporter	<ul style="list-style-type: none"><li>• 10 000 km+ de pipelines dans le monde depuis plusieurs décennies</li><li>• Transport par bateau onéreux, mais pipeline parfaitement compétitif</li></ul>
L'hydrogène, c'est trop cher	<ul style="list-style-type: none"><li>• L'hydrogène solaire importé de la région MENA peut être compétitif avec les combustibles fossiles après 2030</li></ul>
L'hydrogène a un mauvais rendement énergétique	<ul style="list-style-type: none"><li>• L'hydrogène solaire a un rendement à l'hectare 80 fois meilleur que les biocarburants</li><li>• L'hydrogène solaire offre les avantages de l'électricité avec un avantage-clé : sa capacité de stockage (en TWh dans des cavités salines contre des MWh dans des batteries), sa disponibilité 24/7 et un cycle de construction bien plus rapide que le nucléaire ou l'hydroélectricité</li></ul>



## Parlons rendement (mais aussi coût et disponibilité)

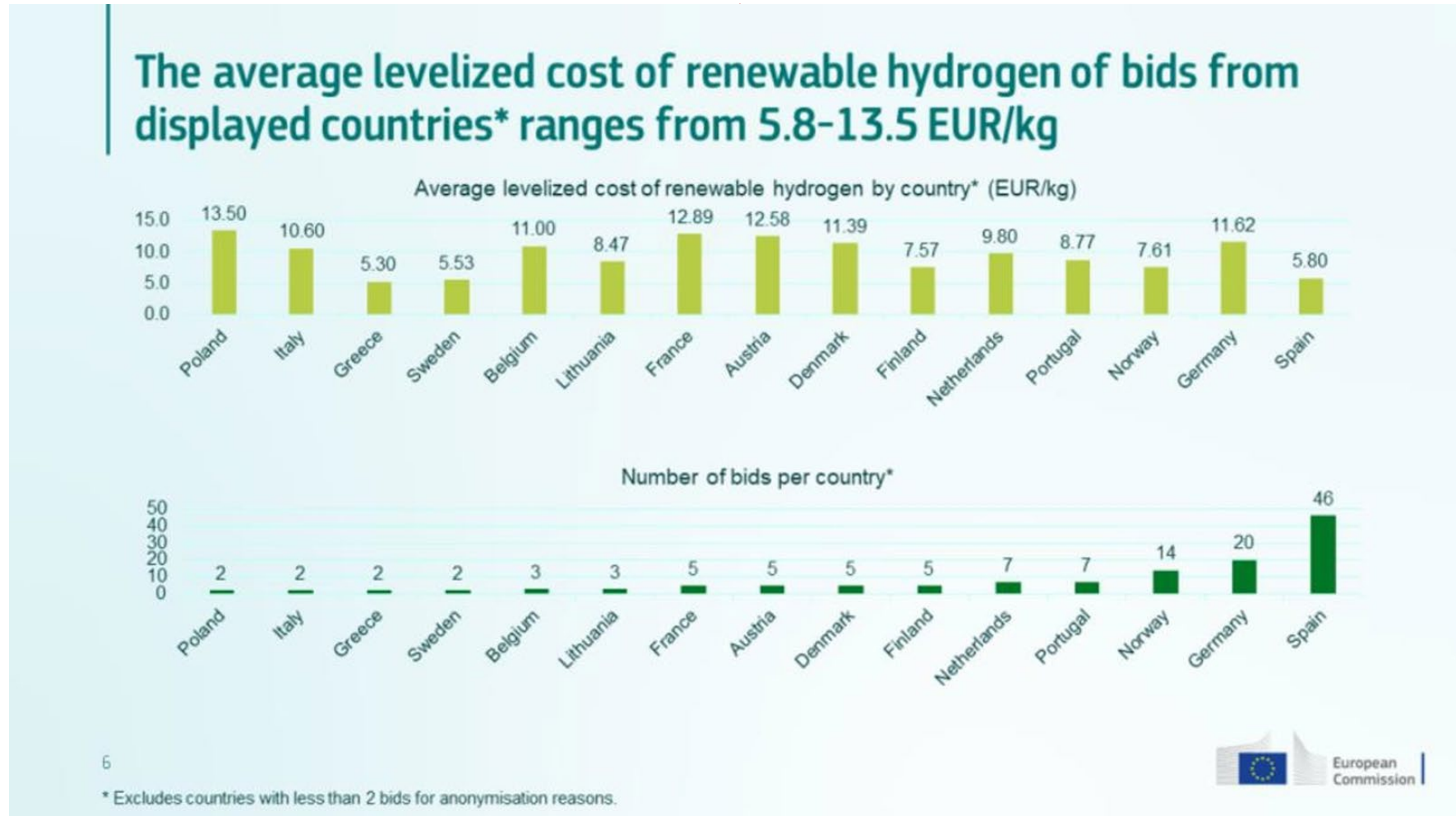
	Surface (ha)	Production annuelle	Km parcourus	Coût aux 100 km (hors réseau et taxes)
Biocarburants (colza ou tournesol)	1	3 000 l	75 000	4,20 €
Electricité réseau France	na	2 200 MWh	14 600 000	1,35 €
Hydrogène électrolytique France	na	2 200 MWh	5 800 000	9,90 €
Hydrogène solaire importé (MENA)	1	2 200 MWh	5 800 000	1,90 €

La courbe de croissance de l'industrie des électrolyseurs suit l'exponentielle du photovoltaïque - et la baisse de ses coûts, malgré des défis de montée en puissance (EPC)

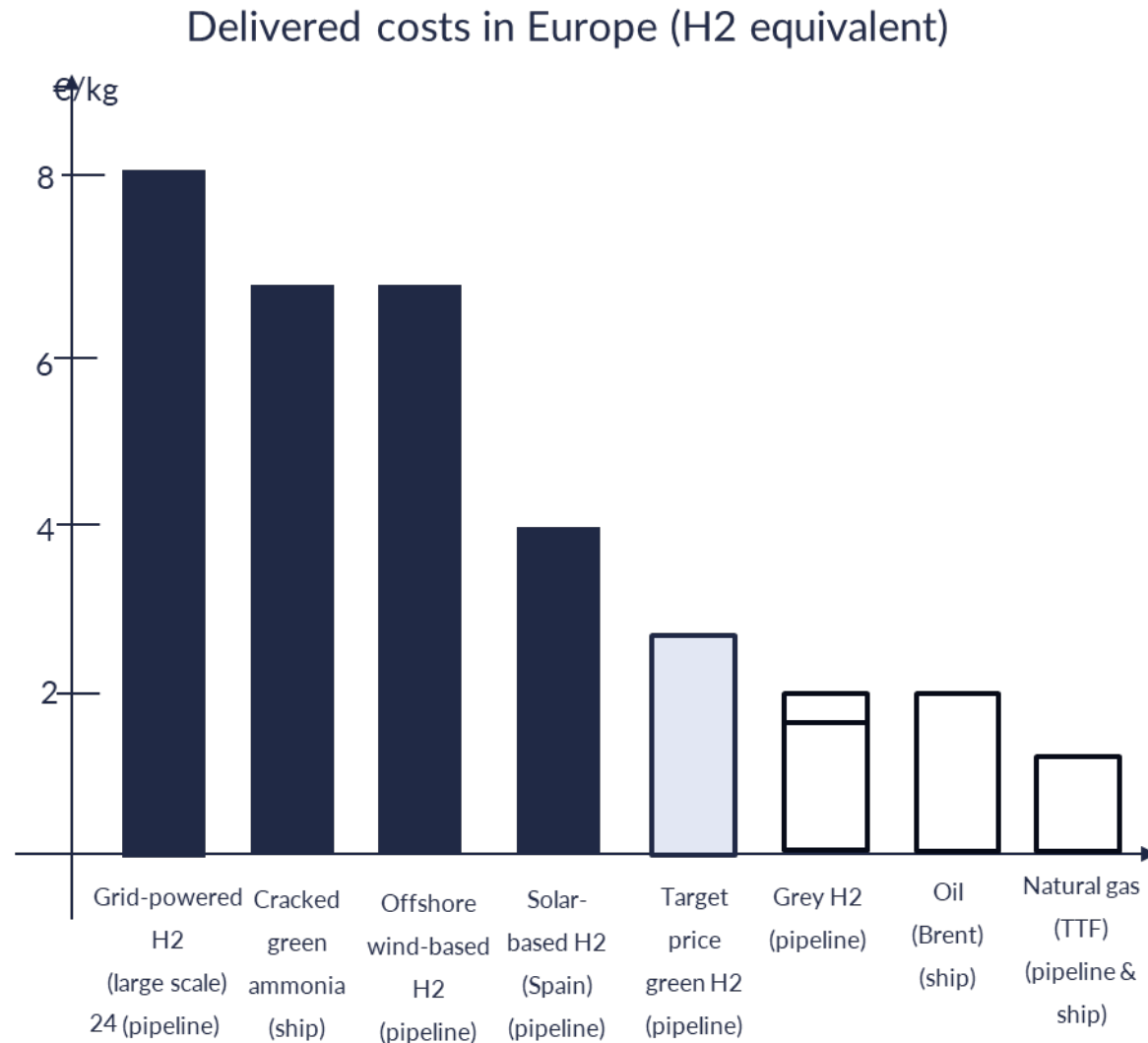


Source: BNEF October 2022 and BNEF August 2023

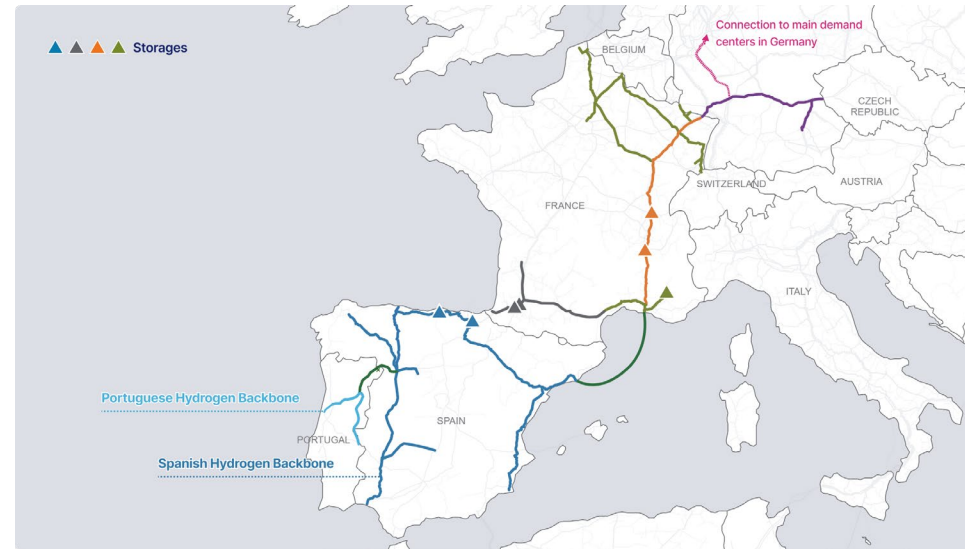
Problème : l'hydrogène vert produit en Europe à petite échelle est 3 à 7 fois plus cher que le gaz naturel qu'il est censé remplacer



# Comment répondre à la question-clé de la compétitivité ? Faire levier sur les meilleures ressources solaires et éoliennes et bénéficier de l'effet d'échelle



Les corridors (pipelines) euro-méditerranéens (H2Med, SouthH2...), la seule solution d'infrastructure économiquement viable (5 fois moins cher que le transport par bateau)



Grâce à sa versatilité et sa compétitivité, le solaire (sous sa forme électrique et moléculaire) pourrait remplacer intégralement les combustibles fossiles à l'horizon 2040

