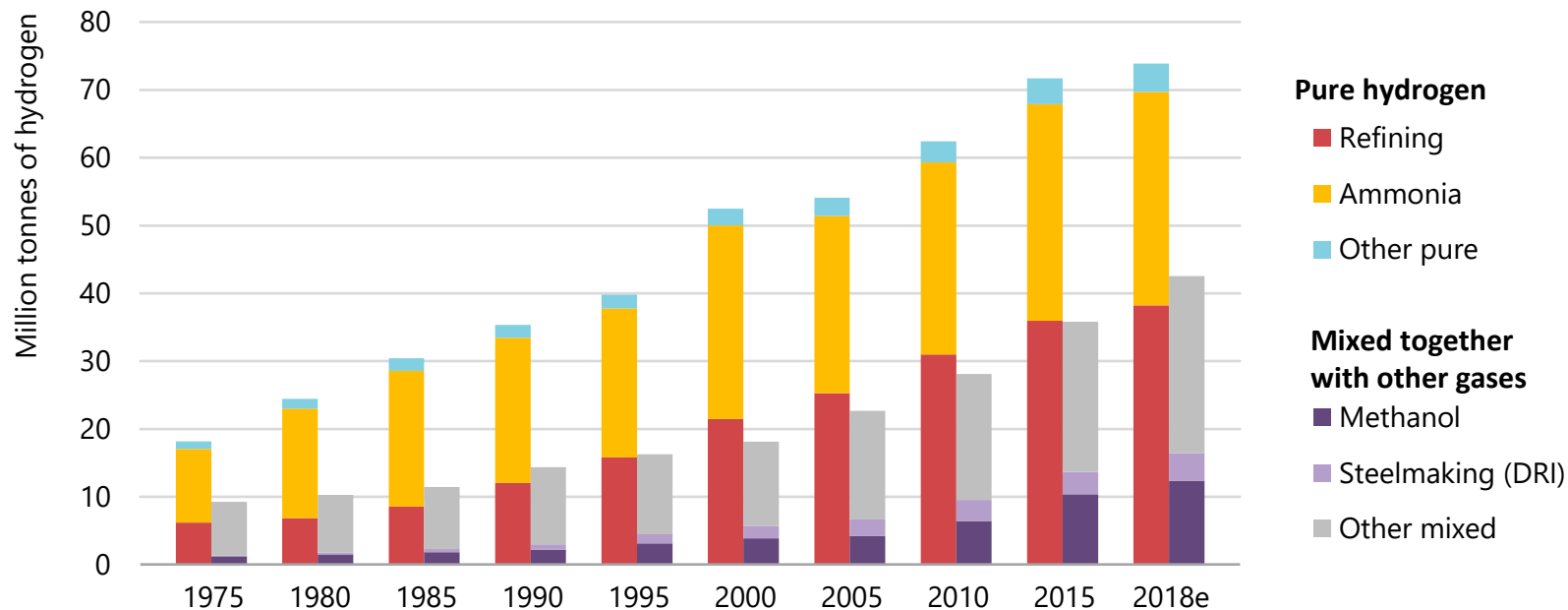


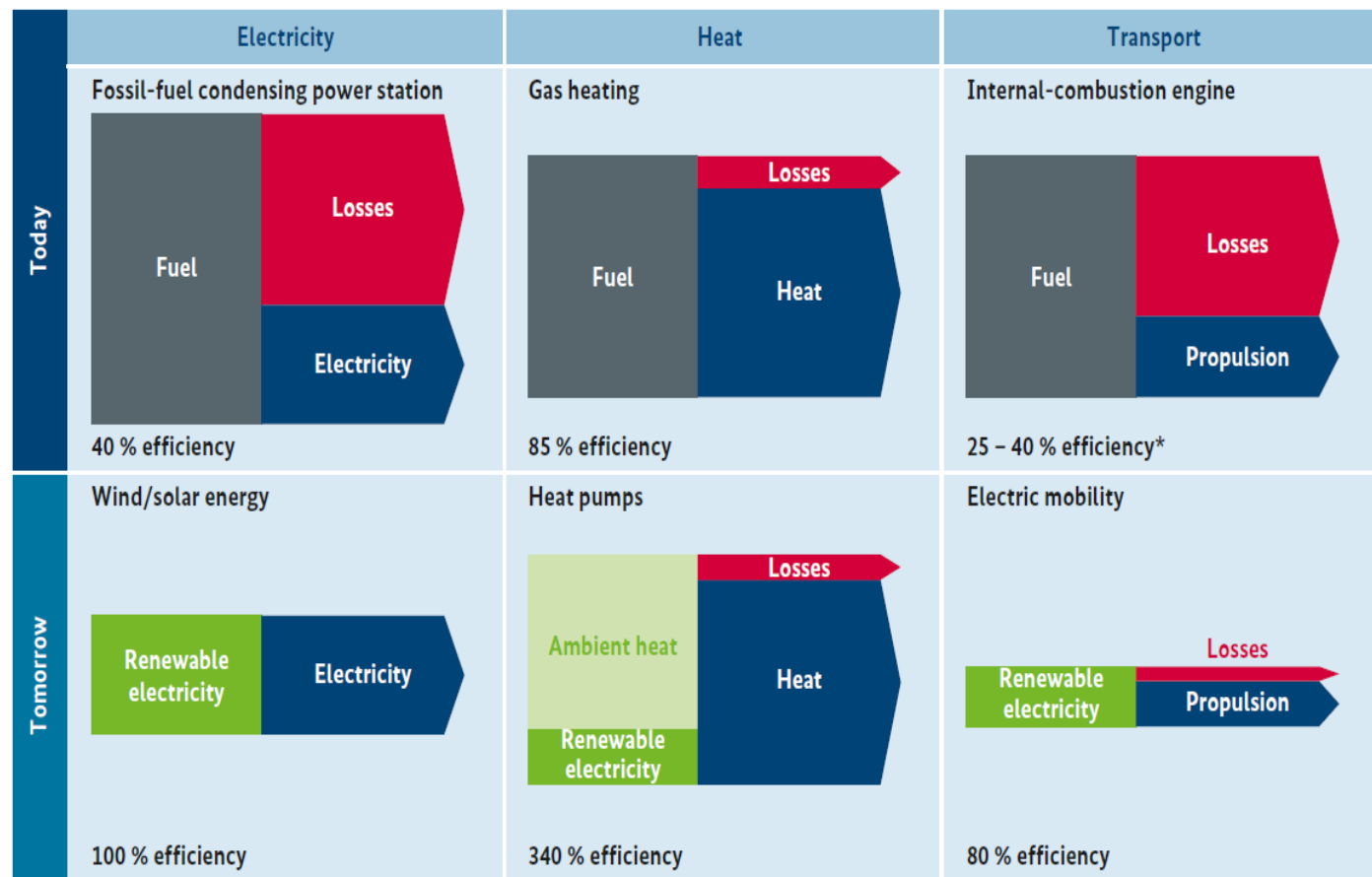
Les usages actuels de l'hydrogène



La demande mondiale d'hydrogène pur a augmenté régulièrement jusqu'à 70 Mt aujourd'hui.

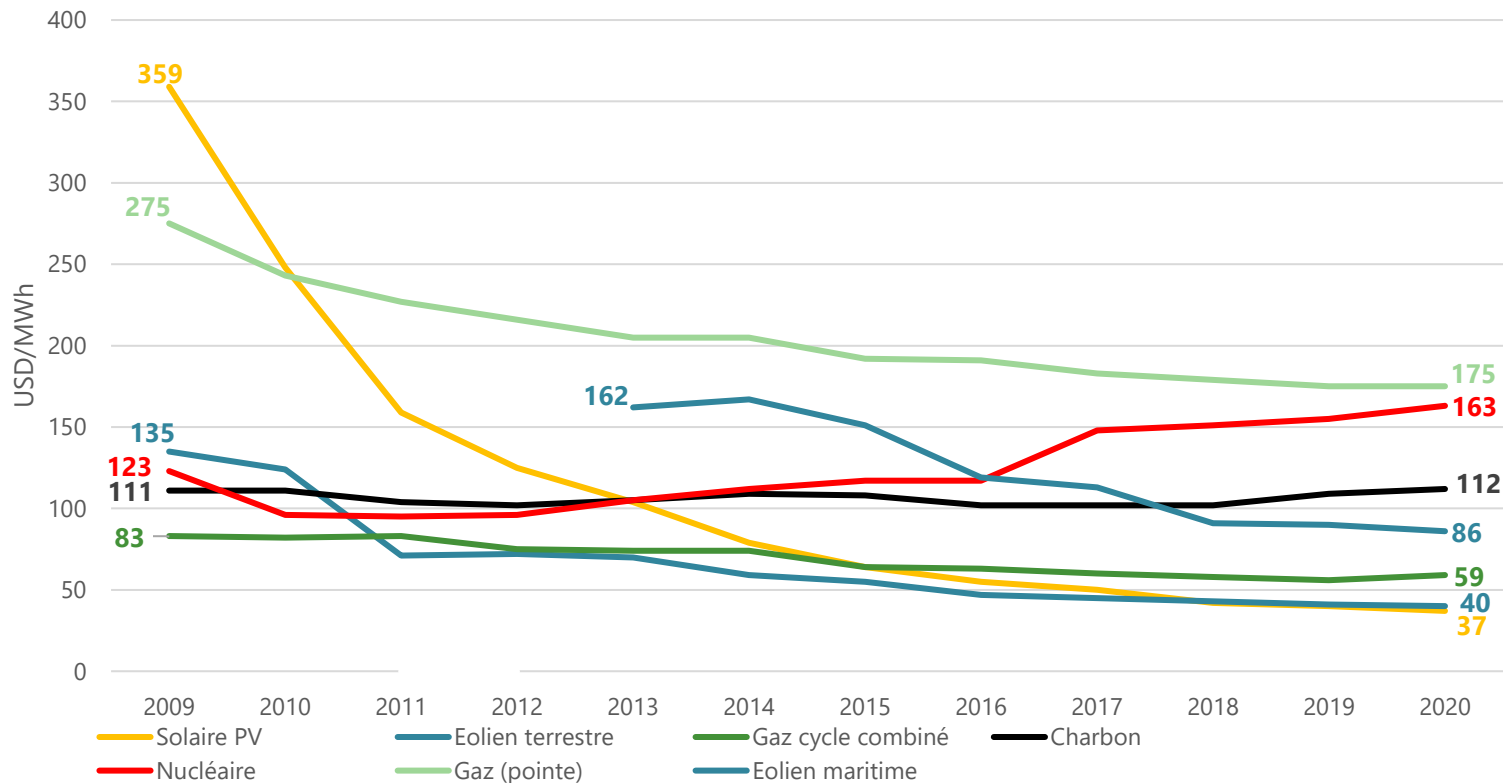
Plus de 40 Mt sont aussi produites en mélange avec d'autres gaz.

Sa production consomme 2% du charbon et 6% du gaz naturel et entraîne 820 Mt/an CO₂, 2,3% des émissions totales.



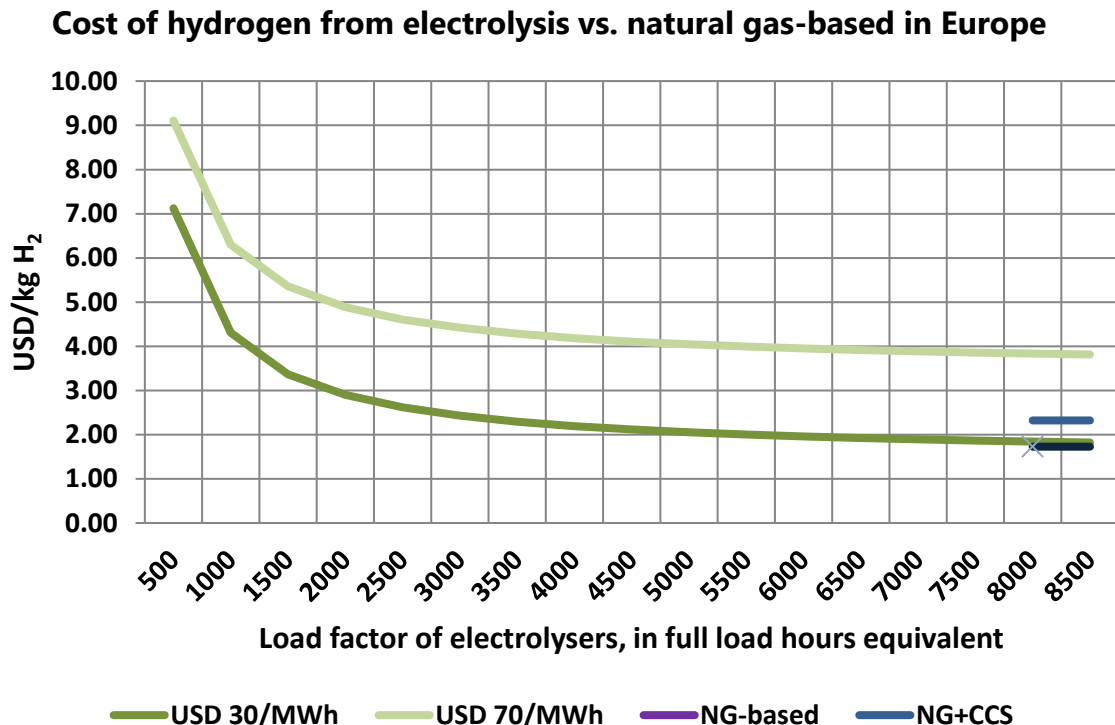
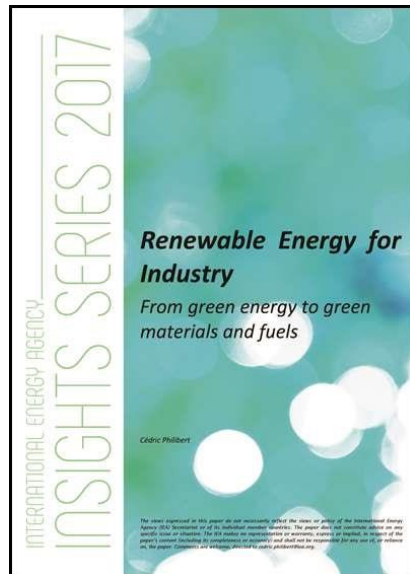
La baisse des coûts des renouvelables peut tout changer

Coûts de l'électricité (nouvelles installations), 2009-2020



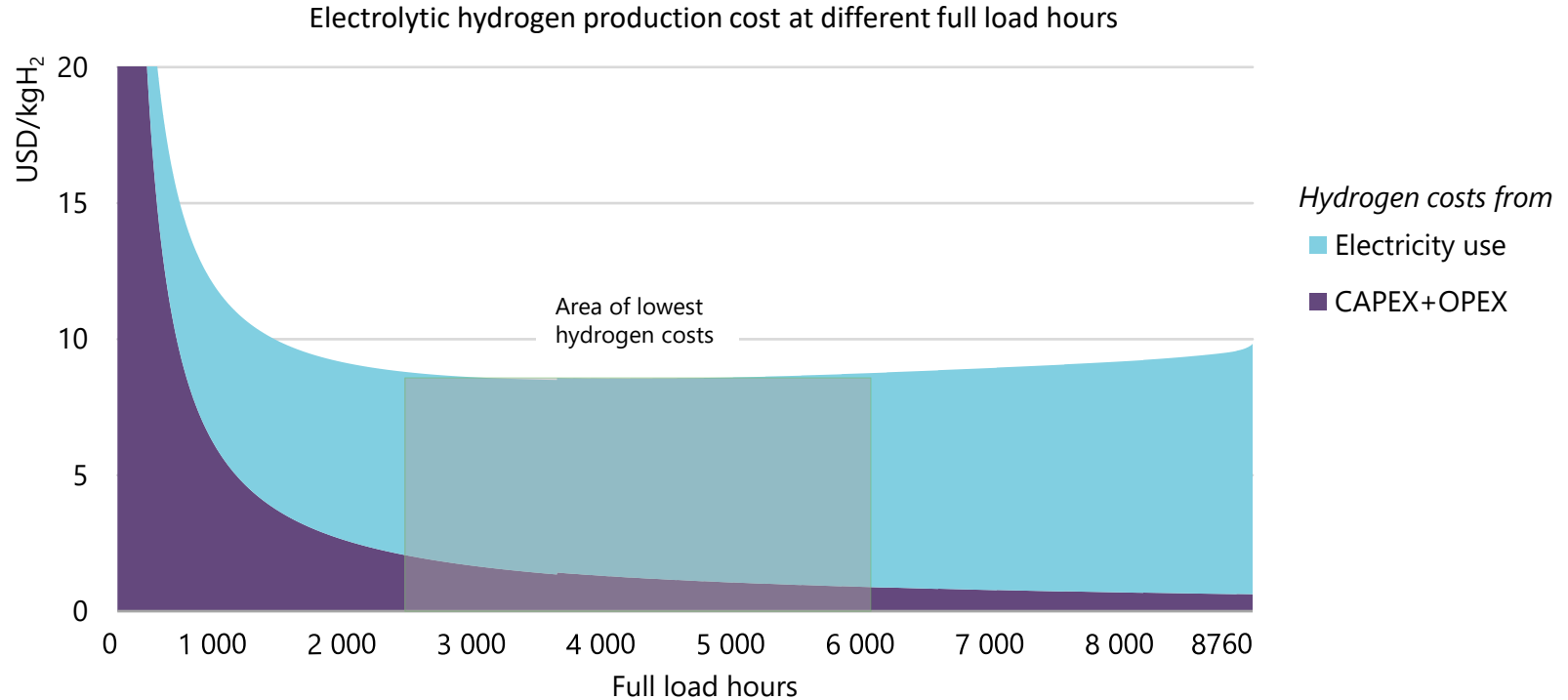
Source: Lazard, 2014-2020, Levelized costs of energy

L'hydrogène par électrolyse de l'eau peut être compétitive



A 30% de facteur de capacité, le coût de l'électricité domine celui de l'hydrogène

A sweet spot for electrolytic hydrogen production

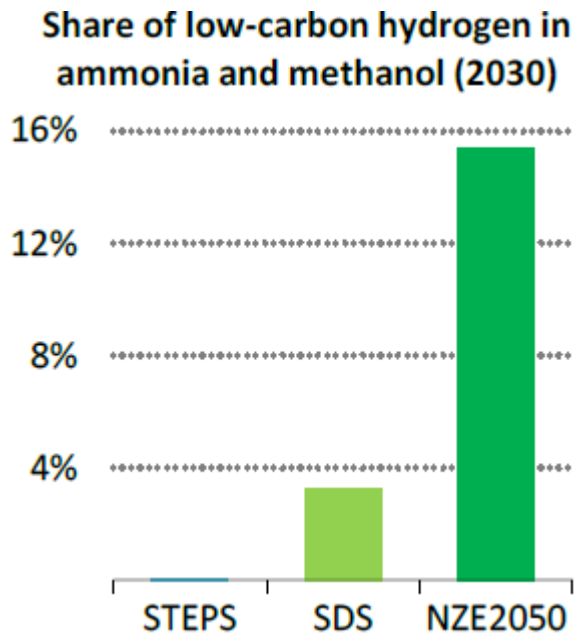


Mid-load operation of electrolyzers achieves the lowest hydrogen costs, balancing CAPEX, OPEX, and electricity costs.

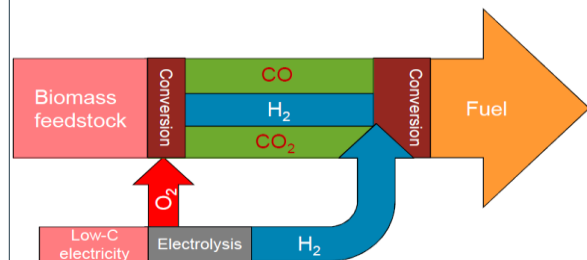
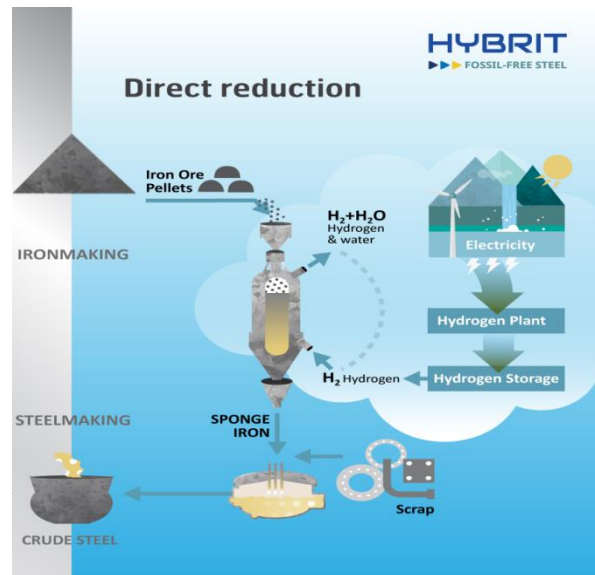


Les usages les plus pertinents de l'hydrogène vert

- Verdir l'hydrogène raffinage, l'ammoniac et le méthanol
- Sidérurgie: H-réduction du minerai de fer+fours élec.
- Stockage/transfert d'ER pour la production électrique
- NH_3 combustible (maritime)
- Kérosène de synthèse pour l'aviation
 - Capture directe du carbone
 - Utiliser carbone biomasse
- *Et c'est à peu près tout...*

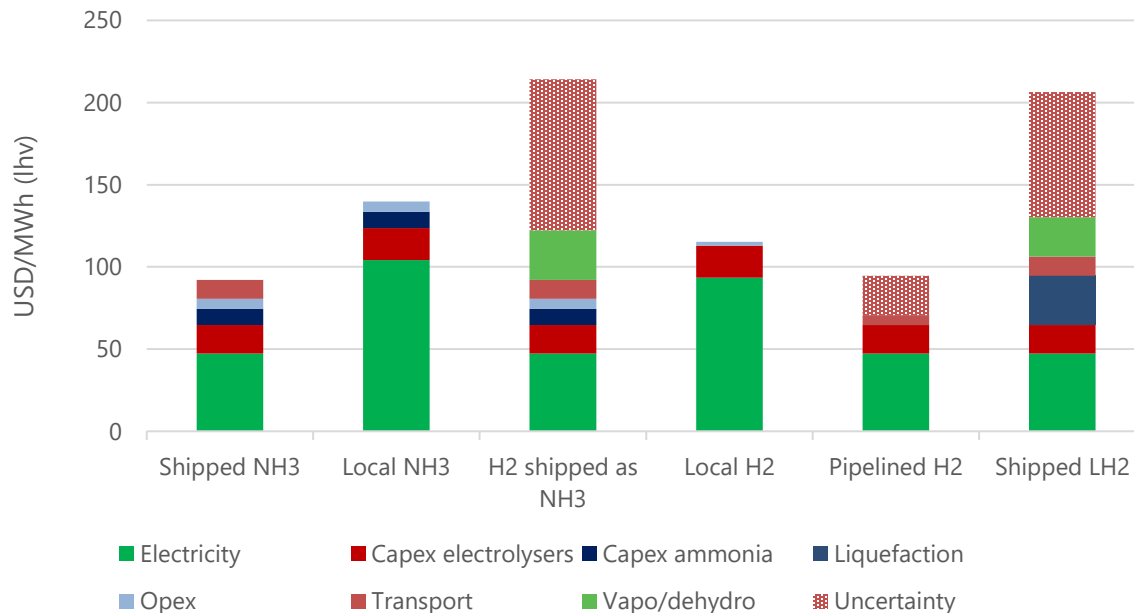


Source: IEA WEO 2020



Les échanges d'hydrogène et d'ammoniac

Coûts de l'énergie de H₂ et NH₃ produits en Europe vs. importés du Maroc

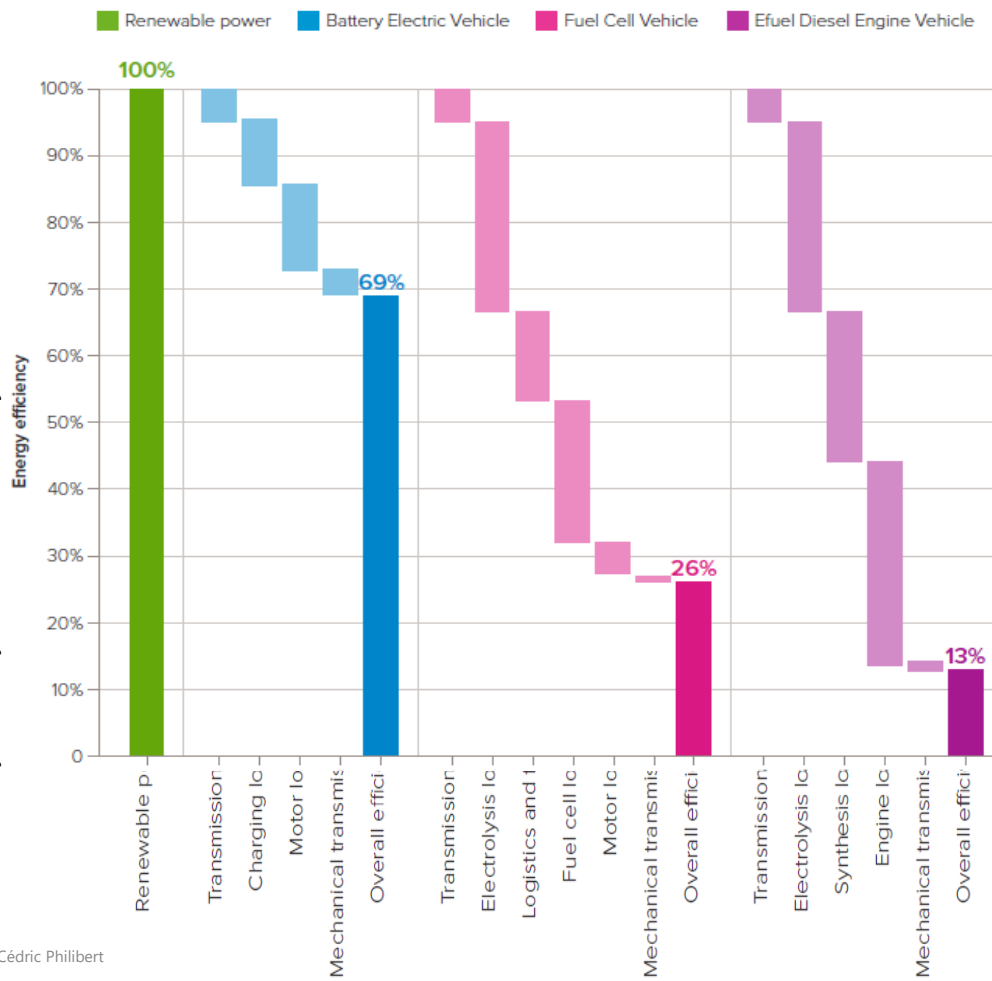


Transport: distance 1500 km, USD 60/ tNH₃ (ship), USD 0.2/kg H₂ (pipeline)

Les échanges de produits riches en hydrogène et faciles à transporter sont justifiés



Efficacités des différents transports bas-carbone



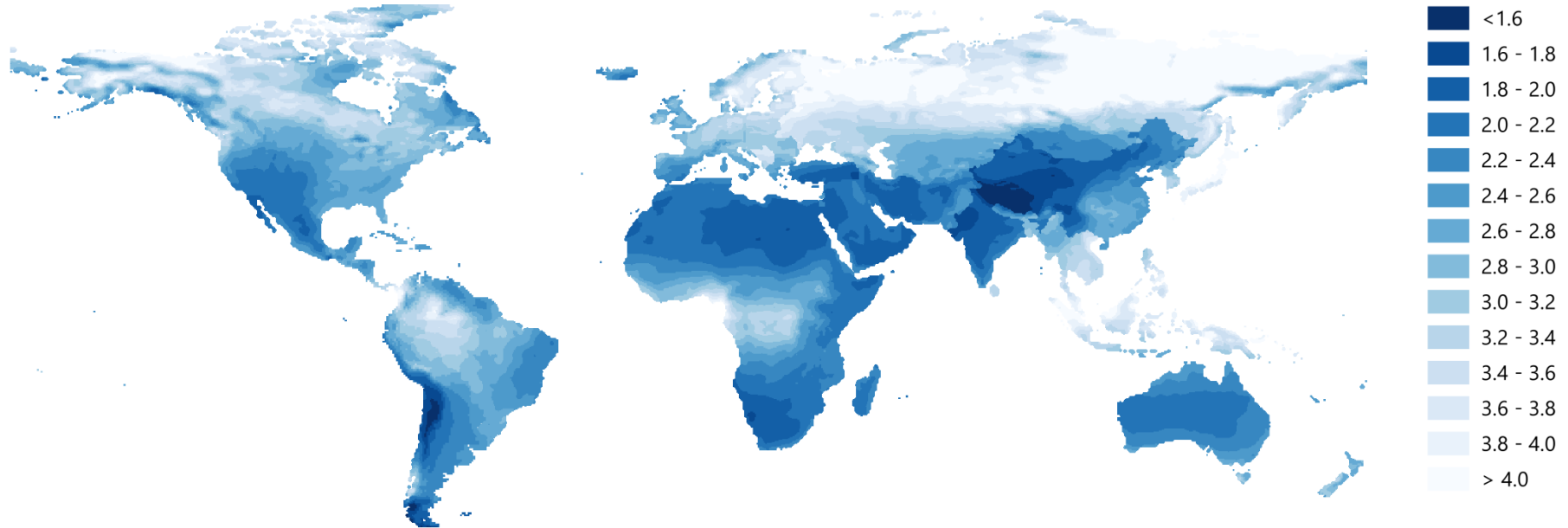
Pourquoi Scania abandonne les camions à hydrogène

04.02.2021 - PHILIPPE SCHWOERER



Renewables hydrogen costs are set to decline

Long-term hydrogen production costs from solar & wind systems



The declining costs of solar PV and wind could make them a low-cost source for hydrogen production in regions with favourable resource conditions.



En guise de conclusion...

Le Monde

DIMANCHE 1^{ER} - LUNDI 2 NOVEMBRE 2020

Cédric Philibert

A trop demander à l'hydrogène, on ne rend pas service à la transition énergétique

Les volumes nécessaires pour la chimie, la sidérurgie, l'aérien et le maritime sont considérables : les effets d'échelle seront là. Il faudra accélérer très fortement le déploiement des énergies renouvelables, car elles devront de surcroît remplacer les centra-

les thermiques pour les autres usages, actuels et nouveaux, de l'électricité. Si l'hydrogène « bleu » ou « turquoise » vient en renfort, tant mieux, mais ne pas choisir la technique la plus efficace pour chaque usage, ce n'est pas accélérer la transition, c'est la ralentir. ■

Comment stocker l'hydrogène?

- On stocke l'hydrogène de façon économique dans des cavités salines – aux Texas et au R.-U.
- D'autres stockages souterrains sont envisageables
- Le stockage en réservoir d'acier est très coûteux
- Sans possibilités géologiques il faut passer au méthane de synthèse (avec du carbone) ou à l'ammoniac (sans carbone)

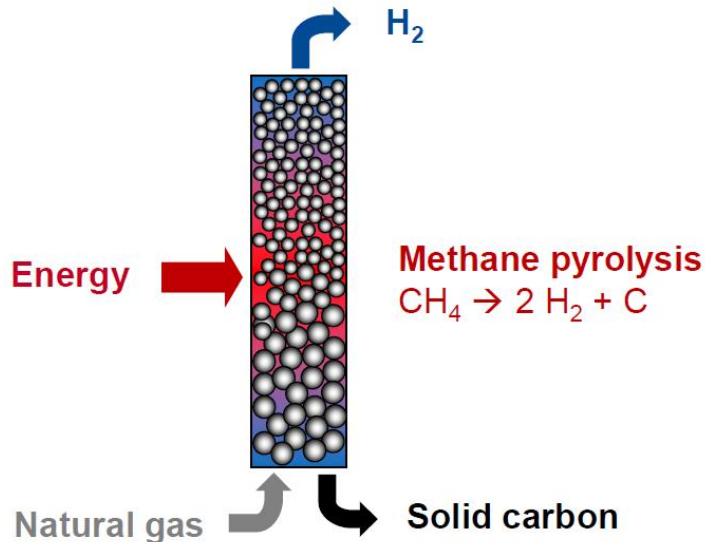
Stockage	Volume	Densité (Kg/m³)	Densité vol. (MJ/l)	Coût (\$/GJ 182 j.)
LH ₂ (-253°C)	900 t	72.41	8.685	99
H ₂ 350 bar	90 t*	23.65	2.837	
H ₂ 700 bar		39.69	4.761	
LNH ₃ (-33°C)	60 000 t		15.37	4
NH ₃ 9-17 bar	270 t		13.77	



La pyrolyse du méthane et ses atouts

- Prouvé à échelle commerciale (*Kvaerner Hydrogen Plasma Black Reactor*, 98-2007,
- Ne produit pas de CO₂, déchet à stocker, mais du carbone solide qui peut être valorisé (par exemple noir de fumée)
- Préserve les investissements dans la production et le transport du gaz naturel
- Permet d'augmenter plus rapidement la production d'hydrogène sans CO₂
- Consomme 5 fois moins d'électricité
- Monolith Materials construit deux usines de taille commerciale au Nebraska
 - Procédé plasma Mines Paristech

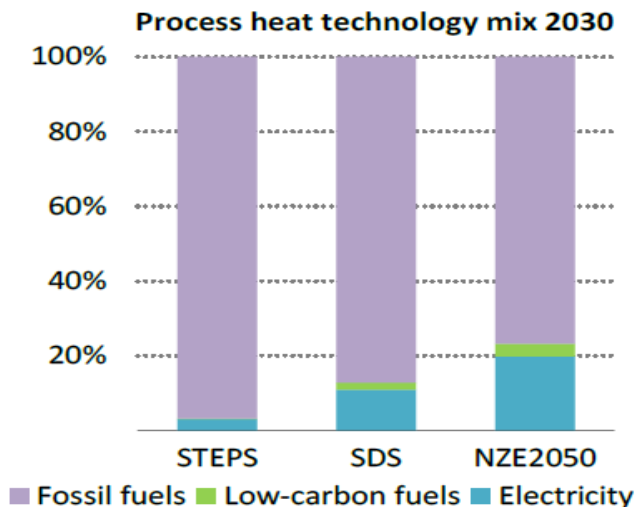
- TNO développe son propre procédé
- Groupe Hazer en Australie occidentale
- BASF passe du labo à l'installation pilote



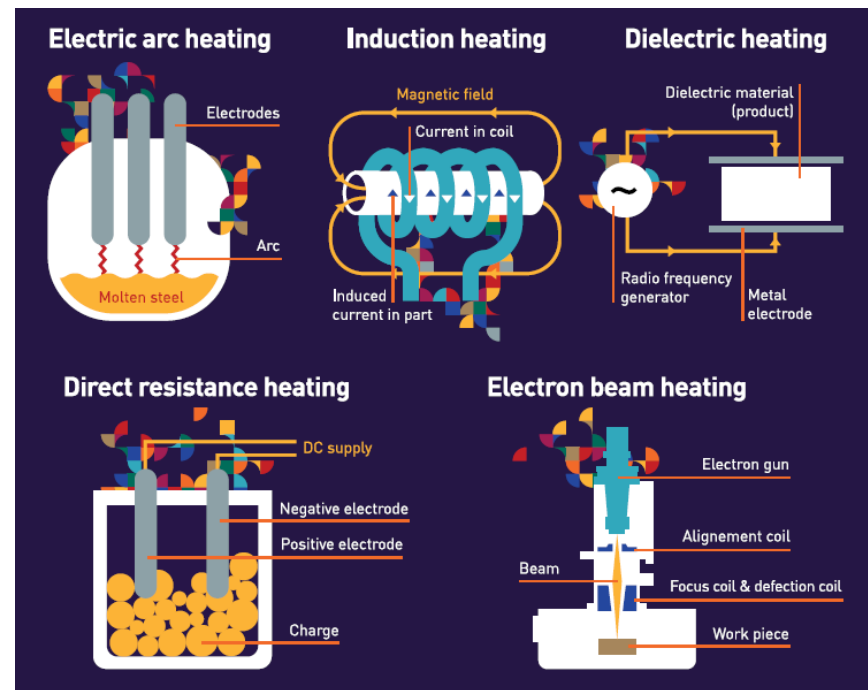
See Pöyry report *Hydrogen from natural gas – the key to deep decarbonisation*

L'électrification directe de l'industrie emprunte plusieurs voies

- Résistances utilisant des surplus d'électricité quand ils sont disponibles
- Pompes à chaleur/RMV
- Technologies électro-magnétiques



Les technologies électriques sont efficaces et fournissent de la chaleur à toutes les températures



Quelques faits relatifs à l'électrification de l'industrie

- L'électricité peut fournir de la chaleur à n'importe quel process industriel – à n'importe quel niveau de température
- L'électricité est généralement plus chère que les combustibles
 - Le gros de l'électricité est produit dans des centrales thermiques
 - Cela change du fait de l'expansion rapide de l'éolien et du solaire
- La chaleur électrique est plus efficace car plus précise
 - Cette efficacité accrue compense souvent le coût plus élevé
 - Elle améliore aussi nombre de produits, et les conditions de travail
- La chaleur électrique peut être plus rapide, source d'économies
- L'électrification de la chaleur industriel peut éliminer les flux de CO₂ diluées, facilitant la capture des émissions de proceed (e.g. ciment, reformage du gaz naturel)

Energy savings		Heat tech
Prepared food	49%	Heat pumps & infrared
Beer	69%	Heat pumps
Milk power	66%	Heat pumps
Paper	24%	Infrared
Aluminum casting	50%	Induction
Brick	50%	Microwaves
Glass	30%	Resistance
Steel	18%	H-DRI&EAF
Plastics	95%	(Recycling)

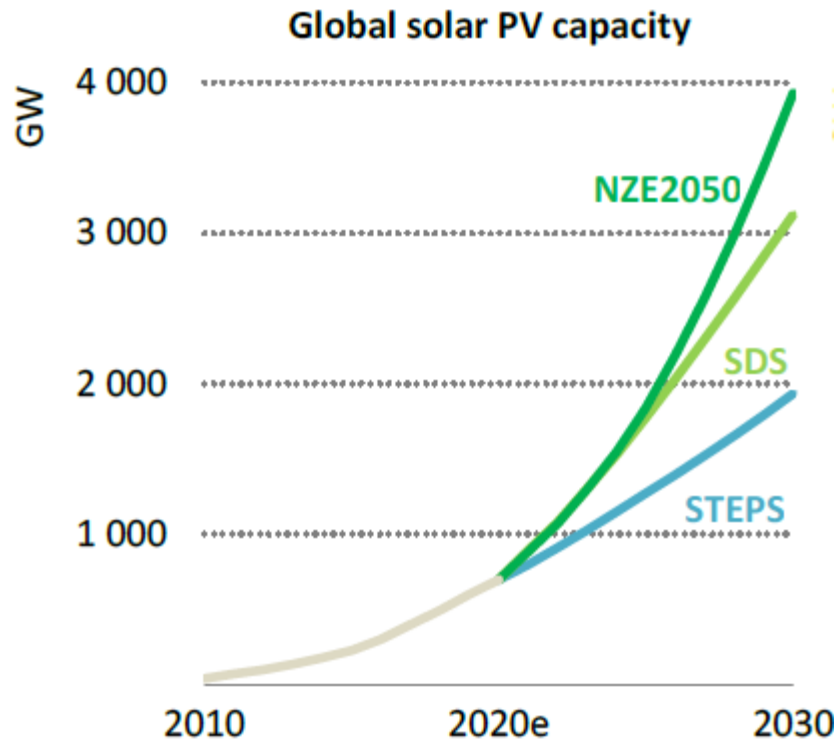
Time to heat surfaces to 150°C (seconds)				
	Steel	Aluminium	Plastic	Wood
Gas convection	210	138	460	365
Electric infrared	30	20	14	8

Source: Lord M., 2018, *Electrifying Industry*, Beyond Zero Emissions, Australia



L'hydrogène vert demandera beaucoup d'électricité renouvelable

- Transport maritime: 325 Mt NH_3 soit 6500 TWh el.
- Aviation: kérosène synthétique soit 5000 TWh el.
- Sidérurgie: 90 Mt H_2 : 4300 TWh el. + 930 TWh el. pour fours elec.
- S'ajoutent aux 27 700 TWh d'électricité vertes en 2040 dans le SDS de IEA WEO 2020
- Le scénario Net Zero Emissions en 2050 de l'AIE suppose une croissance forte des renouvelables



L'hydrogène dans les systèmes électriques

- H₂ comprimé peut être stocké longtemps en cavités salines, transporté en pipelines
 - Un rare moyen de stockage inter-saisonnier
- NH₃ est plus facile à transporter sur mer et à stocker que H₂ liquide
- Brûler H₂ ou NH₃ dans des centrales thermiques nécessaire pour achever de décarboner la production d'électricité reposant largement sur l'essor du solaire et du vent.
- RTE: pas nécessaire avant 2035 au plus tôt dans le système électrique continental
- Situation différente dans les îles et autres systèmes isolés (p. ex. plaques minières)
- Le Japon se propose d'importer massivement H₂ vert ou bleu *principalement pour sa production d'électricité*:
 - 300 kt/an en 2030, puis 5-10 millions de tonnes H₂,
 - Surtout sous forme de NH₃, d'abord en co-combustion dans centrales charbon
 - Par comparaison, 800 000 voitures H₂ consommeraient 80 kt/an H₂ en 2030
- Les charges effaçables sur le réseau, chaleur industrielle, véhicules électriques et électrolyseurs facilite un déploiement économique et l'intégration de l'éolien et du solaire

Les mauvais procès faits aux batteries lithium-ion

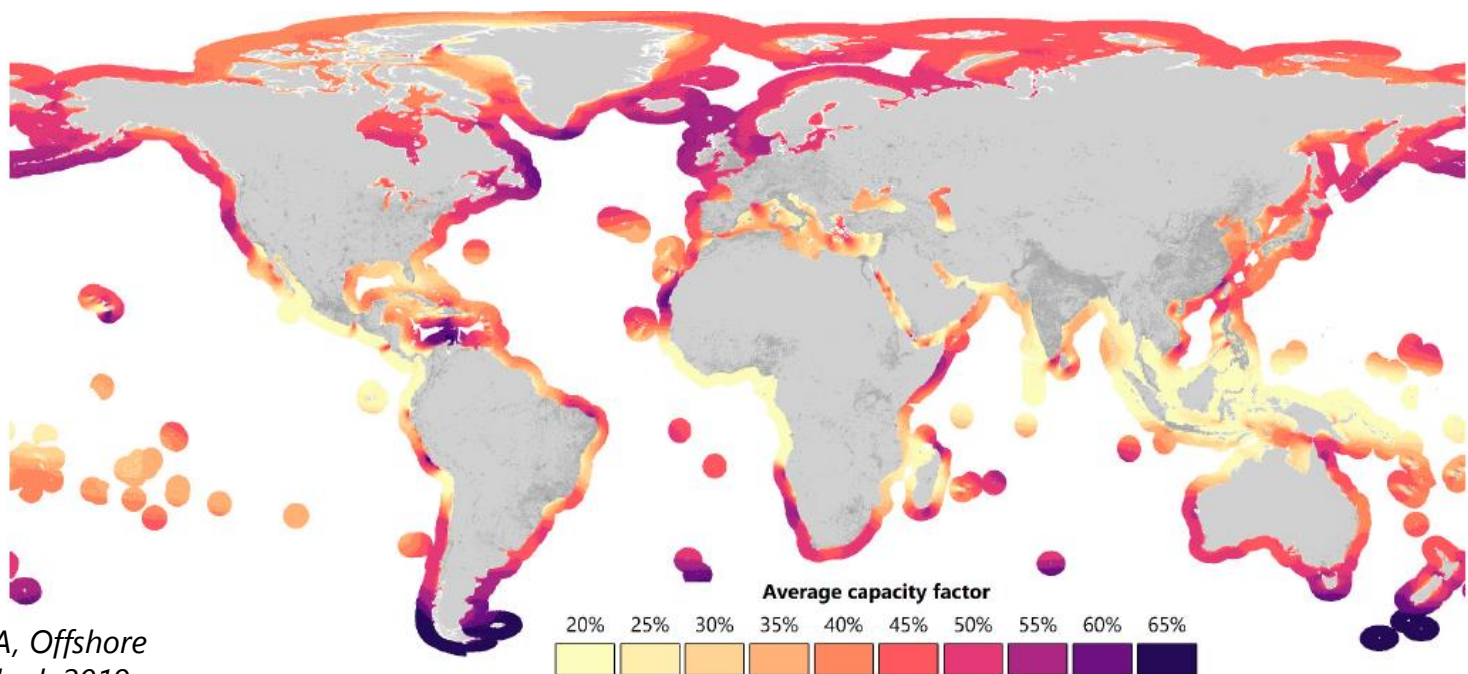


- Les réserves sont de 900 ans au rythme actuel
- 60% du lithium vient des mines australiennes et non des salars Chili Pérou
- On sait recycler les batteries des VE, on le fera quand les premières arriveront en fin de vie
- Il y aussi des « terres rares » dans les PAC, les pots catalytiques et les raffineries du pétrole)



L'éolien maritime, un vaste potentiel mondial

Average simulated capacity factors for offshore wind worldwide

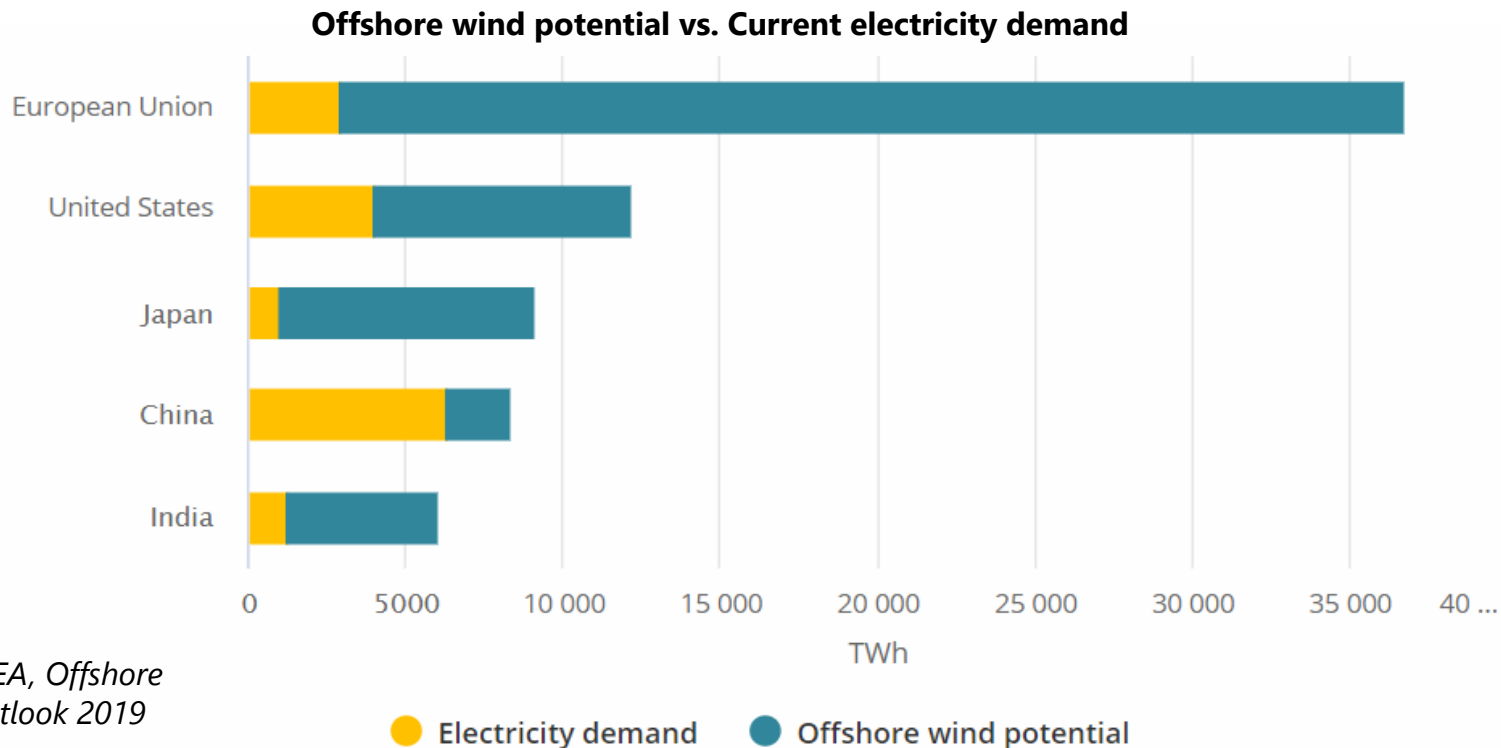


Source: IEA, *Offshore Wind Outlook 2019*

Le facteur de capacité élevé des éoliennes en mer les rapproche de la production « en base », quoique variable



L'éolien maritime, un vaste potentiel mondial

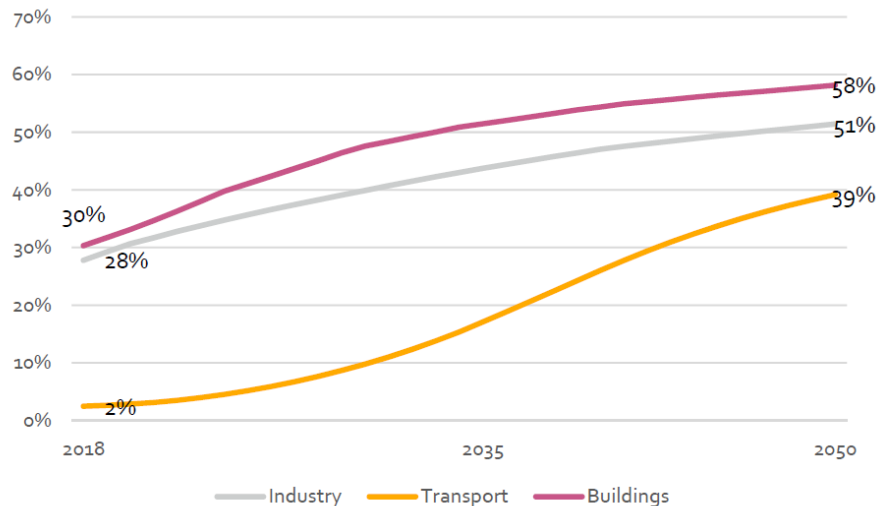
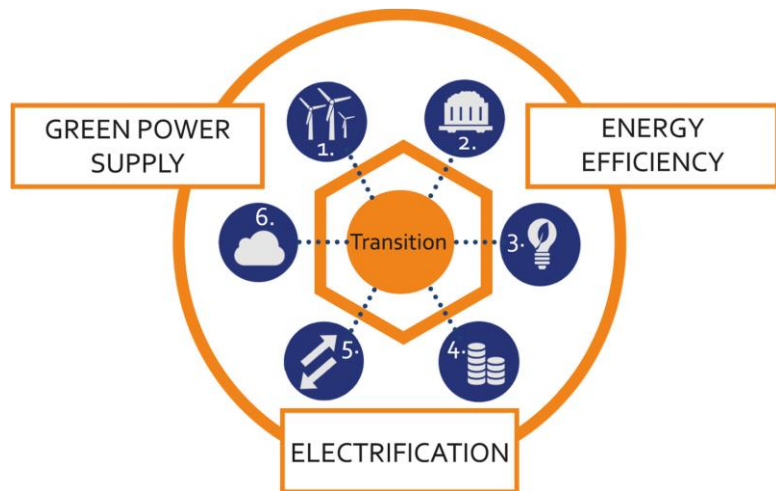


Le potentiel de l'éolien maritime représente dix fois la consommation d'électricité

Economies d'énergies, renouvelables et électrification

China Renewable Energy Outlook 2019

Taux d'électrification

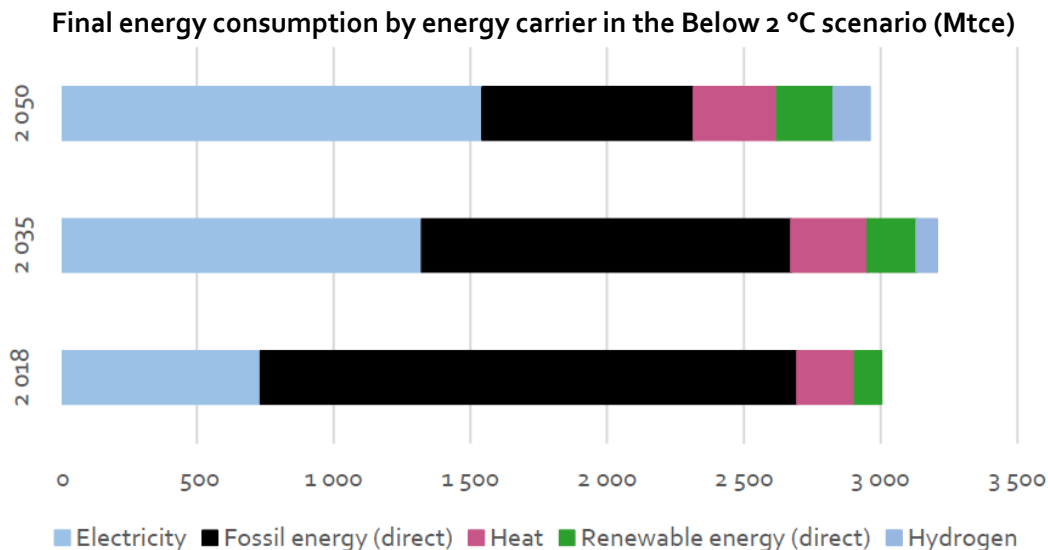


Beaucoup d'électricité, un peu d'hydrogène « vert »

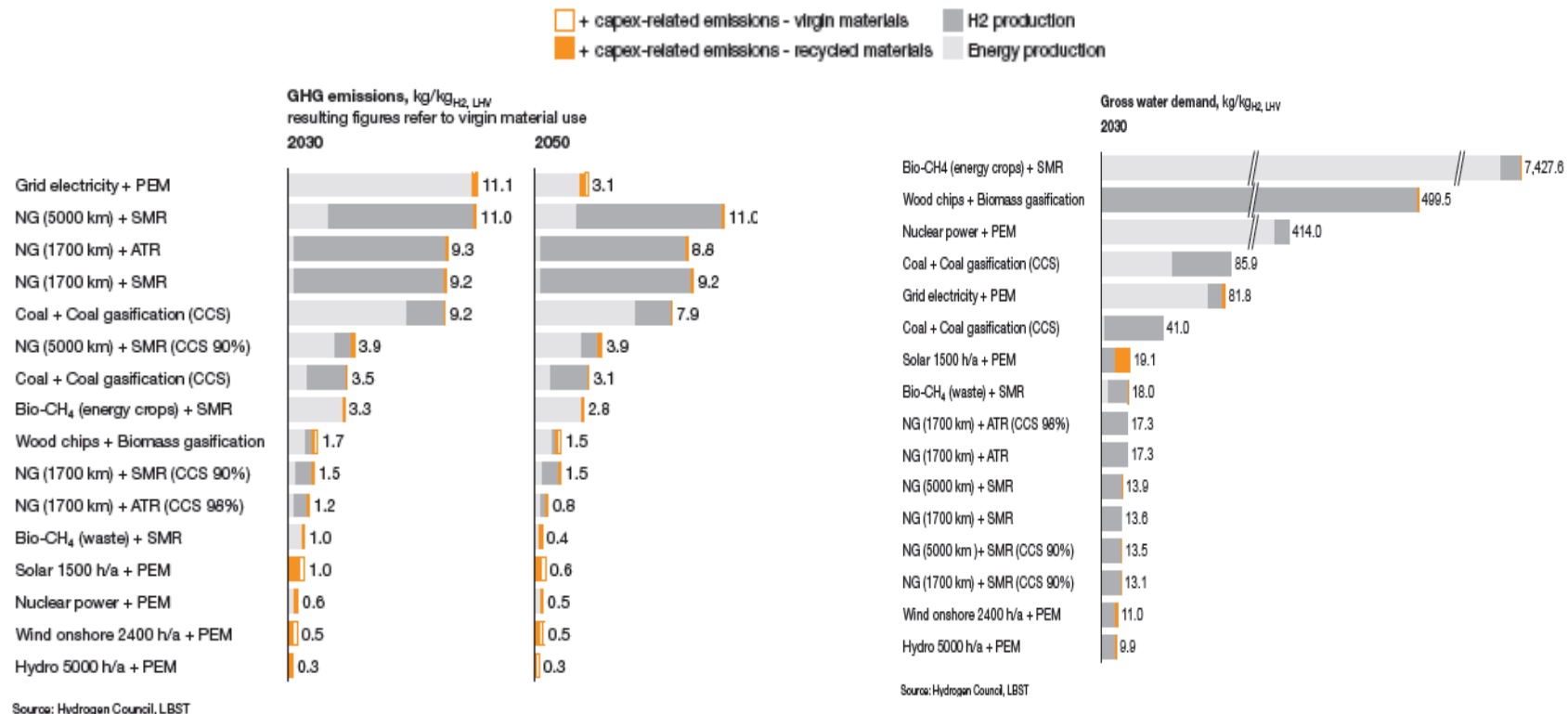
China Renewable Energy Outlook 2019

Hydrogen offers feasible ways to expand the use of renewable electricity

The use of hydrogen produced by electricity is expanded in long-haul transport (as fuel), chemicals (as feedstock), and iron and steel (replacing coke). The share of hydrogen in the final energy consumption reaches 2.3% in 2035 and 4.5% in 2050, adding respectively 1,047 TWh and 1,536 TWh of electricity consumption.



L'hydrogène vert a les plus faibles émissions de GES (ACV)



Avec 0,6 kg CO₂-eq/kg H₂, le nucléaire fait mieux que le solaire, jeu égal avec l'éolien et moins bien que l'hydroélectricité. Il utilise d'avantage d'eau et crée 115 g déchets nucléaires par kg H₂,

