

Hydrogène: promesses et défis

AUORE RICHEL, PhD

Full Professor

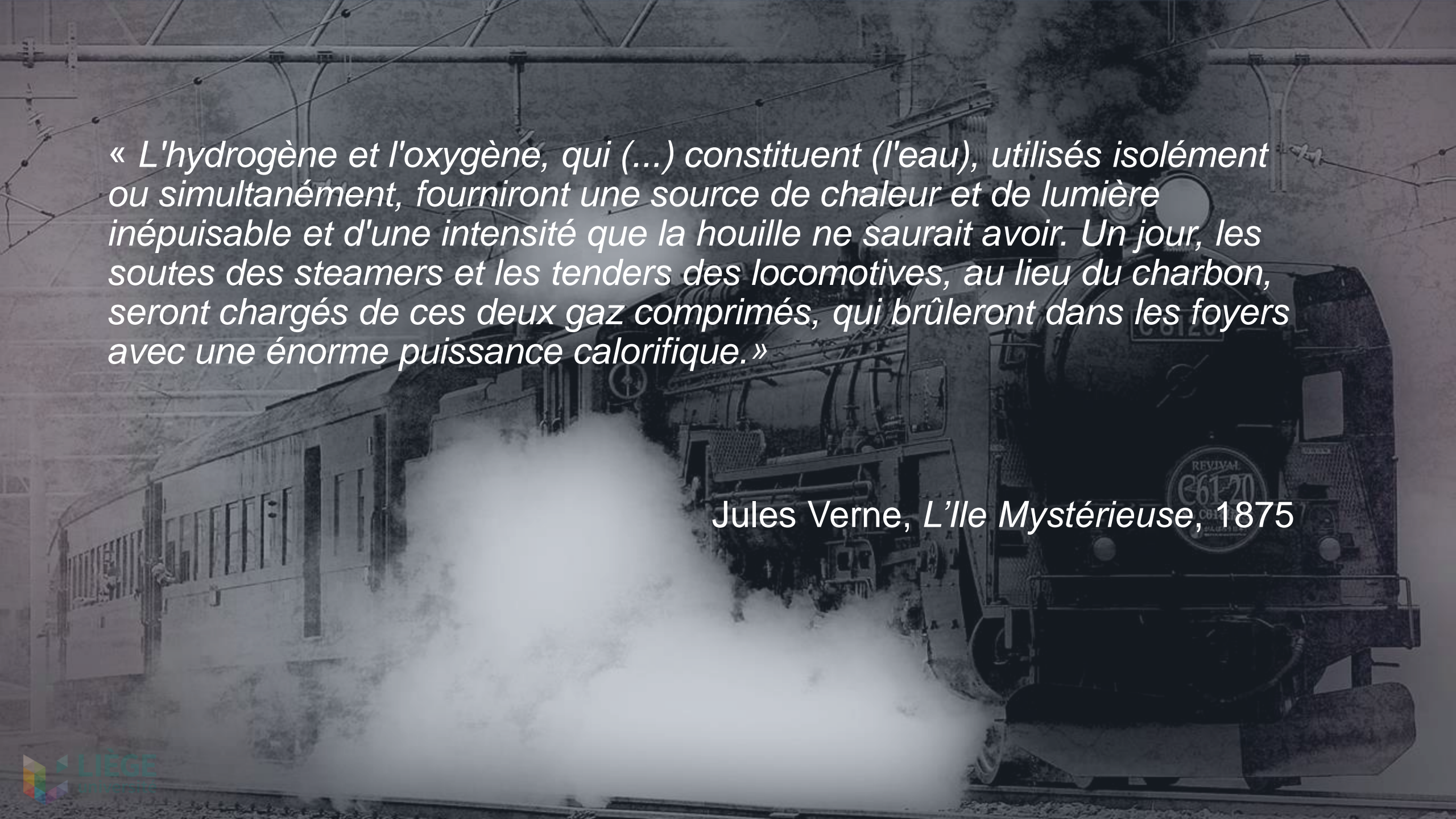
University of Liège (Belgium)

a.richel@uliege.be

www.chem4us.be



Chem.4.us
LA CHIMIE POUR CRÉER NOTRE FUTUR



« L'hydrogène et l'oxygène, qui (...) constituent (l'eau), utilisés isolément ou simultanément, fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisable et d'une intensité que la houille ne saurait avoir. Un jour, les soutes des steamers et les tenders des locomotives, au lieu du charbon, seront chargés de ces deux gaz comprimés, qui brûleront dans les foyers avec une énorme puissance calorifique. »

Jules Verne, *L'Île Mystérieuse*, 1875

Abondance naturelle

H_2 - « hydrogène moléculaire »

0,5 ppm (gaz)

Eau/roche

Radioactivité naturelle

 H_2O



Ressources fossiles



Biomasse

Une longue histoire de découvertes

Phase 1: les premières observations

Hydrogen (H₂)

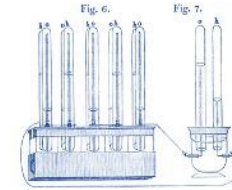
Name « hydrogen » given

A. Lavoisier
1783

Heat of
combustion

Lavoisier & Laplace
1783

Oxy-H₂
blowpipe
G. Gurney



1st Fuel Cell
W. R. Grove



Hydrogenation
CO₂ into CH₄
P. Sabatier

Synthesis by
dissolution
of metals in
acid

R. Boyle
1670



Explosivity
with air
N. Lemery

Water-gas shift
CO + H₂O ⇌ CO₂ +
H₂

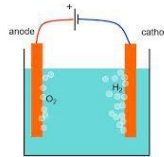
F. Fontana
1780



H₂-filled gas balloon
J. Charles
1783



Water electrolysis
Nicholson &
Carlisle
1800

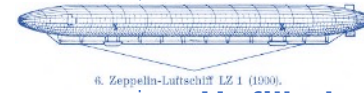


Concept of Fuel
Cell
H. Davy

Primary cell
J. F. Daniell



H₂ critical
constants (T°,
P and bp)
Z. Wroblewski



H₂-filled
airship
F. von
Zeppelin

1st observation
Paracelse

ca 1520

1670 1700

1780 1783

1800 1801

1823 1836

1842

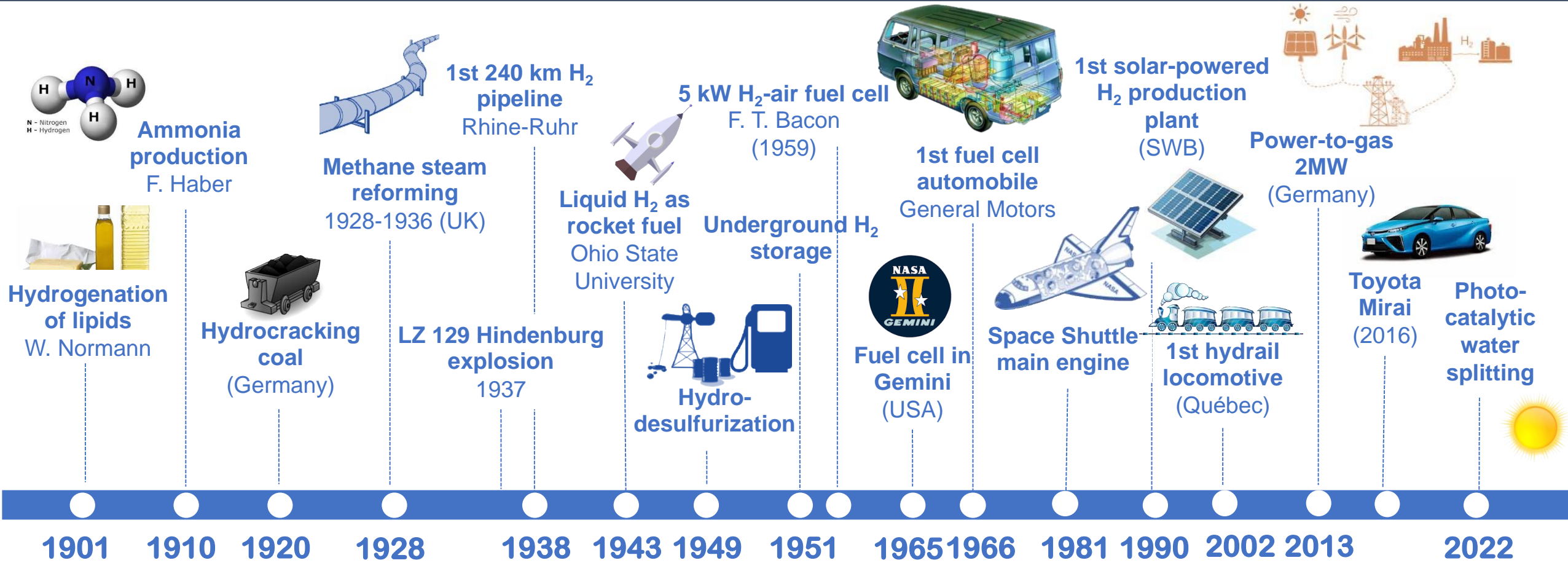
1885

1897 1900

© 2023 Richel Aurore

Une longue histoire de découvertes

Phase 2: la production de masse et les applications commerciales

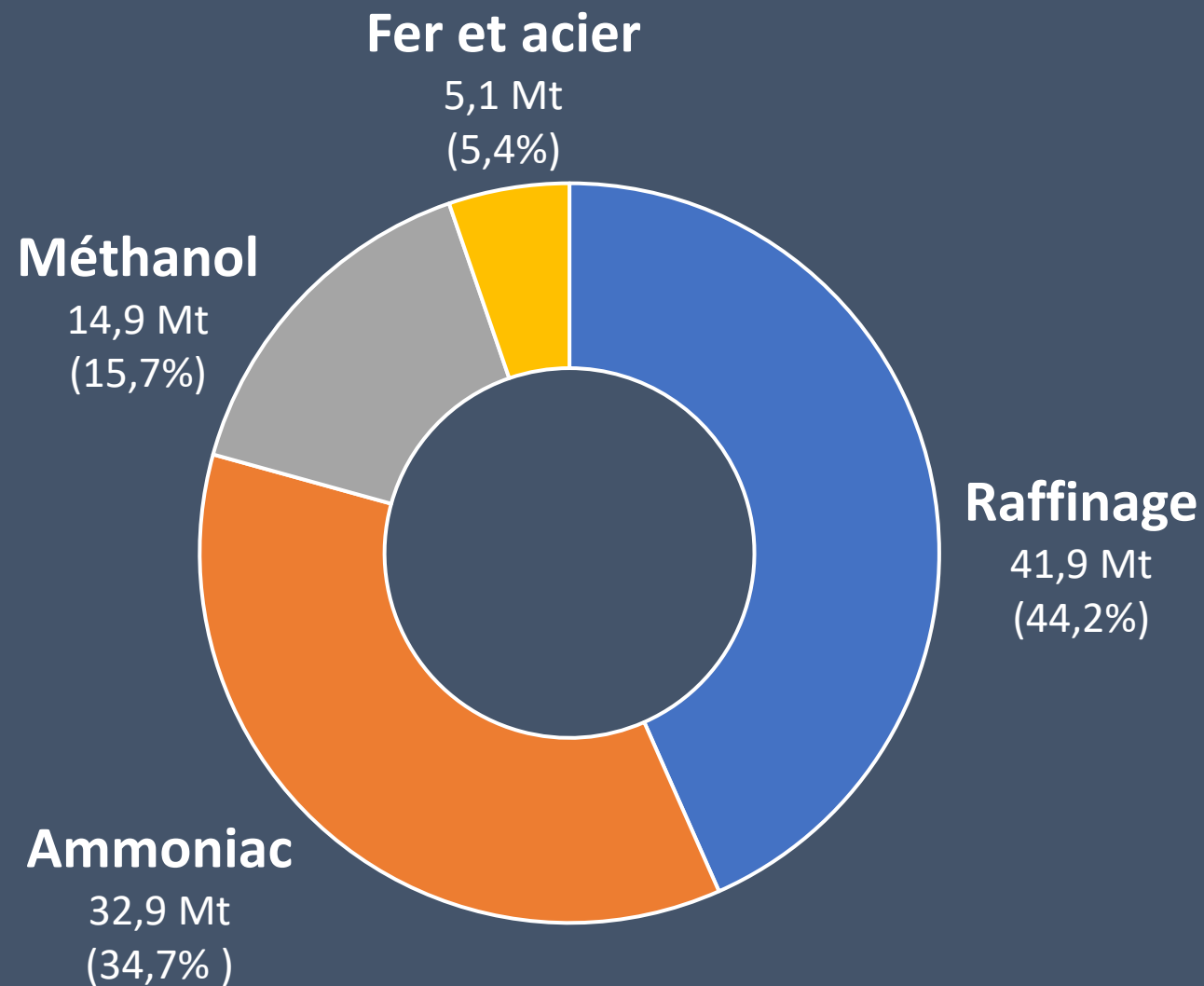


Demande en hydrogène

(IEA, 2022)

94,8 millions de tonnes (Mt)

(1970: 30 Mt)



Demande en hydrogène en Belgique

(European Hydrogen Observatory, 2022)

BE 378.000 tonnes (2022)



44% Raffinage



35% Ammoniac



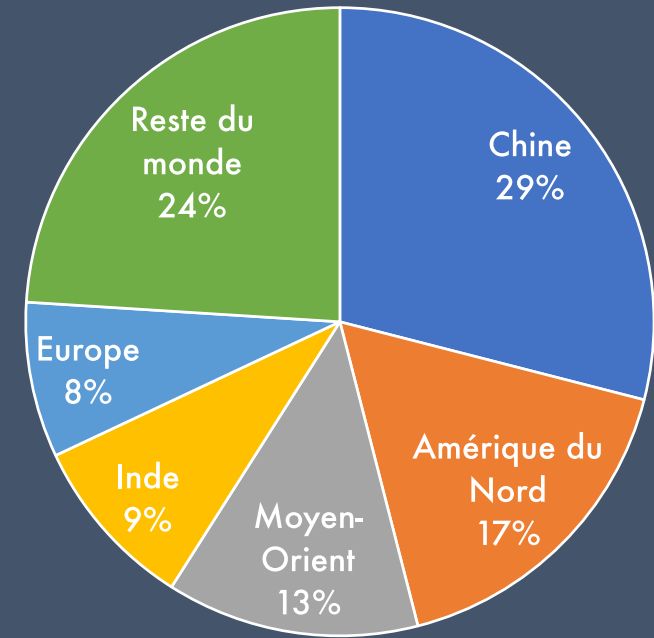
11% Autres molécules



8% Chaleur industrielle



0,05% Mobilité et autres applications



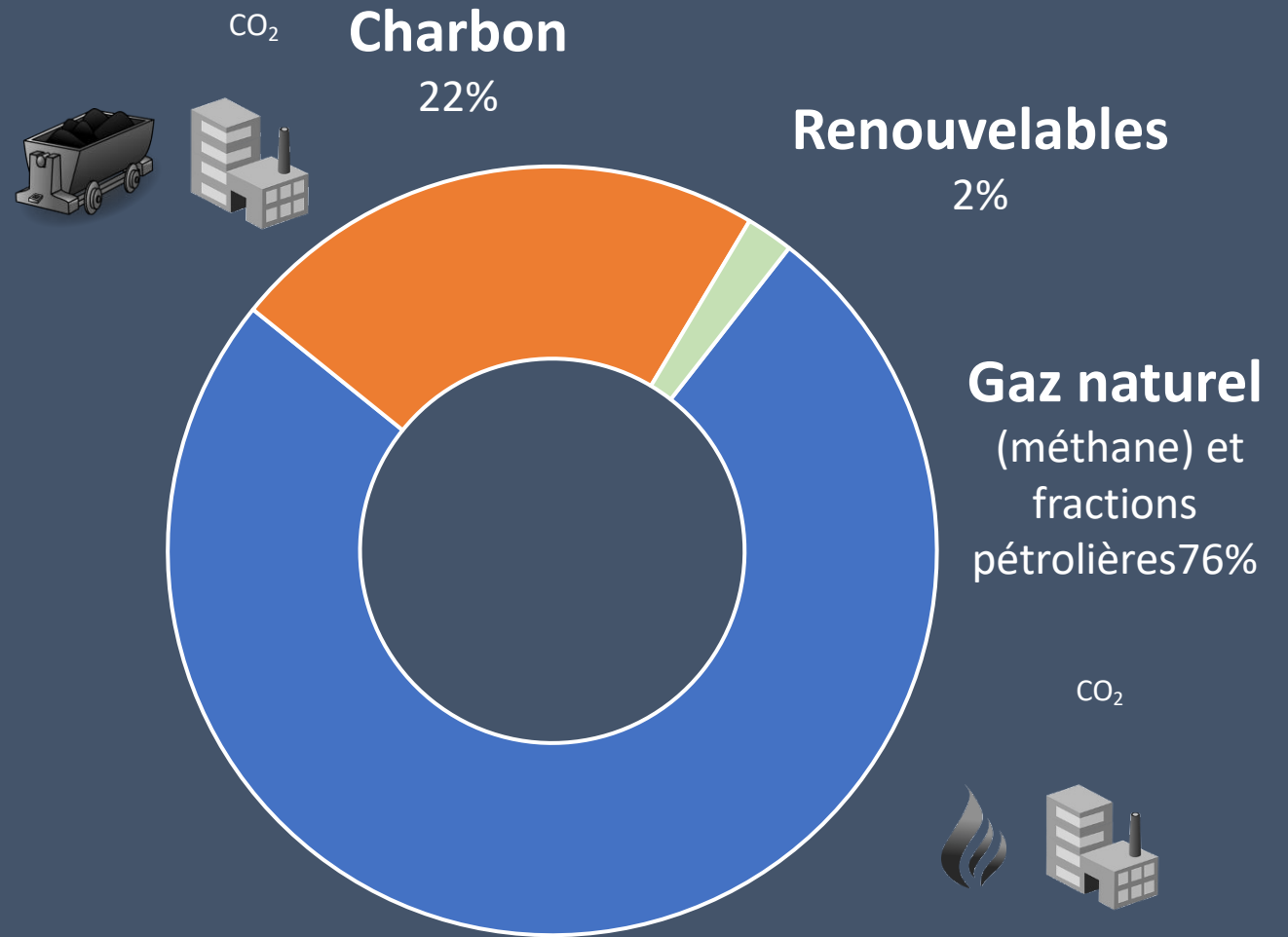
Source: IEA, rapport 2023 (année 2022)

Offre en hydrogène

(IEA, 2022)

Ressources fossiles 98%

Gazéification charbon: 20-23 t CO₂/t H₂
Vaporéformage méthane: 9-13 t CO₂/t H₂





La problématique de la production (2022)

**Production de H₂ pour le raffinage:
240-380 Mt CO₂**

**Pour les autres applications
industrielles:
680 Mt CO₂**

Total: 920 - 1060 Mt CO₂ *

* excluant les émissions collatérales résultant de l'extraction de la ressource fossile concernée, excluant les émissions de CO₂ capturées sur site (comptant pour environ 140 Mt)

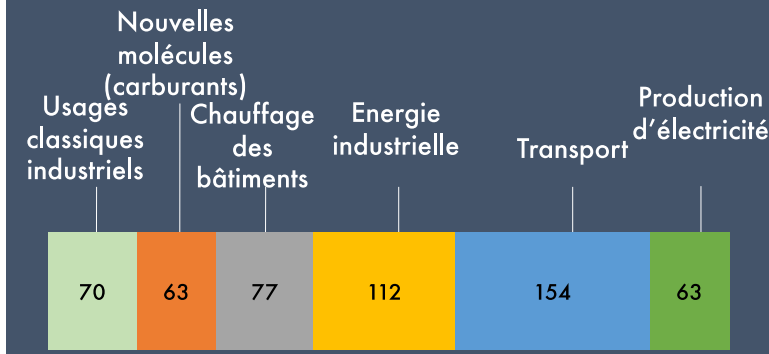
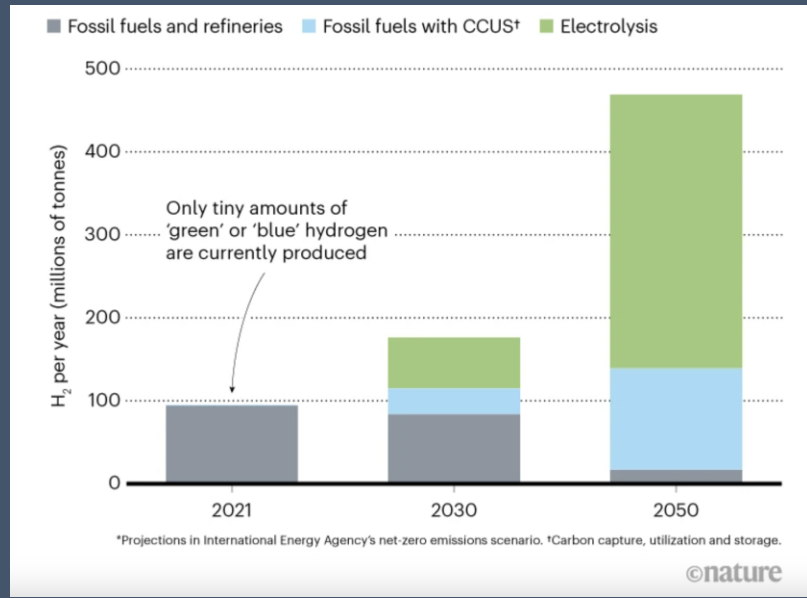


Les enjeux (2030-2050)

(Nature, 2022)

Réduire les émissions de CO₂ totales sur l'ensemble de la chaîne de production

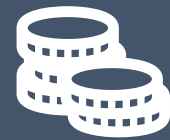
Satisfaire la demande (450-660 Mt, 2050)





Les enjeux (2030-2050)

(Nature, 2022)



Economie hydrogène

Modèle économique dans lequel H_2 joue le rôle de vecteur énergétique commun permettant de mutualiser les différents types de production d'énergie et de pallier le problème de l'intermittence des énergies renouvelables.

Spectre de couleurs

(Gases, 2023)

Différentes sources d'énergie primaire

Procédés distincts (coûts et impacts environnementaux)

H₂ de synthèse vs. H₂ « natif »



Spectre de couleurs

(Techniques de l'Ingénieur, ADEME, 2022)

Noir et gris: ressources fossiles

Rendements >>

Coûts entre 1000 et 1600 €/t

Emissions CO₂ et capture (hydrogène bleu)

**HYDROGENE
NOIR/GRIS**



CHARBON
GAZ NATUREL
ETC.

CO₂



REFORMAGE

Today

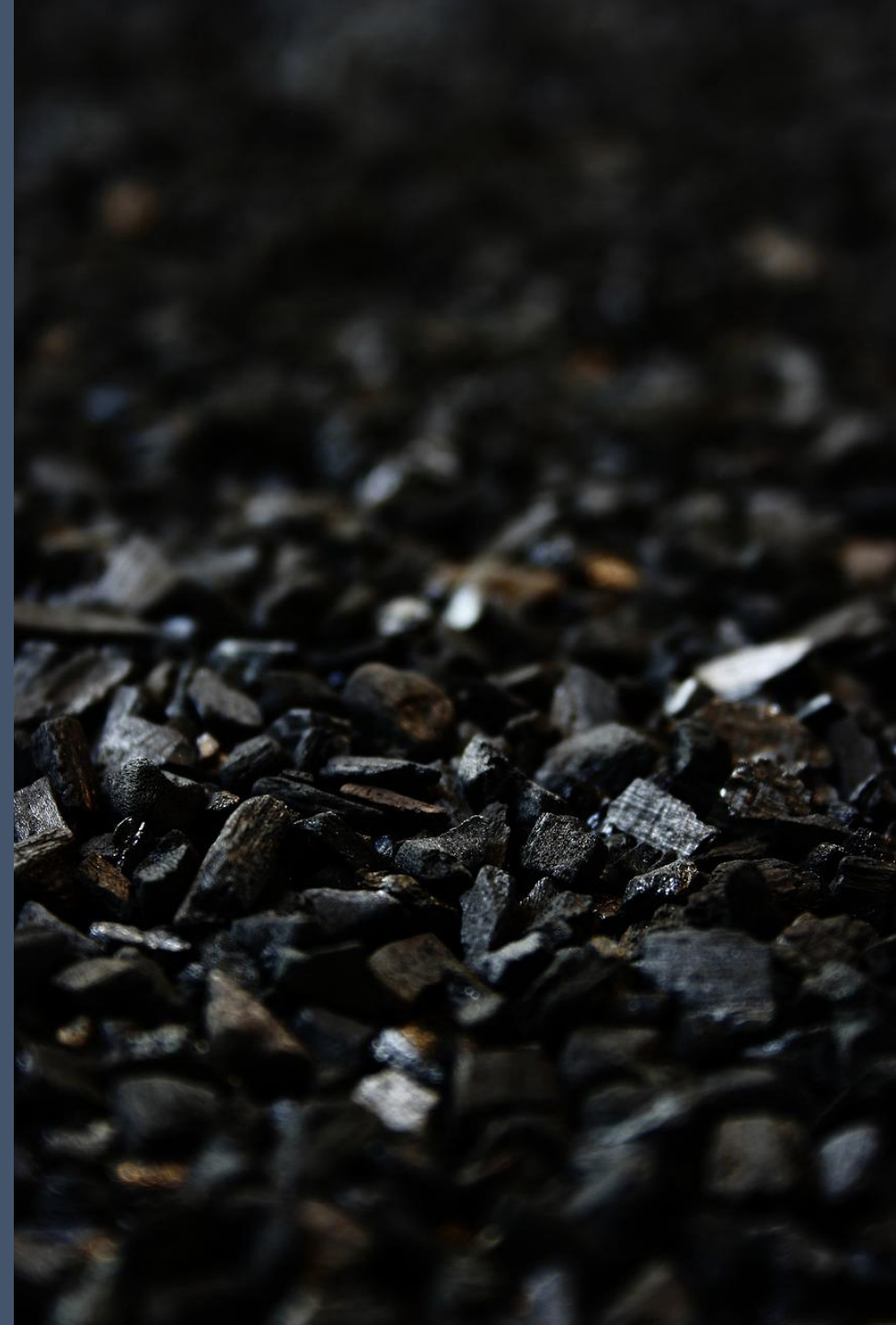
**HYDROGENE
BLEU**



GAZ NATUREL
BIOMETHANE
BIOMASSE



REFORMAGE
(GAZEIFICATION)



Spectre de couleurs

(Techniques de l'Ingénieur, ADEME, 2022)

Vert, jaune, rose : ressources renouvelables

Rendements variables

Coûts: eau (électrolyse): 4 000 à 6 000 €/t*

* Estimation à 2 000 - 3 000 €/t à terme

Emissions CO₂ variables (<3 t CO₂ / t H₂)

2030

**HYDROGENE
VERT**



EAU



CO₂

O₂

**HYDROGENE
JAUNE**



EAU



CO₂

O₂

**Exploitation de
ressources renouvelables**

(eau, biomasse, algues, etc.)

**Exploitation de
ressources renouvelables**

(eau, biomasse, algues, etc.)



Spectre de couleurs

(Techniques de l'Ingénieur, ADEME, 2022)

Turquoise ? Blanc ?

Rendements ?

Coûts ?

Emissions CO₂ variables et/ou peu estimés

(> 3 t CO₂ / t H₂)

**HYDROGENE
TURQUOISE**



**GAZ FOSSILE
ETC.**

CO₂



PYROLYSE



Faits et observations

Emissions de CO₂
Hydrogène « propre »

Hydrogène issu de l'électrolyse de l'eau alimentée par l'énergie solaire ou éolienne est indispensable à la neutralité climatique

41 gouvernements ont aujourd'hui adopté des stratégies relatives à l'hydrogène



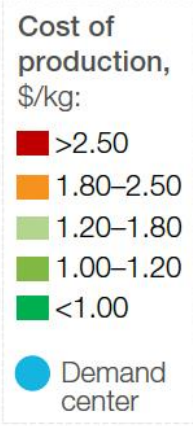
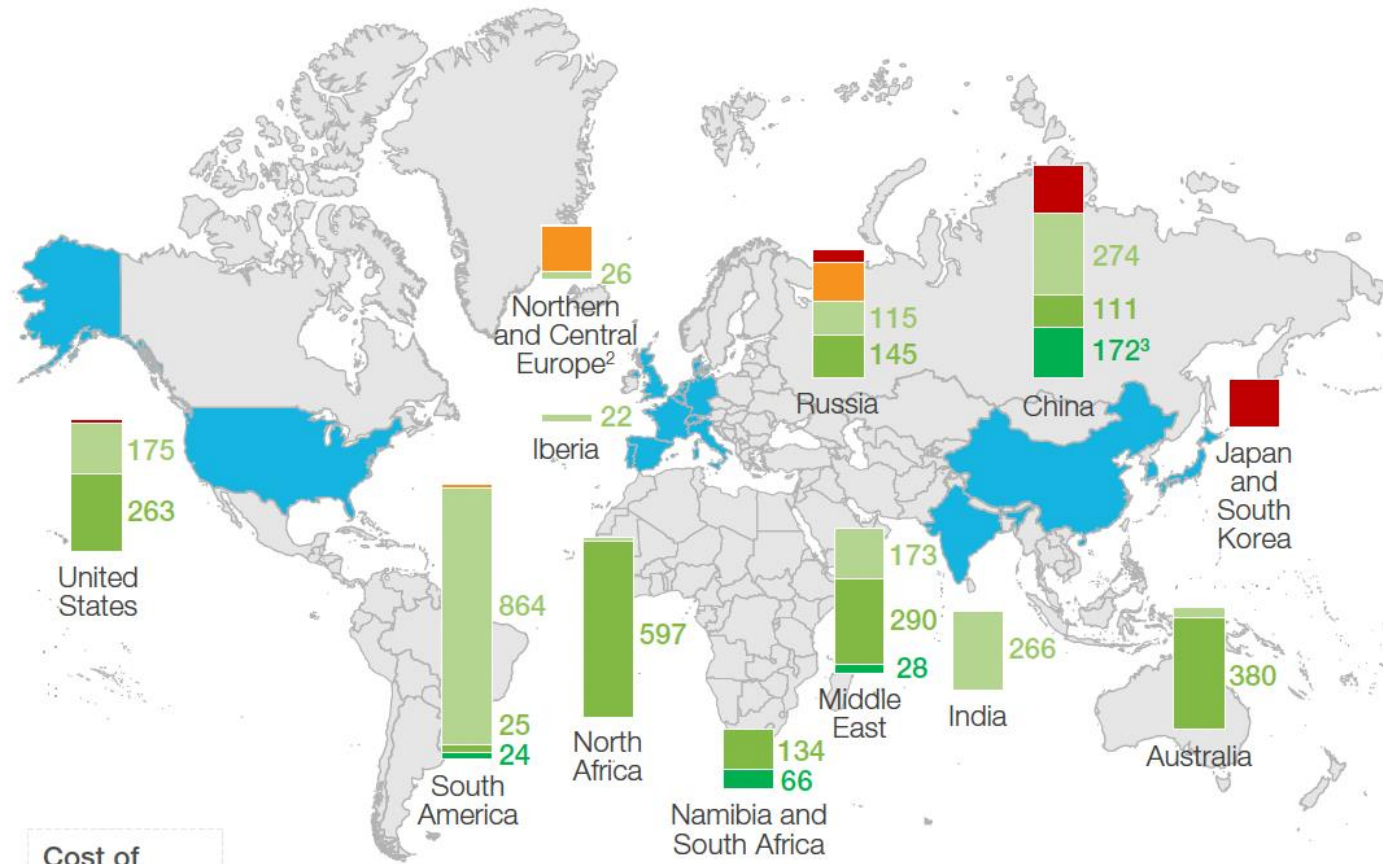


Faits et observations

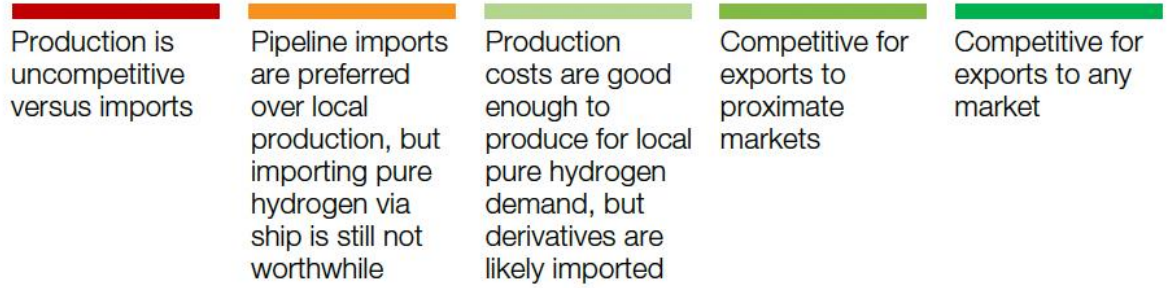
Pour répondre à la demande actuelle d'hydrogène grâce à l'électrolyse de l'eau, il faudrait 3 600 TWh par an, soit plus que la production annuelle totale d'électricité de l'UE (source: IEA)

« L'Europe ne pourra jamais produire suffisamment d'énergie renouvelable pour gérer une économie autosuffisante en hydrogène » (Nature, 2022)

Hydrogen production potential,¹ 2050, million tons per annum

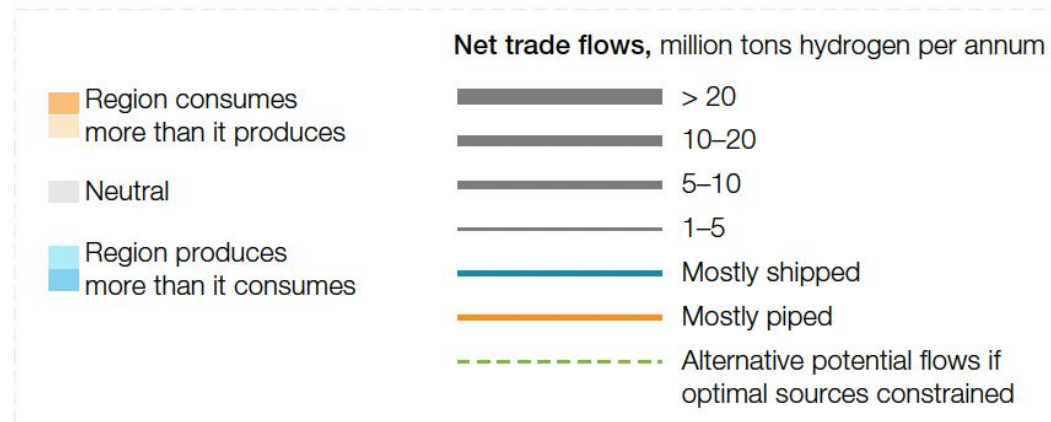
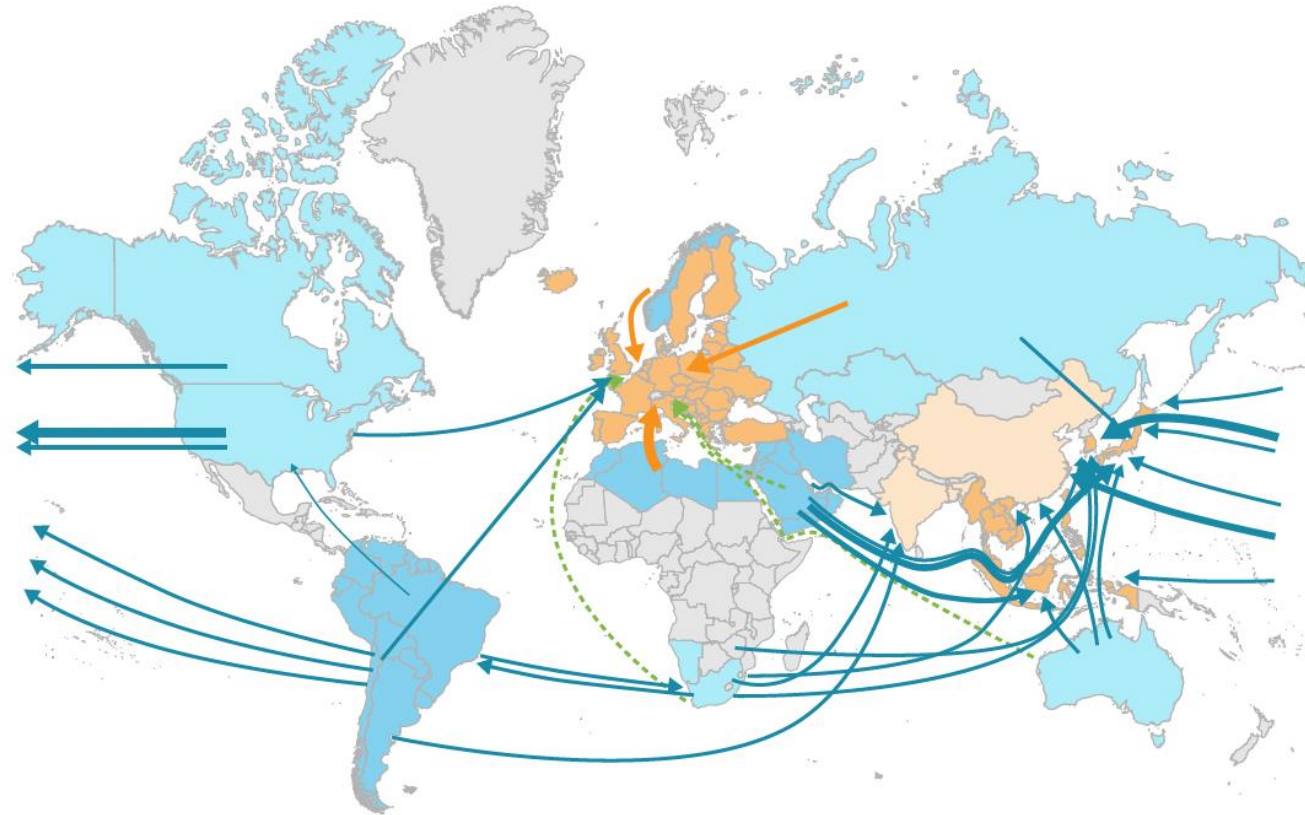


Cost category implications



Source: Hydrogen Council (2023)

Major flows of hydrogen and derivatives, million tons hydrogen equivalent in 2050



Source: Hydrogen Council (2023)



Faits et observations

Rôle validé dans les secteurs complexes à électrifier:

- industries lourdes
- métallurgie
- transport lourd et longue distance

Mise en garde sur les secteurs:

- du chauffage domestique
- du transport routier (« e-fuels »)

Potentiel de réchauffement climatique ignoré mais important !

AURORE RICHEL, PhD

Full Professor

University of Liège (Belgium)

a.richel@uliege.be

www.chem4us.be