

L'hydrogène, pourquoi, comment ?

Vincent Bizouard

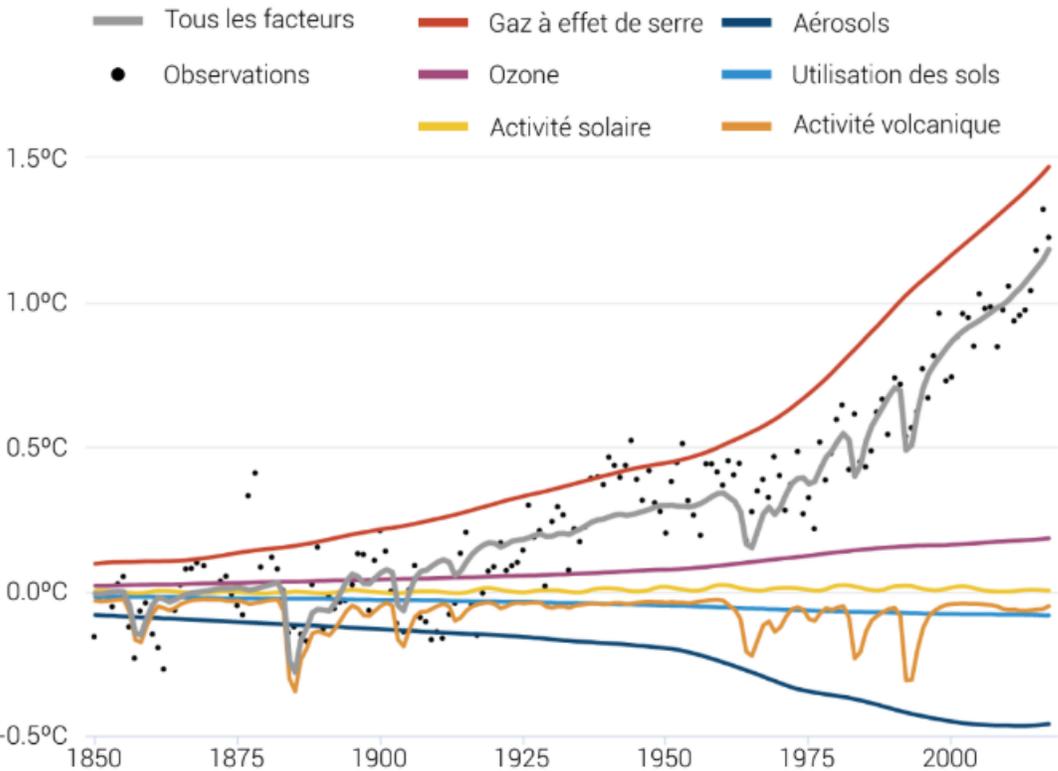


Sommaire

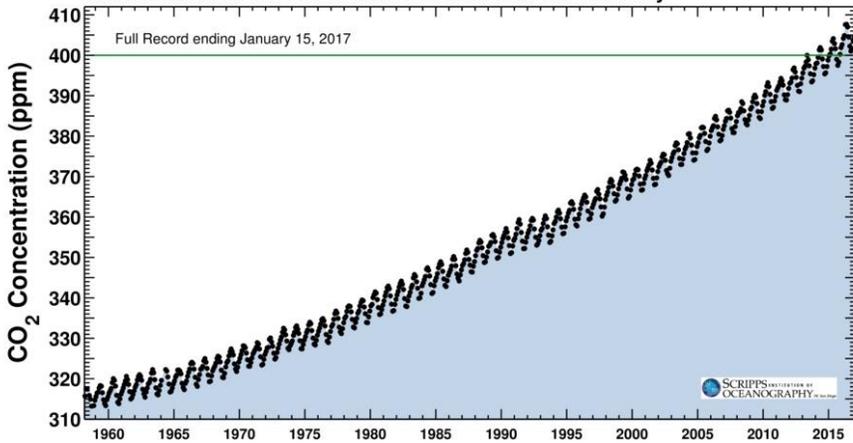
- ❑ Contexte
- ❑ L'hydrogène aujourd'hui
- ❑ L'hydrogène de demain :
 - La production
 - Le conditionnement
 - Les usages
- ❑ L'économie de l'hydrogène
- ❑ Défis de l'hydrogène

Contexte : réchauffement climatique

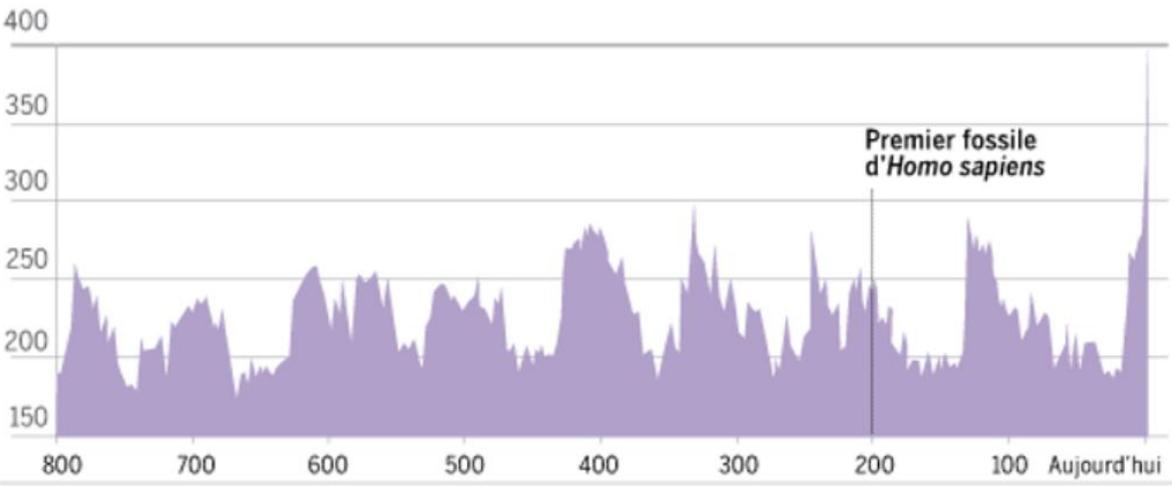
Température moyenne mondiale modélisation des différents facteurs 1850-2017



Latest CO₂ reading
January 15, 2017
405.71 ppm
Carbon dioxide concentration at Mauna Loa Observatory



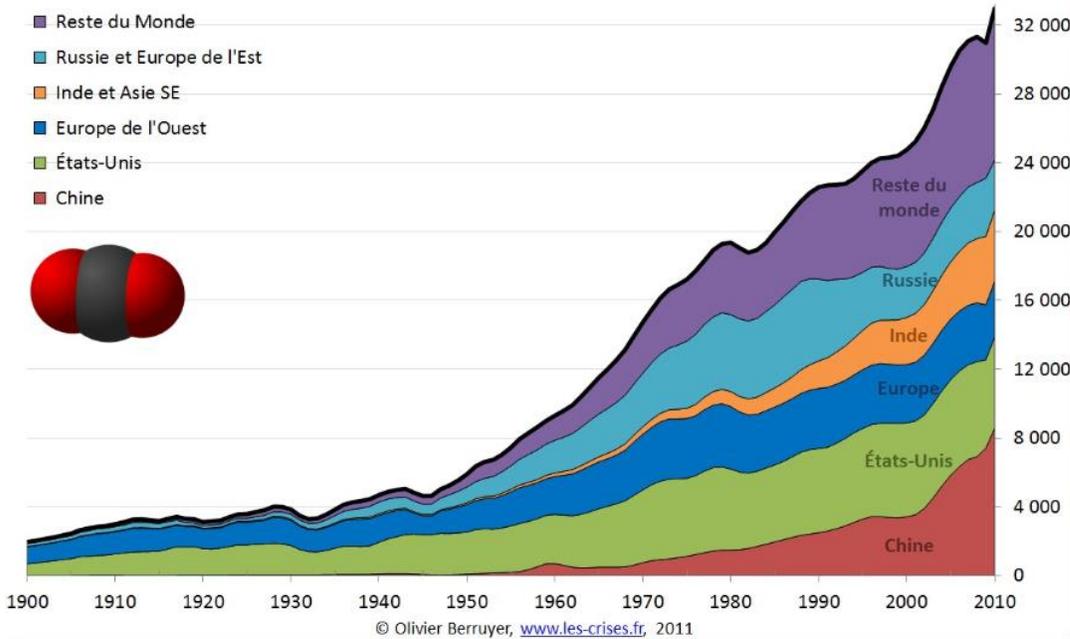
... DEPUIS 800 000 ans



SOURCES : UNIVERSITY OF CALIFORNIA, SAN DIEGO ; PNUE

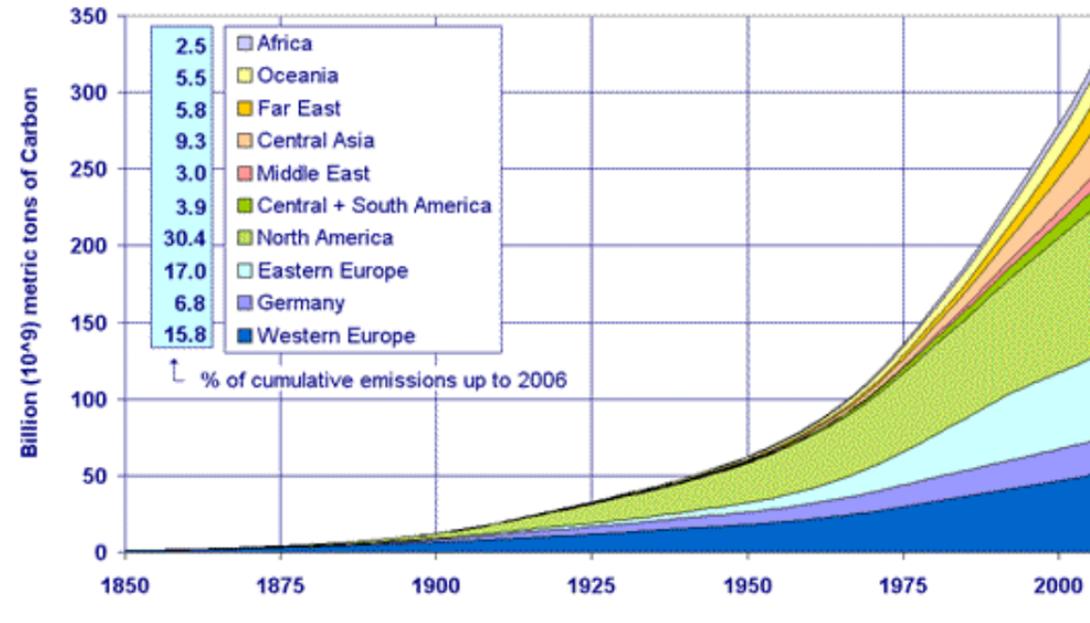
Contexte : réchauffement climatique

Émissions mondiales totales de CO₂ par combustion d'hydrocarbures, 1900-2010
(en millions de tonnes) (Sources : CDIAC puis EIA)



Cumulative Emissions of Carbon Dioxide and Percentage by Region: 1850-2006

Source of data: Carbon Dioxide Information Analysis Center, cited above.



► Quelques chiffres supplémentaires :

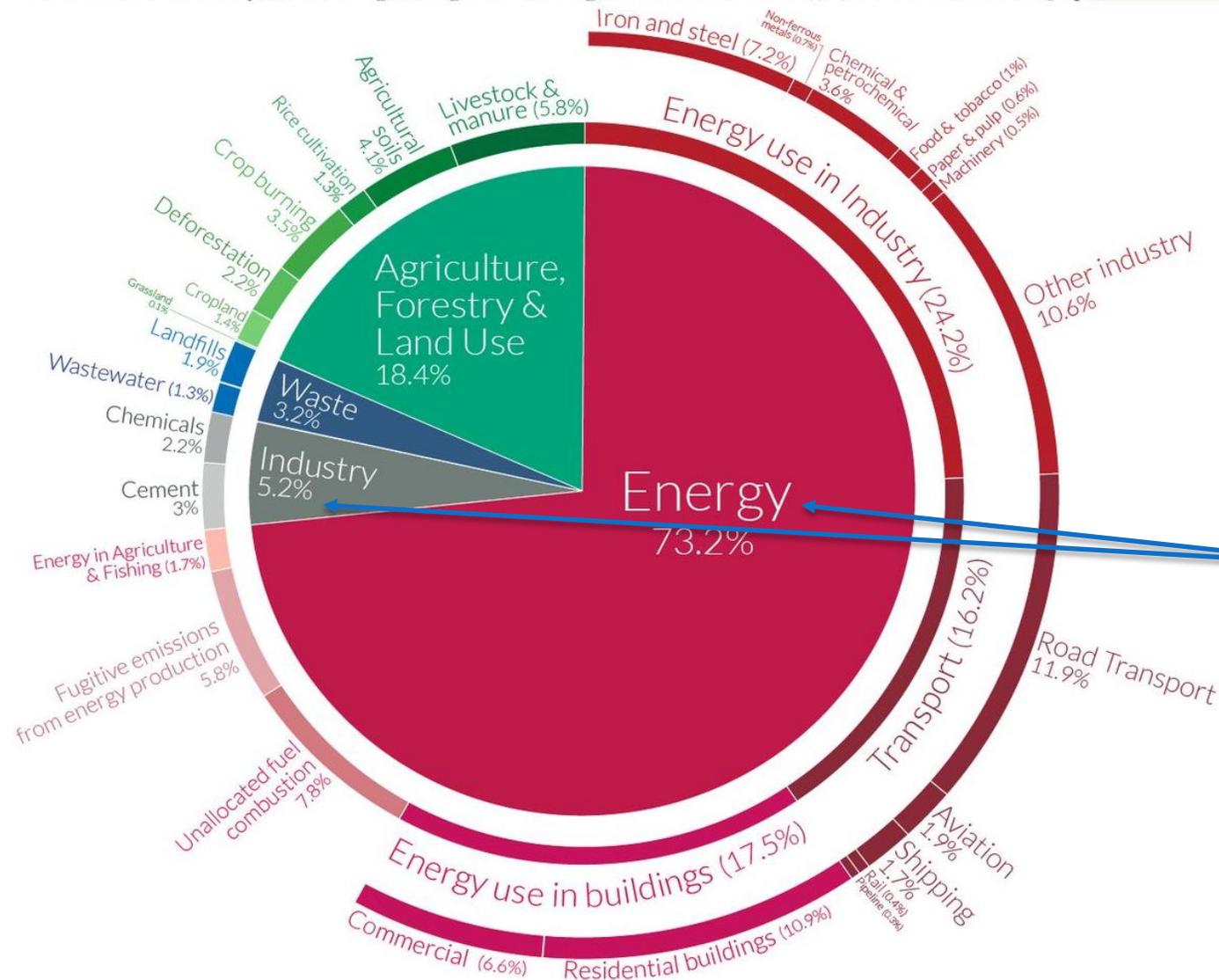
- Cumul émissions mondiales de CO₂ depuis 1900 : ~1200 milliards de tonnes
- Budget restant pour avoir 50% de chance de contenir le réchauffement sous 1,5° C : 350 milliards de tonnes.

Répartition des émissions par secteur

Global greenhouse gas emissions by sector

This is shown for the year 2016 – global greenhouse gas emissions were 49.4 billion tonnes CO₂eq.

Our World
in Data

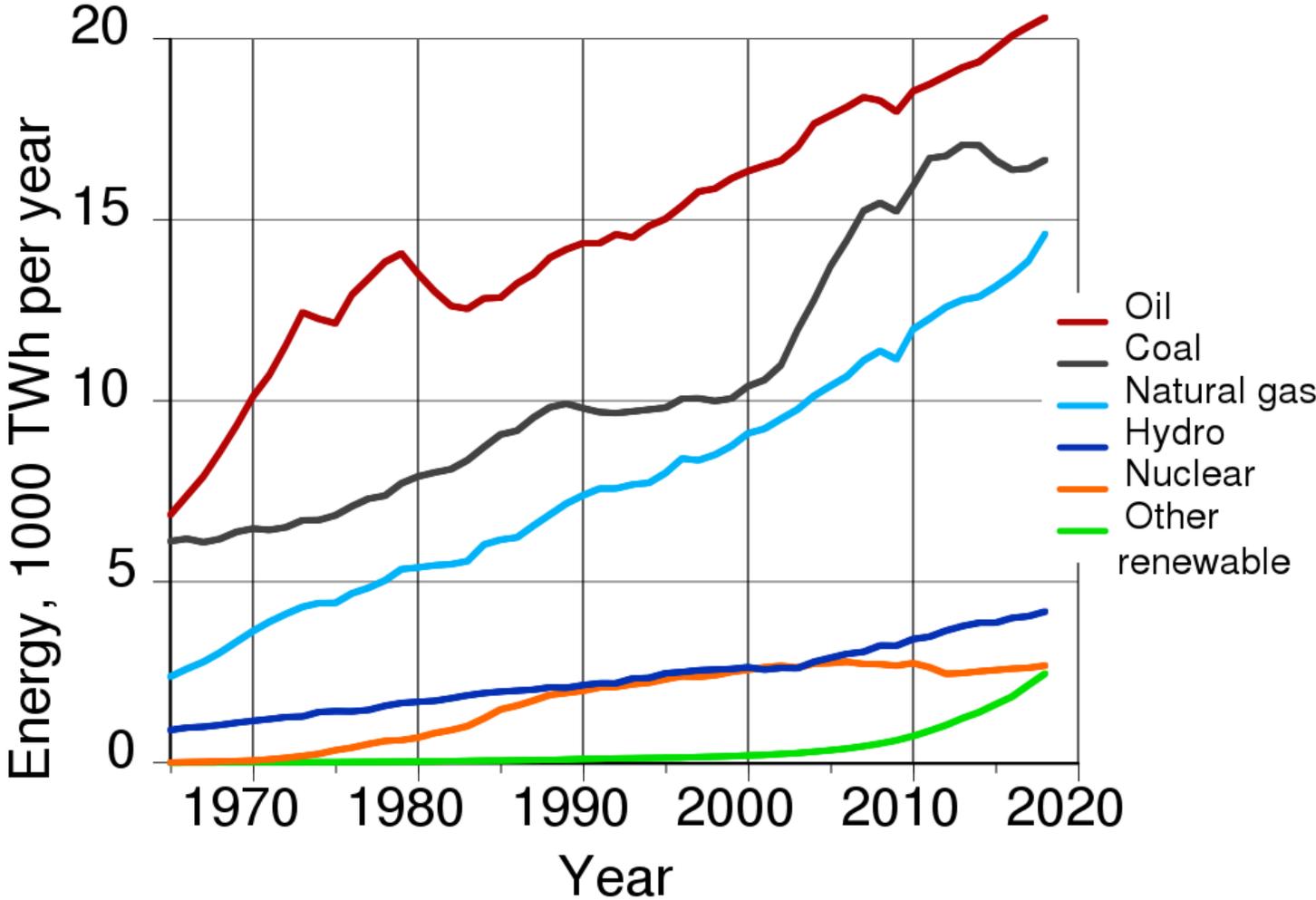


➤ **Fin de la récré : une transition énergétique s'impose (passer de 7 tCO₂/an/hab à moins de 2!)**

➤ **L'hydrogène a un rôle à jouer**

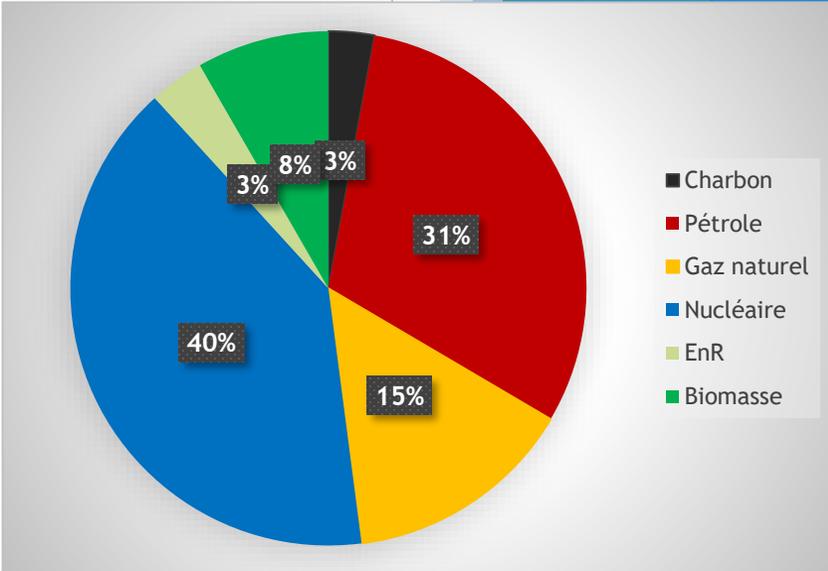
Vous avez dit transition énergétique ?

World energy consumption

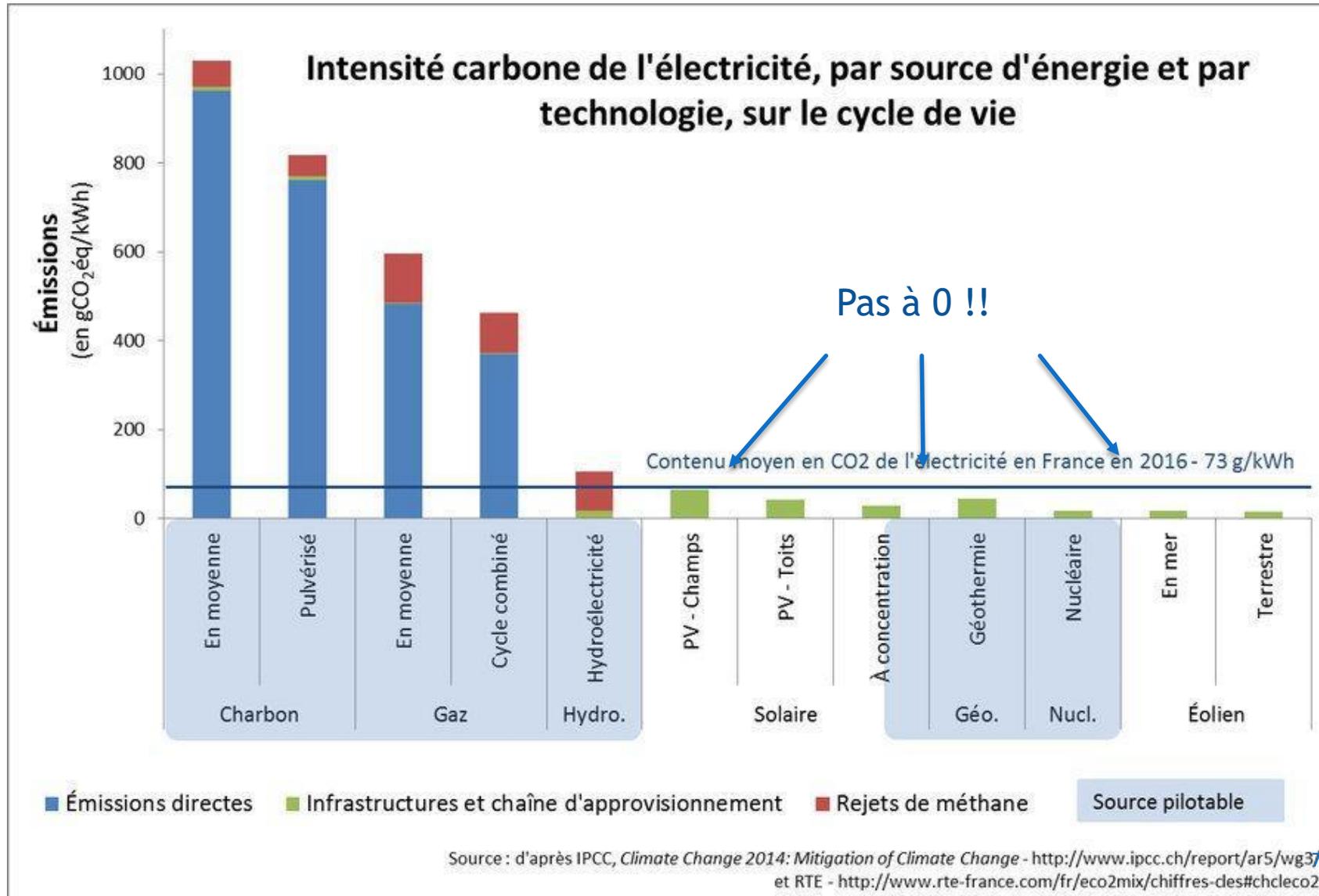


BP Statistical Review of World Energy 2017

En France, consommation énergétique primaire de 3000TWh (258Mtep) :



Vous avez dit transition énergétique ?



Vous avez dit transition énergétique ?

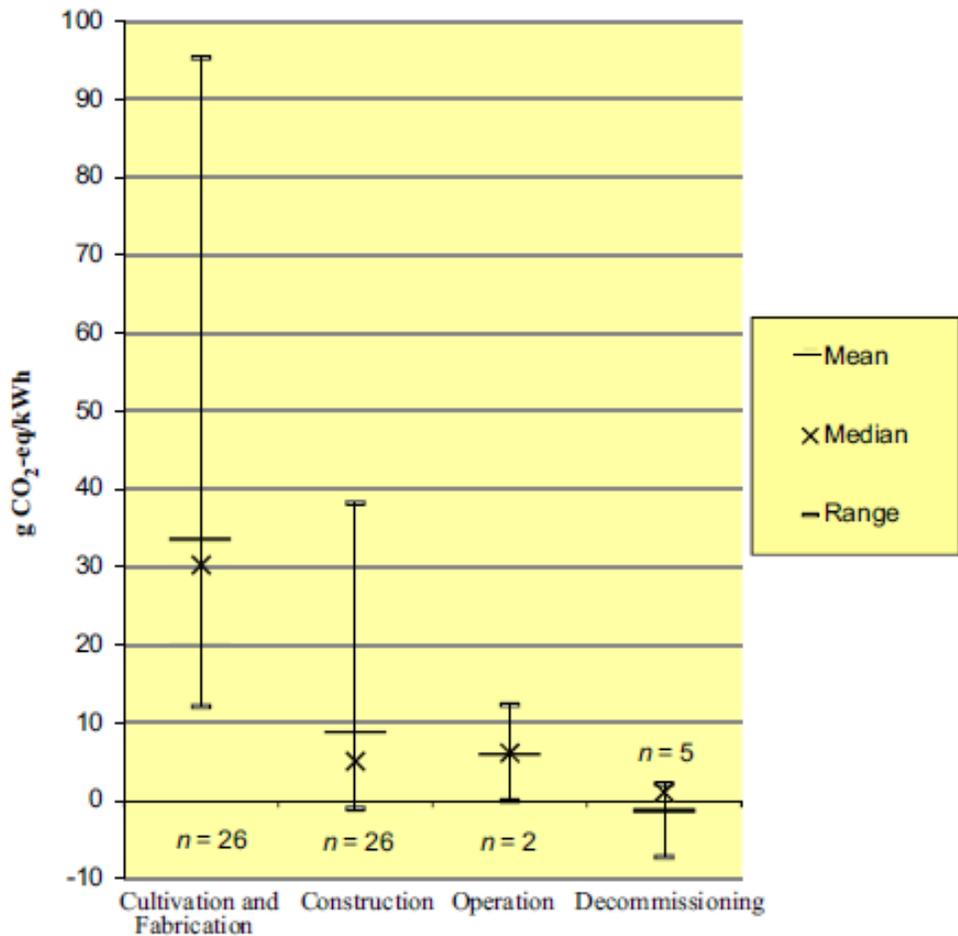


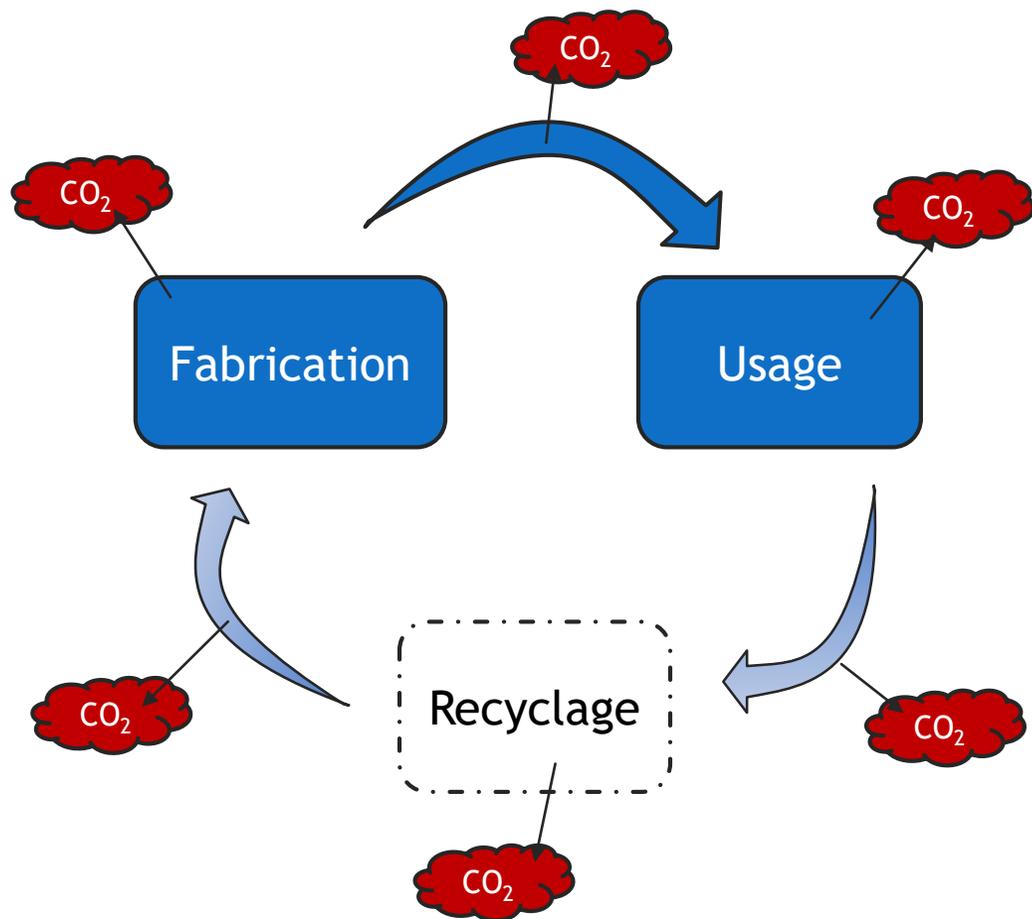
Fig. 4. Lifecycle greenhouse gas emissions for solar PV by lifecycle stage.

Source : Assessing the lifecycle GES from solar PV and wind energy, D.Nugent and B.K-Sovacool

- ▶ Les sources de production « vertes » sont construites à partir des énergies fossiles
- ▶ Nous sommes encore dans l'ère des énergies renouvelables fossiles.
- ▶ L'intermittence augmente encore le bilan carbone du fait du rendement et de la fabrication des moyens de stockage

Vous avez dit transition énergétique ?

Une machine aujourd'hui :



Un cercle vicieux :
Aucune machine ne peut être qualifiée aujourd'hui de 0 émission

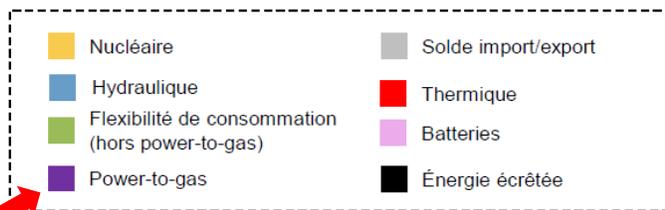
Comment rendre le cercle vertueux ?

- ✓ Décarbonation de la production électrique
- ✓ Décarbonation des transports
- ✓ Décarbonation de la chaleur

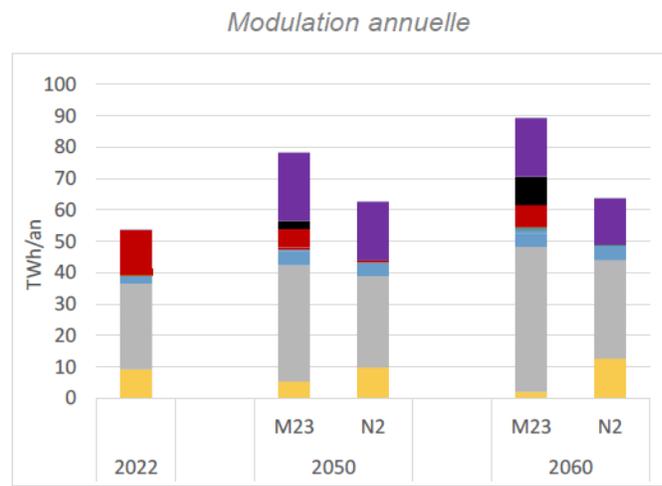
Besoin de stockage pour résoudre le problème de pilotabilité

Un réel besoin de stockage

- ▶ Plusieurs technologies de stockage existent. En terme de capacité de stockage, par ordre croissant :
 - ▶ Volants d'inertie (échelle de la seconde/minute)
 - ▶ Batteries (quelques heures)
 - ▶ Air comprimé (quelques jours)
 - ▶ STEP (95% du volume stocké)
- ▶ Aucune de ces technos n'est viable dans le cadre d'un stockage saisonnier, dont le besoin va fortement augmenter



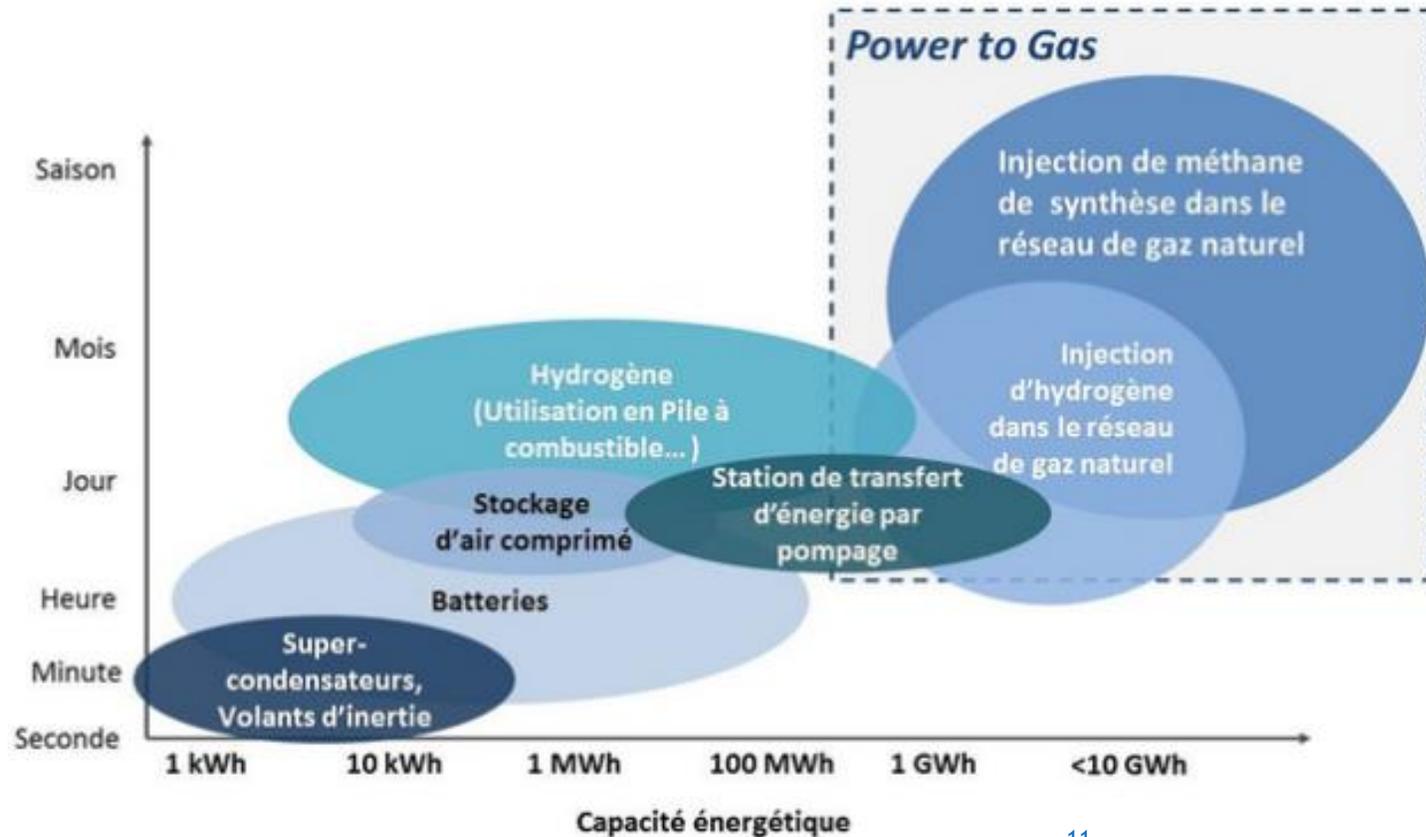
H_2



Source : RTE, Futurs énergétiques 2050

Un réel besoin de stockage

- ▶ L'hydrogène, couteau suisse du stockage :
 - ▶ Secteur électrique
 - ▶ Secteur des transports
 - ▶ Stockage de chaleur
- ▶ Réconciliation du secteur électrique et du secteur du gaz !
- ▶ Activation de tous les modes de stockage du gaz



Pourquoi l'hydrogène comme solution possible du stockage ?

- ▶ Principalement en raison de la réaction réversible suivante : $H_2 + \frac{1}{2}O_2 = H_2O$
- ▶ PCI-PCS : 33,3-39,4kWh/kg. En comparaison :

Combustible	PCI (kWh/kg)
Essence	13,1
Gaz naturel	13,9
Bois	4,2

- ▶ Réaction électrochimique : possibilité de récupérer de l'électricité (avec un certain rendement)
- ▶ Activation de tous les modes de stockage du gaz : des capacités de dizaines de TWh en Europe !

L'hydrogène pour décarboner l'industrie

- ▶ Secteur du ciment : 7% des émissions mondiales de CO₂

↳ dues au chauffage et décarbonatation du calcaire. 1 tonne de ciment = 1 tonne de CO₂ émise

➔ Possibilité de capter ce CO₂ et de le revaloriser sous forme de méthane à l'aide d'hydrogène : méthane de synthèse remplaçant le gaz naturel

- ▶ Acierie/sidérurgie : 7% des émissions mondiales de CO₂

↳ dues au chauffage et réduction du minerai à l'aide de charbon.

➔ Possibilité de réaliser ce chauffage et cette réduction avec de l'hydrogène

D'où vient l'hydrogène ?

- ▶ Au commencement était l'hydrogène : 75% en masse et 92% en nombre d'atomes, créé 100 secondes après le big bang lors de la nucléosynthèse primordiale
- ▶ Dans les conditions normales de température et de pression : présent essentiellement sous forme de dihydrogène H_2
- ▶ Sur Terre : il existe quelques sources d'hydrogène naturelle, aujourd'hui inexploitées ou presque. Sujet émergent

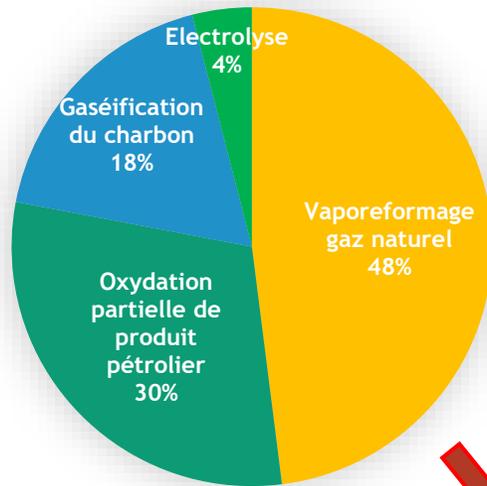
Il est donc nécessaire de le synthétiser...

→ de la manière la moins sale possible !

L'hydrogène aujourd'hui : la production

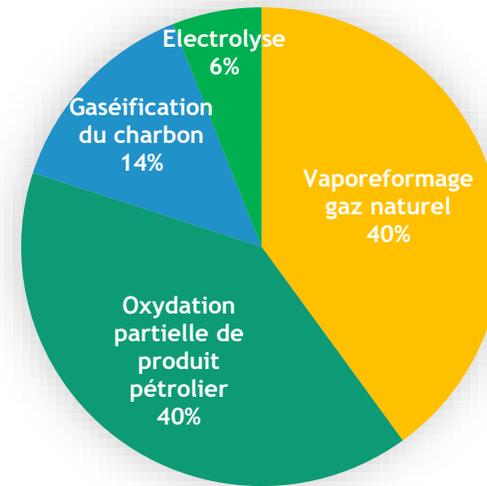
- ▶ Aujourd'hui, ~75 Mtonnes de H₂ produites par an pour des besoins industriels
- ▶ **MAIS 96%** de la production mondiale d'hydrogène est fossile !

A l'échelle mondiale



700 millions de tonnes de CO₂ /an : autant que l'aviation !

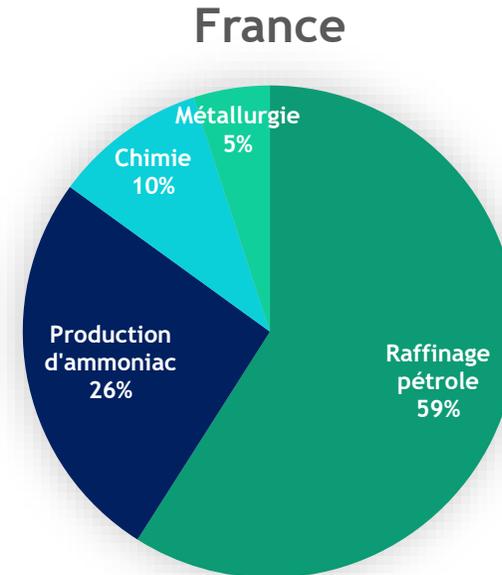
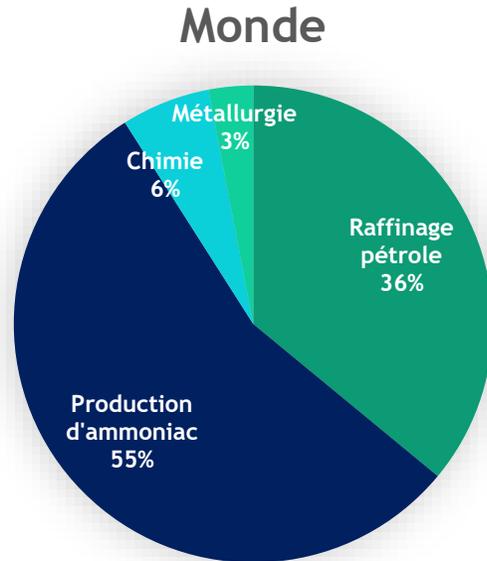
A l'échelle française



3% des émissions françaises de CO₂, plus de 10% des émissions de l'industrie !

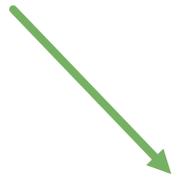
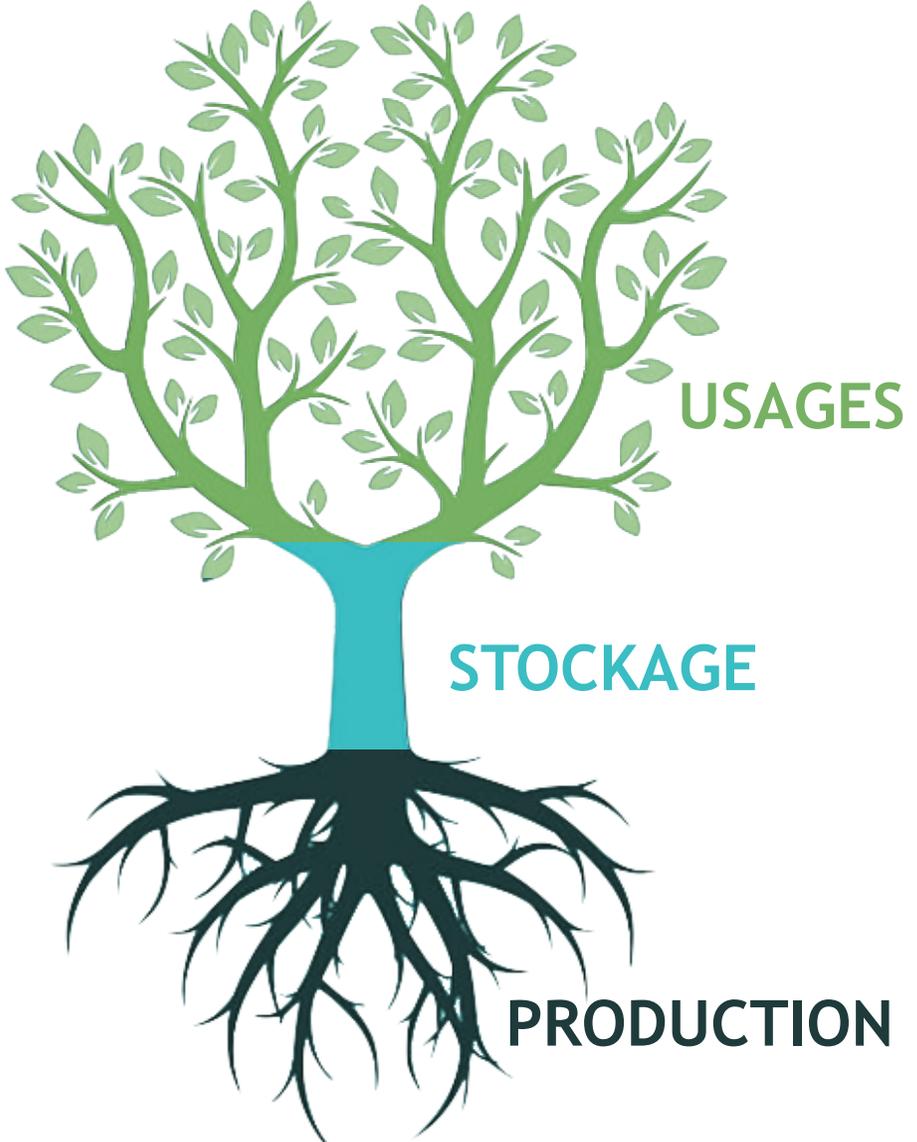
L'hydrogène aujourd'hui : la consommation

- ▶ Aujourd'hui, ~75 Mtonnes de H₂ produites par an pour des besoins industriels
- ▶ 96% de la production mondiale d'hydrogène est fossile



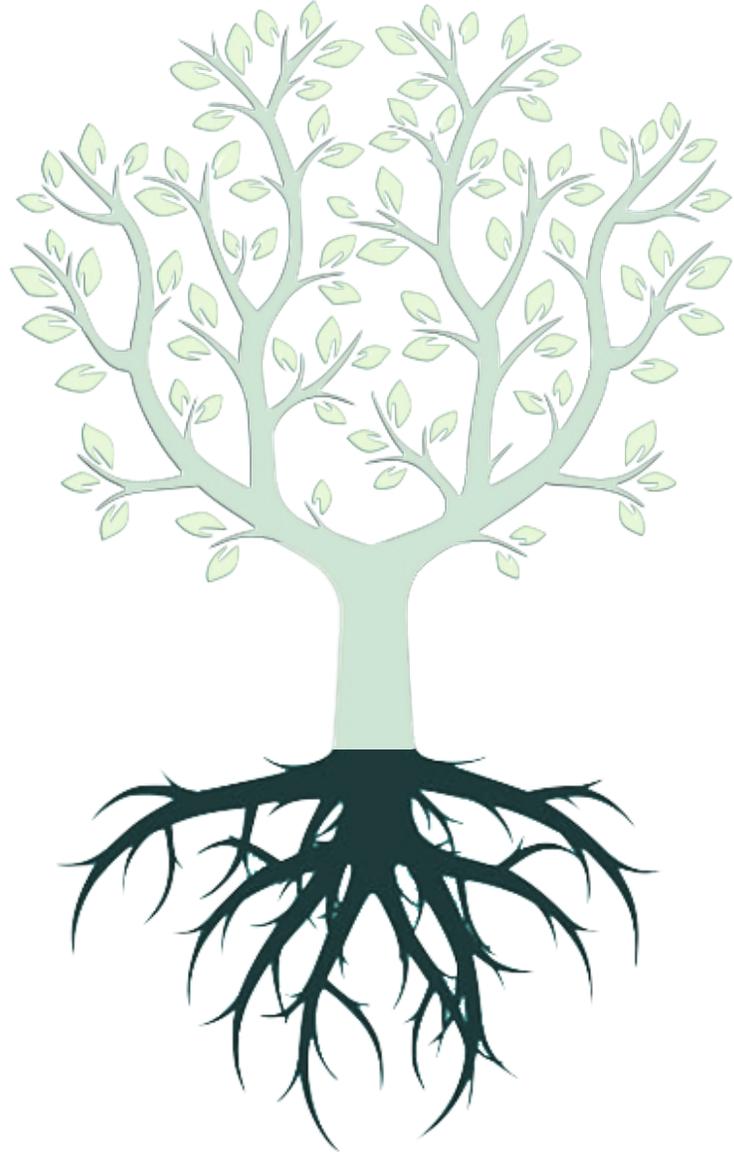
➔ Quel hydrogène pour demain ? Pour quelles applications ?

Le futur de l'hydrogène



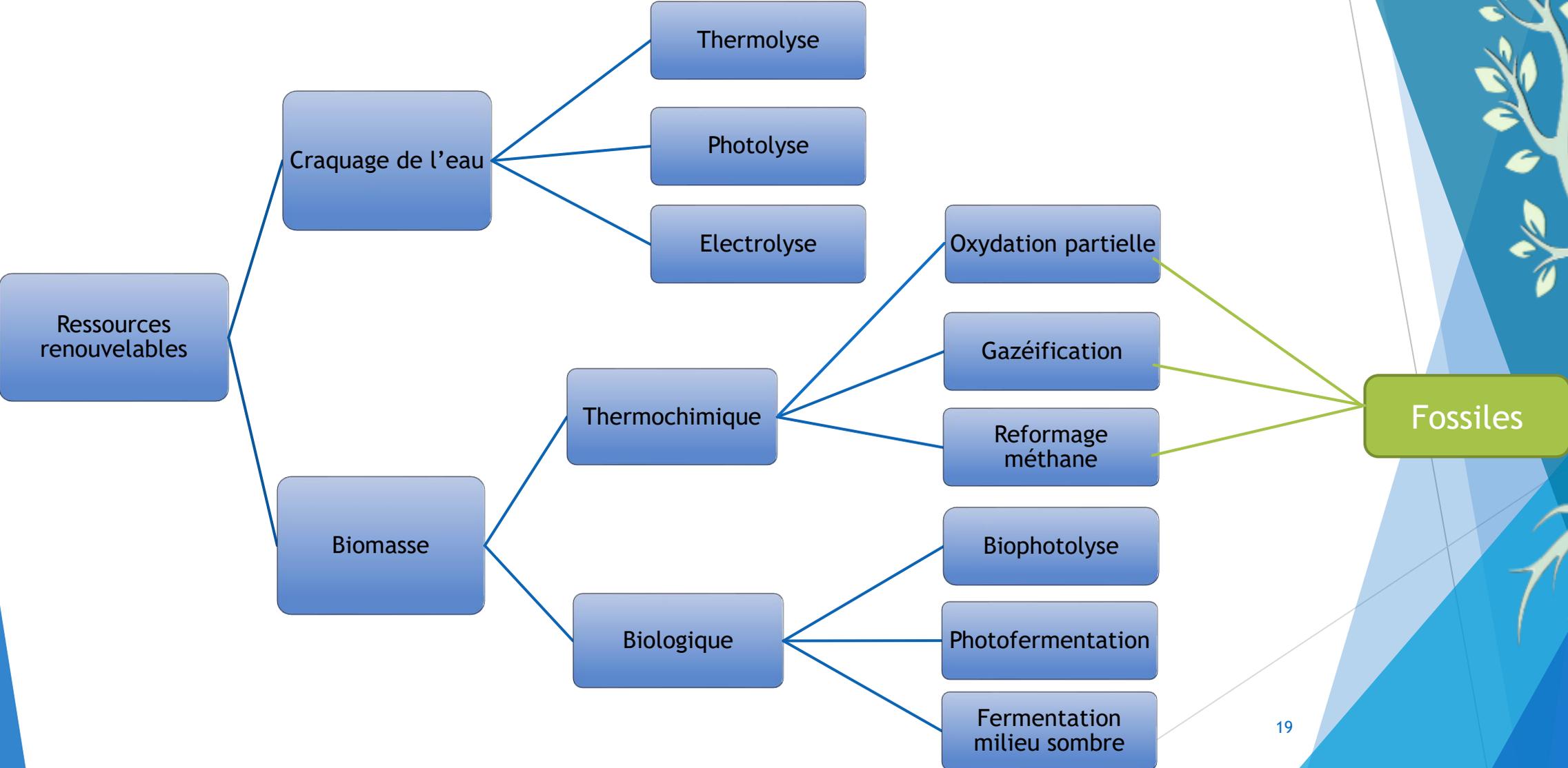
Des dizaines de possibilités à chaque fois... plus ou moins matures

Le futur de l'hydrogène : la production



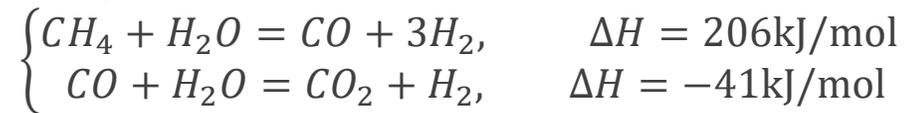
PRODUCTION

Production de l'hydrogène



Production de l'hydrogène : reformage du méthane

- ▶ Mode de production aujourd'hui majoritaire
- ▶ Réaction endothermique, réalisée à haute température (850 °C) et sous pression (15-40bar) :

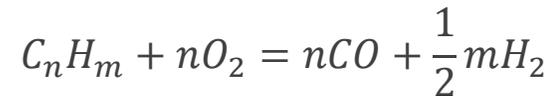


- ▶ Mélange H_2, CO_2, CO, CH_4 et H_2O en sortie -> filtration/purification nécessaire
- ▶ Apport de chaleur nécessaire (combustion de méthane, gaz résiduels)
- ▶ Emissions de CO_2 à la fabrication : ~10kgCO2/kgH2
- ▶ Nécessité de capter et stocker le CO_2



Production de l'hydrogène : oxydation partielle des hydrocarbures

- ▶ Second mode de production aujourd'hui majoritaire
- ▶ Réaction exothermique, réalisée à haute température (>1100°C) et sous pression (40-80 bar) :

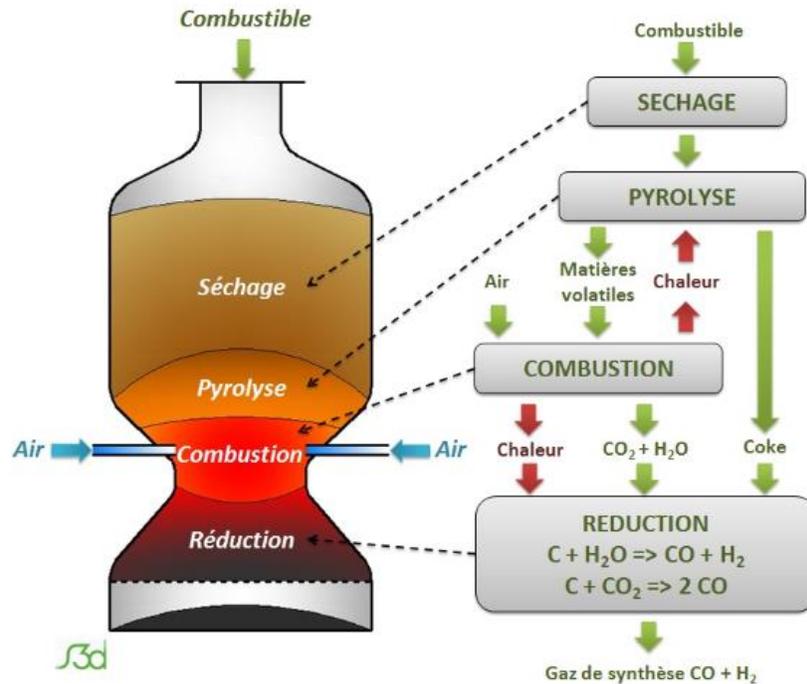


- ▶ Mélange H_2, CO_2, CO, C_nH_m et O_2 + gaz soufrés en sortie -> filtration/purification nécessaire
- ▶ C_nH_m : utilisation de résidus pétroliers
- ▶ Nécessite une séparation de l'oxygène à partir d'air : conso supplémentaire
- ▶ **Emissions de CO_2 à la fabrication : ~15kgCO2/kgH2**
- ▶ Nécessité de capter et stocker le CO_2



Production de l'hydrogène : gazification du charbon

► Usine à gaz :



• Pyrolyse / dévolatilisation

• Réactions homogènes

• Réactions hétérogènes

Biomasse	→	Goudrons (CH _x O _y) CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ , H ₂ O Carbone	
Goudrons	→	CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ , C _x H _y	
H ₂ + 0,5 O ₂	→	H ₂ O	-242 kJ.mol ⁻¹
CO + 0,5 O ₂	→	CO ₂	-283 kJ.mol ⁻¹
CH ₄ + 0,5 O ₂	→	CO + 2H ₂	-110 kJ.mol ⁻¹
CH ₄ + CO ₂	→	2CO + 2H ₂	+247 kJ.mol ⁻¹
CH ₄ + H ₂ O	→	CO + 3H ₂	+206 kJ.mol ⁻¹
CO + H ₂ O	→	CO ₂ + H ₂	-40,9 kJ.mol ⁻¹
C + O ₂	→	CO ₂	-393,5 kJ.mol ⁻¹
C + 0,5O ₂	→	CO	-123,1 kJ.mol ⁻¹
C + CO₂	→	2CO	+159,9 kJ.mol⁻¹
C + H₂O	→	CO + H₂	+118,5 kJ.mol⁻¹
C + 2H ₂	→	CH ₄	-87,5 kJ.mol ⁻¹

► Plus la pression de production est élevée, plus le rendement augmente

► Emissions de CO₂ à la fabrication : ~20kgCO₂/kgH₂, possibilité de rajouter une étape de stockage/séquestration de CO₂

Production de l'hydrogène : thermolyse

- ▶ Décomposition spontanée de l'eau à haute température
 - ▶ Sans étape intermédiaire, à plus de 2500°C
 - ▶ Possibilité de passer par des étapes intermédiaires pour abaisser la température, par exemple le cycle cuivre chlore à des températures inférieures à 500°C
- ▶ Rendements maximaux de 50%
- ▶ Technologies non matures aujourd'hui (problèmes de corrosion à haute température)
- ▶ Post 2030



Production de l'hydrogène : photolyse

- ▶ Conversion directe énergie solaire -> hydrogène (+oxygène)
 - ▶ Utilisation de semi-conducteurs (similaire PV)
 - ▶ Tension résultante utilisée pour craquer la molécule d'eau
- ▶ Beaucoup de recherches dans ce domaine :
 - ▶ Pour augmenter l'absorption lumineuse (spectre utilisé trop restreint)
 - ▶ Augmentation de la durée de vie
- ▶ Rendement de conversion solaire -> H_2 de l'ordre de 5%
- ▶ Coût trop élevé



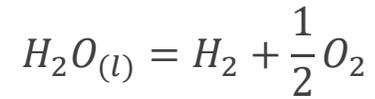
Production de l'hydrogène : à partir de biomasse

- ▶ Procédés similaires à ceux utilisés pour les hydrocarbures, mais qui se basent sur des éléments carbonés renouvelables plutôt que fossiles
 - ▶ Pyrolyse et gazéification de biomasse ligno-cellulosique : production de syngas puis filtration/purification
 - ▶ Pression généralement plus faible que l'analogie fossile (gravier) : rendement plus faible
 - ▶ Possibilité d'utiliser d'autres ressources également (biodiesel, bioglycérol,...)
 - ▶ Reformage de biogaz obtenu par fermentation de matières organiques
- ▶ Procédés biologiques :
 - ▶ Biophotolyse (algues, cyanobactéries)
 - ▶ Photofermentation (décomposition microbienne de matières organiques)
 - ▶ Fermentation milieu sombre
 - ▶ Rendements et débits faibles

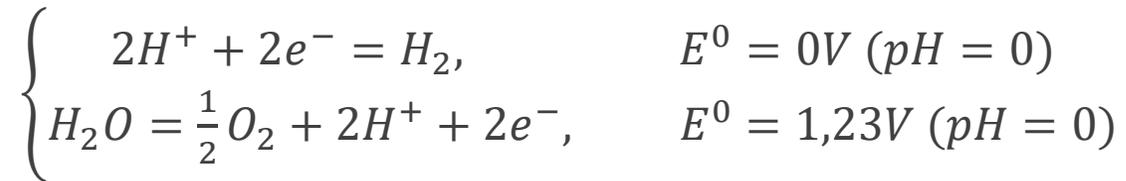


Production de l'hydrogène : par électrolyse

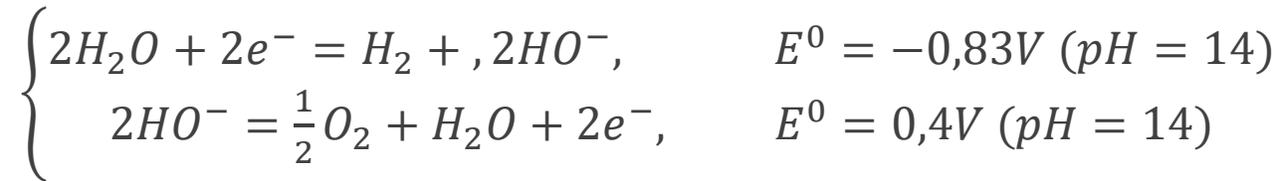
- Craquage de l'eau :



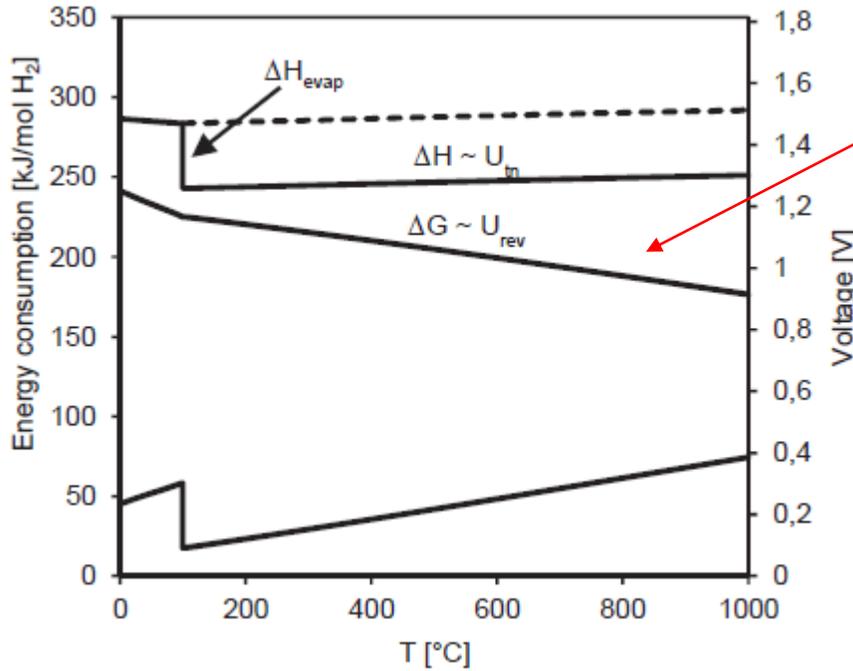
- En milieu acide :



- En milieu basique :

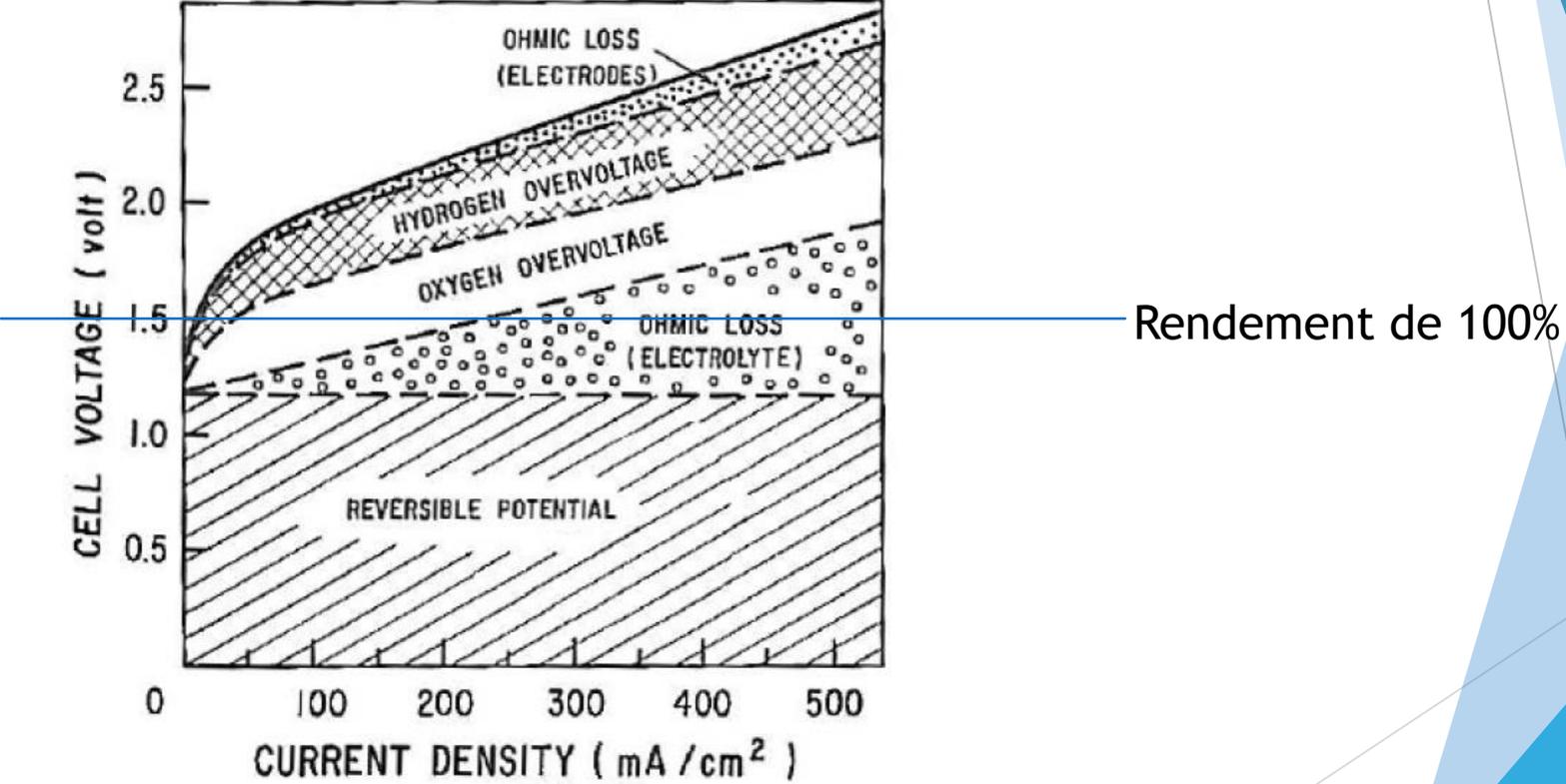


Production de l'hydrogène : par électrolyse



Electrolyse haute température

Production de l'hydrogène : par électrolyse



Production de l'hydrogène : par électrolyse

	AEC	PEMEC	SOEC
Electrolyte	Aq. potassium hydroxide (20–40 wt% KOH) [9,32,33]	Polymer membrane (e.g. Nafion) [33,34]	Yttria stabilised Zirconia (YSZ) [37,38]
Cathode	Ni, Ni-Mo alloys [9,32,33]	Pt, Pt-Pd [34]	Ni/YSZ [37,38]
Anode	Ni, Ni-Co alloys [9,32,33]	RuO ₂ , IrO ₂ [34]	LSM ^b /YSZ [37,38]
Current density (A cm ⁻²)	0.2–0.4 [34]	0.6–2.0 [34]	0.3–2.0 [9,38]
Cell voltage (V)	1.8–2.4 [34]	1.8–2.2 [34]	0.7–1.5 [38]
Voltage efficiency (% _{HHV})	62–82 [34]	67–82 [34]	<110 [33]
Cell area (m ²)	<4 [33]	<0.3 [33]	<0.01 [33]
Operating Temp. (°C)	60–80 [34]	50–80 [34]	650–1000 [37,38]
Operating Pressure (bar)	<30 [33]	<200 [33]	<25 [33]
Production Rate ^c (m ³ _{H2} h ⁻¹)	<760 [33]	<40 [33]	<40 [33]
Stack energy ^c (kWh _{el} m ³ _{H2} ⁻¹)	4.2–5.9 [34]	4.2–5.5 [34]	>3.2 [33]
System energy ^c (kWh _{el} m ³ _{H2} ⁻¹)	4.5–6.6 [16]	4.2–6.6 [16]	>3.7 (>4.7) _{kWh_energy^a}
Gas purity (%)	>99.5 [32]	99.99 [33]	99.9 ^a
Lower dynamic range ^d (%)	10 – 40 [33,34]	0 – 10 [34]	>30 ^a
System Response	Seconds [33]	Milliseconds [33]	Seconds ^a
Cold-start time (min.)	<60 [16]	<20 [16]	<60 ^a
Stack Lifetime (h)	60,000–90,000 [16]	20,000–60,000 [16]	<10,000 ^a
Maturity	Mature	Commercial	Demonstration ^a
Capital Cost (€ kW _{el} ⁻¹)	1000–1200 [16]	1860–2320 [16]	>2000 [16]

Et les émissions de CO_2 dans tout ça ?

► Hypothèse : $60\text{kWhe}/\text{kg}_{H_2}$

	Bilan élec ($\text{g}_{CO_2}/\text{kWhe}$)	Bilan H_2 ($\text{kg}_{CO_2}/\text{kg}_{H_2}$)
Nucléaire (français)	~6	0,4
Eolien, hydroélec	~10-15	~0,6-0,9
Solaire (français)	~40	~2,4
gaz	~400	~24
charbon	~1000	~60
H_2 SMR		~10



Nécessité de tracer l'hydrogène... si on ne veut pas que l'hydrogène « vert » soit plus gris que le gris !

Production de l'hydrogène : en résumé

Les modes de production d'hydrogène bas carbone et renouvelable

Mode de production d'hydrogène	Hydrogène carboné	Hydrogène bas carbone	Hydrogène renouvelable	Maturité de la techno
⚡ Electrolyse de l'eau avec électricité renouvelable			✓	En cours d'industrialisation
⚡ Electrolyse de l'eau avec électricité bas carbone		✓		
⚡ Electrolyse de l'eau avec électricité carbonée	✓			Industrielle
🏭 Reformage du méthane contenu dans le gaz naturel, <u>sans</u> CCS/CCU	✓			
🏭 Reformage du méthane contenu dans le gaz naturel, <u>avec</u> CCS/CCU		✓		CCU : Industrialisé CCS : Ind. en cours
🏭 Reformage du biométhane, avec ou sans CCS/CCU			✓	Technologie mature mais pas de projet à grande échelle
🏭 Craquage/pyrolyse du méthane contenu dans le gaz naturel		✓		En cours d'industrialisation
🏭 Craquage/pyrolyse du biométhane			✓	Technologie mature mais coûts élevés
🏭 Gazéification du charbon <u>sans</u> CCS/CCU				Industrielle
🏭 Gazéification du charbon <u>avec</u> CCS/CCU		✓		Technologie mature mais pas de projet à grande échelle
🏭 Gazéification de la biomasse ou de déchets		✓	OU ✓	En cours de démonstration
🏭 Valorisation d'hydrogène fatal		✓		Industrielle

H2 vert

H2 rose

H2 gris

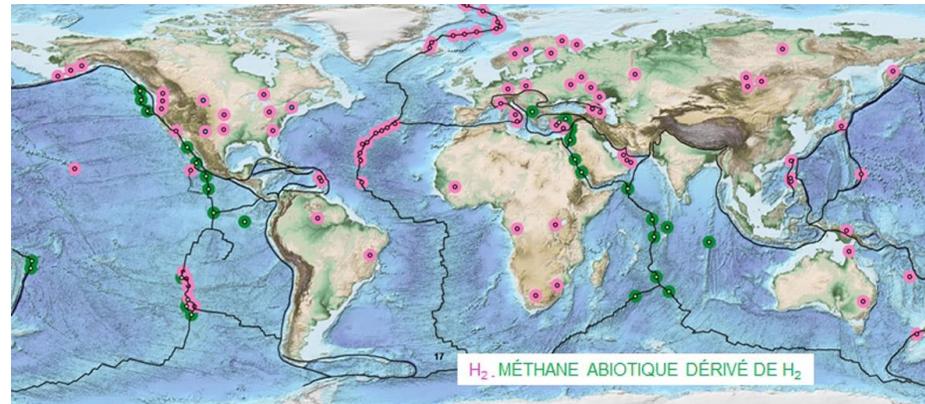
H2 bleu

H2 turquoise

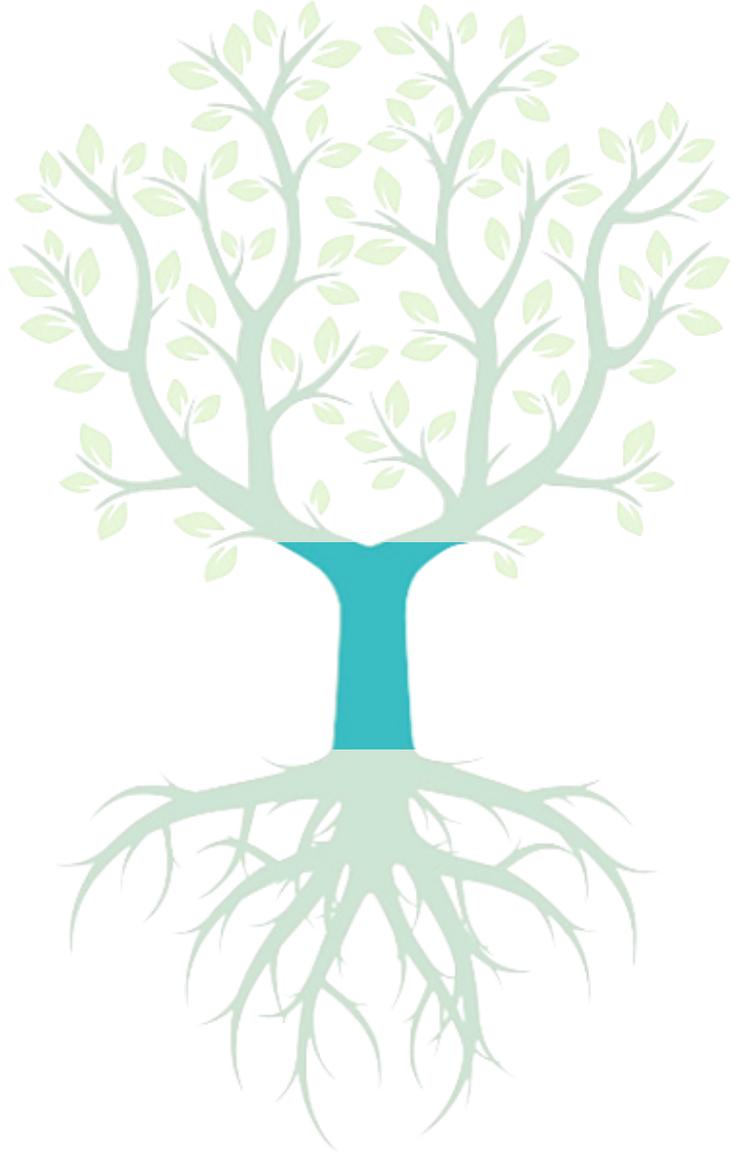
Attention avec les appellations « énergies vertes »... la seule énergie verte est celle qu'on ne consomme pas

Et l'hydrogène naturel dans tout ça ?

- ▶ Découverte de flux naturel d'hydrogène
- ▶ Formé par diagenèse ou radiolyse
- ▶ Des gisements avec des débits compris entre 50 et 2000kg/j/km²
- ▶ Hydrogène généralement associé à de l'hélium ou du méthane
- ▶ Puits déjà utilisé commercialement au Mali : 10 années d'exploitation sans perte de pression
- ▶ Reste très prospectif à ce jour



Le futur de l'hydrogène : conditionnement



STOCKAGE

Stockage de l'hydrogène

- ▶ Très forte densité énergétique massique, mais très faible densité volumique à pression atmosphérique !

Combustible	PCI (kWh/kg)	PCI (kWh/L)
Essence	13,1	9,2
Diesel	13,9	11,1
Gaz naturel (1bar)	4,2	0,009
Hydrogène (1bar)	33,3	0,0027

- ▶ Nécessité de le stocker autrement...



Stockage de l'hydrogène

- ▶ Première possibilité : garder le vecteur H_2 mais le comprimer et/ou refroidir ou le liquéfier

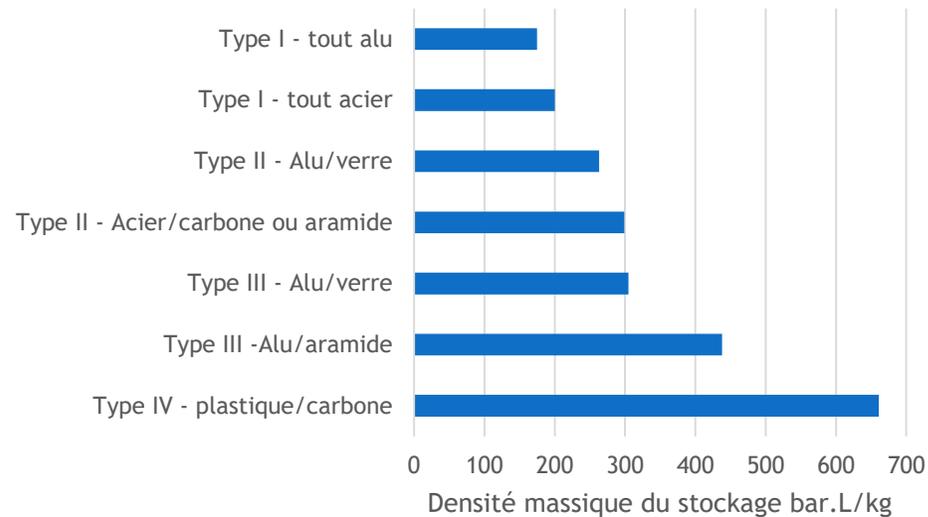
Type stockage	PCI (kWh/L)	Surcout énergétique (kWh/kgH ₂)
1 bar, 298K	0,0027	
700 bar, 298K	1,3	5-8 (+10-15%)
Liquide, -253° C	2,0	8-15 (+15-30%)
Cryo-compressé : 300bar, -235° C	2,25	

- ▶ A titre de comparaison, la Toyota Mirai : 5kg de H₂ embarqué à 700bar, pour un volume de 125L et 500km d'autonomie
- ▶ Aujourd'hui en Europe, la majeure partie de l'hydrogène est stocké sous pression



Stockage de l'hydrogène : les réservoirs

- ▶ 4 types de réservoir :



- ▶ Auxquels s'ajoutent le stockage en cavités souterraines et dans les pipes

Stockage de l'hydrogène : les solutions alternatives

- ▶ Hydrures métalliques : absorption puis réaction d'hydruration dans des métaux (Pd, Al, La, alliages,...) :
 - ▶ Peuvent stocker l'hydrogène jusqu'à 5,5% de leur masse
 - ▶ Nécessitent un apport de chaleur pour la désorption
- ▶ Transporteur d'hydrogène organique liquide (LOHC)
 - ▶ Réaction avec des liquides organiques
 - ▶ Nécessitent également un apport de chaleur pour la récupération
- ▶ Stockage sous forme d'ammoniac ou de méthanol
- ▶ Adsorption dans des poreux (MOF, zéolithes) : encore au stade fondamental



Transport de l'hydrogène

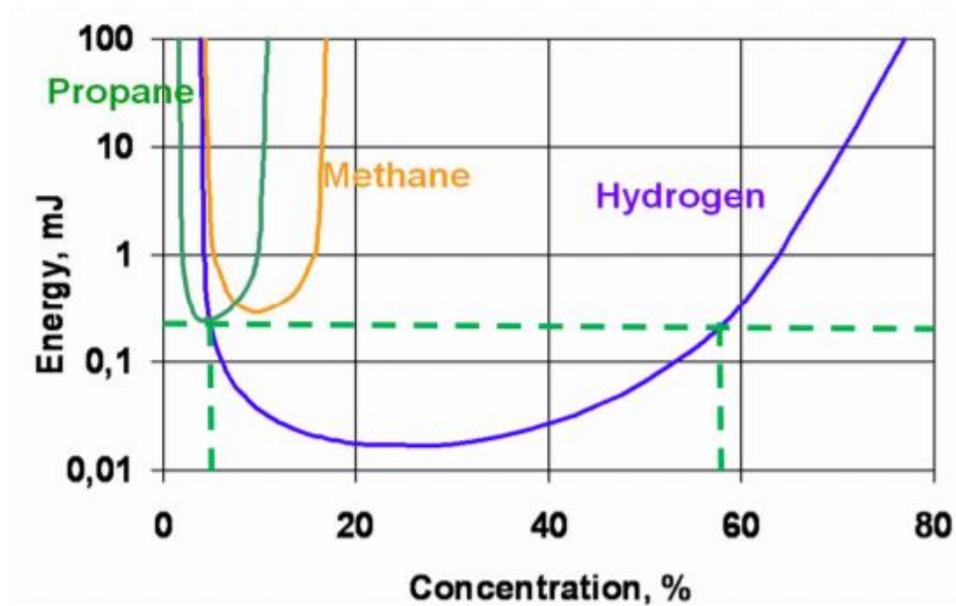
Augmente de 50% le bilan carbone (dans le cas de l'hydrogène craqué)



- ▶ Transport par camion :
 - ▶ Cadres de 9, 18 ou 28 cylindres : en France, B50 à 200bar : ~800g de H_2
 - ▶ Tube trailers : entre 320kg (200bar) et 1 tonnes (500bar) de H_2 transporté
 - ▶ Hydrogène liquide : jusqu'à 4 tonnes
- ▶ Transport par bateau :
 - ▶ Sous forme liquide
 - ▶ Quelques projets : approvisionnement du Japon par de l'hydrogène australien
- ▶ Pipeline :
 - ▶ Le plus économique pour les plus gros consommateurs
 - ▶ 1600km de pipes en Europe de l'Ouest
 - ▶ Depuis 1938 sans aucun incident

Sécurité

- ▶ Plage d'inflammabilité étendue, de 4 à 75% dans l'air :



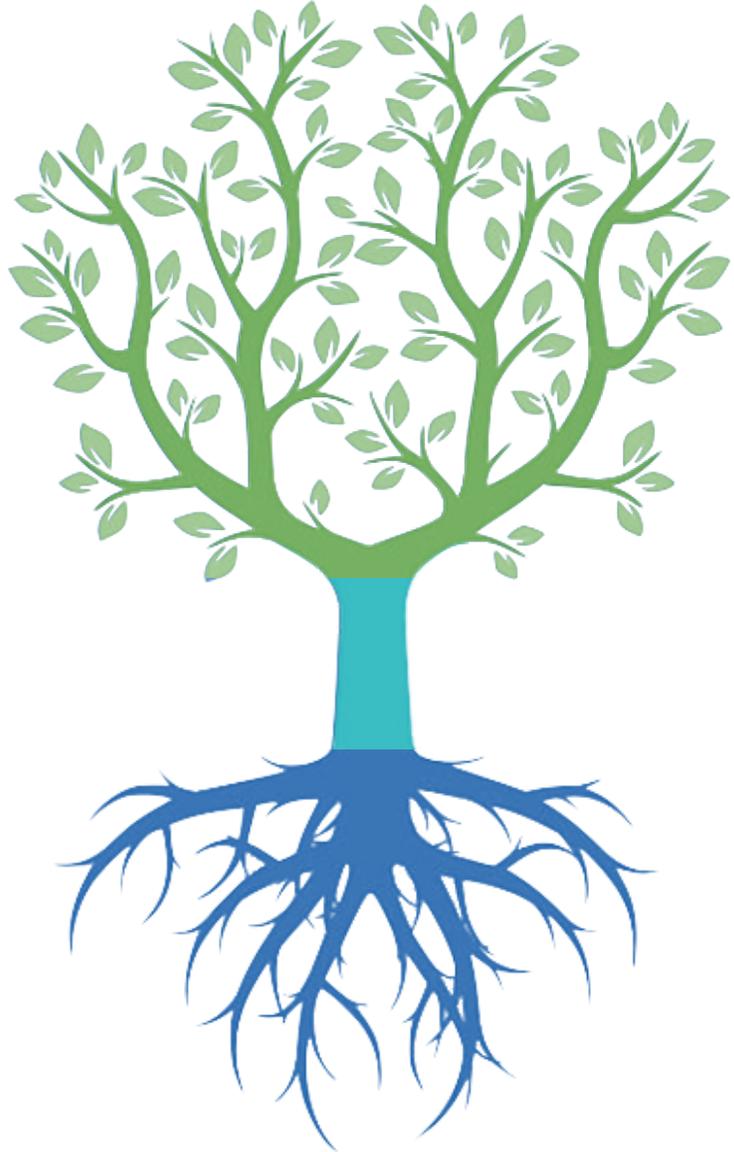
- ▶ Température de flamme : 2000° C
- ▶ Peu d'énergie transmise par rayonnement : risque de propagation faible

Accidentologie de l'hydrogène

- ▶ Dans plus de 70% des cas, les facteurs organisationnel et humain sont les causes de l'accident (maintenance, défaut de maîtrise des procédés)
- ▶ Dans 21% des accidents, l'hydrogène est généré accidentellement (corrosion des aciers, réaction eau/métal, réactions chimiques avec des hydrures) : risque généralement non pris en compte
- ▶ 84% des accidents sont des incendies ou explosions
- ▶ Maîtrise du risque :
 - Très bonne diffusivité dans l'air : très peu de risque en milieu extérieur. Ventilation/capteurs à prévoir en milieu confiné
 - Sensibilisation (mauvaise image)



Le futur de l'hydrogène: Usages



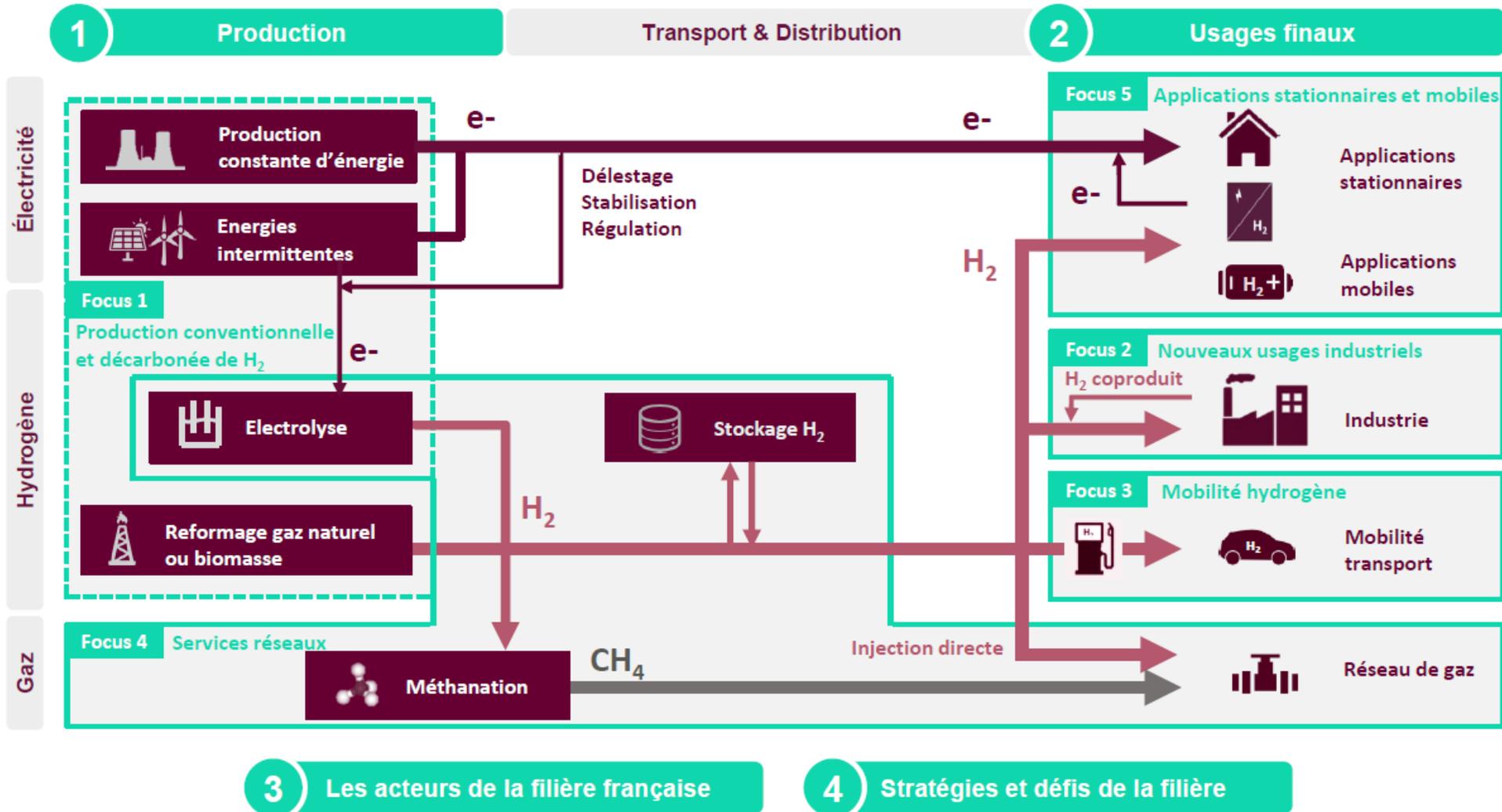
USAGES

L'hydrogène, pourquoi ? 3 usages principaux

- ▶ Hydrogène industrie : la filière historique déjà établie
 - ▶ À 95% produit à partir de fossile...
- ▶ Hydrogène mobilité, en pleine expansion : du vélo à l'avion...
 - ▶ Dans un but de décarbonation des transports
- ▶ Hydrogène énergie, power-to-gas : réconciliation du secteur électrique et du secteur gazier
 - ▶ Solution possible au problème du stockage...



L'hydrogène, pourquoi ? 3 usages principaux



Hydrogène industrie

▶ Filières existantes :

- ▶ Fabrication de l'ammoniac (55% de la demande mondiale actuelle) : utile pour la fabrication d'engrais, d'explosifs ou comme réfrigérant



- ▶ Désulfuration du pétrole (30% de la demande actuelle) : substitution du soufre par de l'hydrogène → besoin amené à disparaître (normalement...)

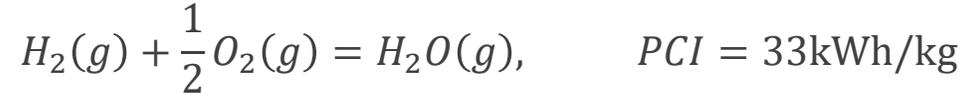
▶ Nouveaux usages liés à la volonté de décarbonation

- ▶ Sidérurgie : possibilité de remplacer la réduction du minerai ferreux avec du charbon par de la réduction avec de l'hydrogène
- ▶ Captage de CO2 en valorisant l'oxygène coproduit par oxydation : 1Mt H2 = potentiel de capter 11Mt CO2 (3% des émissions françaises)
- ▶ Fabrication d'ammoniac... mais pour le transport : les compétences industrielles peuvent être utilisées

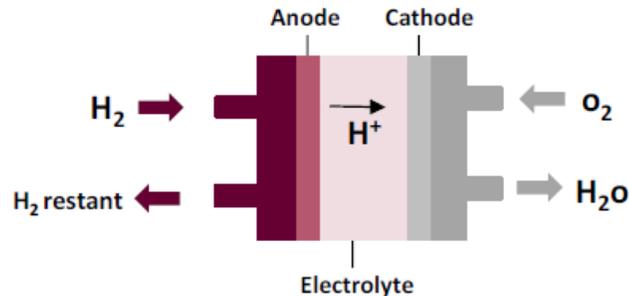


Hydrogène mobilité

- ▶ Recombinaison de l'hydrogène avec l'oxygène de l'air :

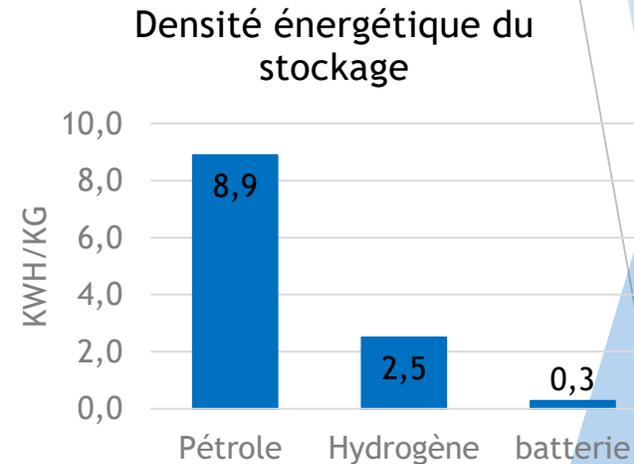


- ▶ Effectué à l'aide d'une pile à combustible : rendement ~50% sans valorisation de la chaleur



- ▶ Avantages par rapport aux véhicules à batterie :

- ▶ Temps de recharge court (quelques min)
 - ▶ Découplage puissance/énergie : plus longue autonomie
 - ▶ Production de l'hydrogène en temps masqué : gestion réseau simplifiée
 - ▶ Poids plus faible
- ▶ Technologie complémentaire des batteries



Hydrogène mobilité : voitures

- ▶ Hydrogène stocké à 700bar : 5kg aujourd'hui
- ▶ Consommation d'une citadine : ~15kWh/100km → ~1kgH₂/100km
- ▶ Première génération de véhicules depuis 2015 chez les constructeurs asiatiques. Seconde génération annoncée (meilleur rendement, meilleure autonomie)
- ▶ Certains constructeurs européens s'y mettent
- ▶ En France : kangoo ZEH₂ de Renault en partenariat avec Symbio-Fcell
- ▶ Des véhicules encore très chers : 75k€ pour la Mirai → effet d'échelle nécessaire
- ▶ Toyota annonce un prix de vente équivalent à ses hybrides à l'horizon 2025



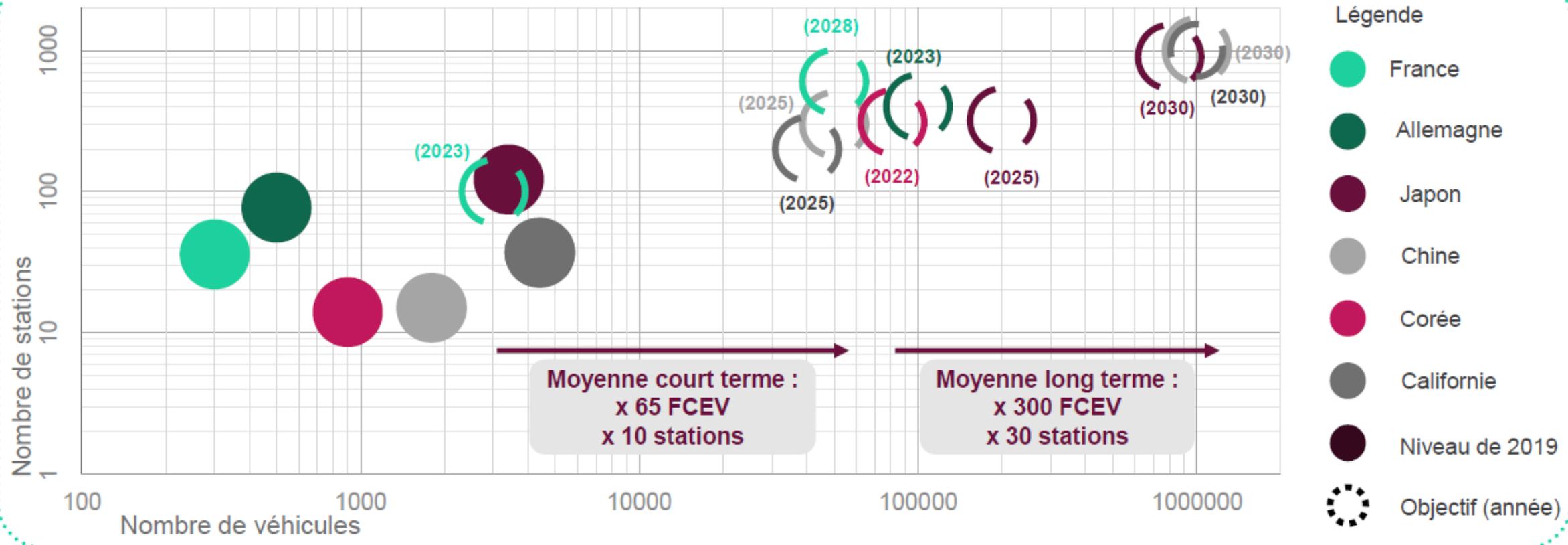
Hydrogène mobilité : et les stations ?

- ▶ Problème de la poule et de l'oeuf
- ▶ Caractéristiques d'une station :
 - ▶ Production H_2 sur site (à terme)
 - ▶ Compresseurs : essentiellement mécaniques.
 - ▶ Stockage intermédiaire (jusqu'à 1000bar pour les stations 700 bar)
 - ▶ Gestion thermique : l'hydrogène chauffe beaucoup quand il est comprimé. Ne doit pas dépasser 80°C dans les réservoirs. Nécessite plusieurs étages de compression.
 - ▶ Distributeur
- ▶ De 100g à plusieurs tonnes de H_2 par jour



Hydrogène mobilité : voitures

Comparatif des différents objectifs de déploiement de la mobilité routière hydrogène



Source : Analyse SIA partners, 2020

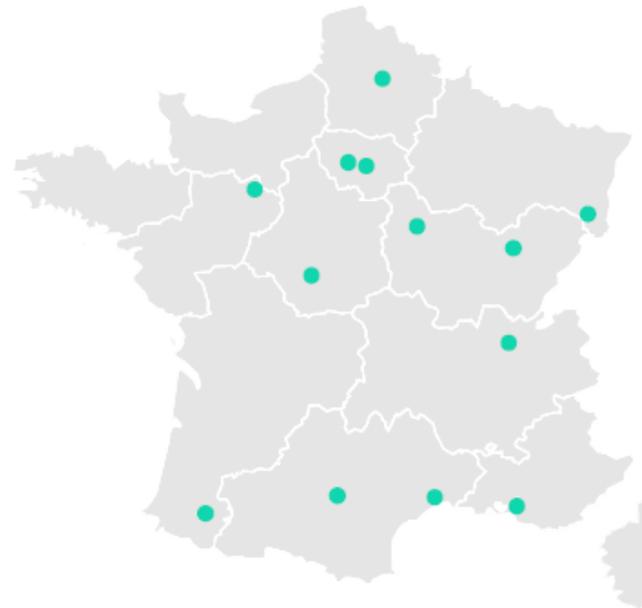
Hydrogène mobilité : autres véhicules

- ▶ Vélo : société Pragma. Environ 30g de H_2 embarqué à 200bar \approx 500Wh_e (100km d'autonomie)
- ▶ Drone : quelques centaines de g, à 300bar. Autonomie multipliée par 3 en comparaison de l'équivalent à batterie
- ▶ Chariot élévateur. Environ 1kg de H₂ embarqué, à 350bar.
- ▶ Bus : 10 à 35kg embarqué à 350bar.
- ▶ Camion : 100kg à 350bar (Nikola One)
- ▶ Train : Coradia iLint. 90kg par rame. 1000km d'autonomie- 140km/h. Plusieurs prototypes en fonctionnement en Allemagne. Plusieurs projets annoncés en France
- ▶ Bateau : de quelques dizaines de kg, sous pression, à plusieurs tonnes (liquide)
- ▶ Avion : quelques projets annoncés... >2030



Hydrogène mobilité : Bus, cas de la France

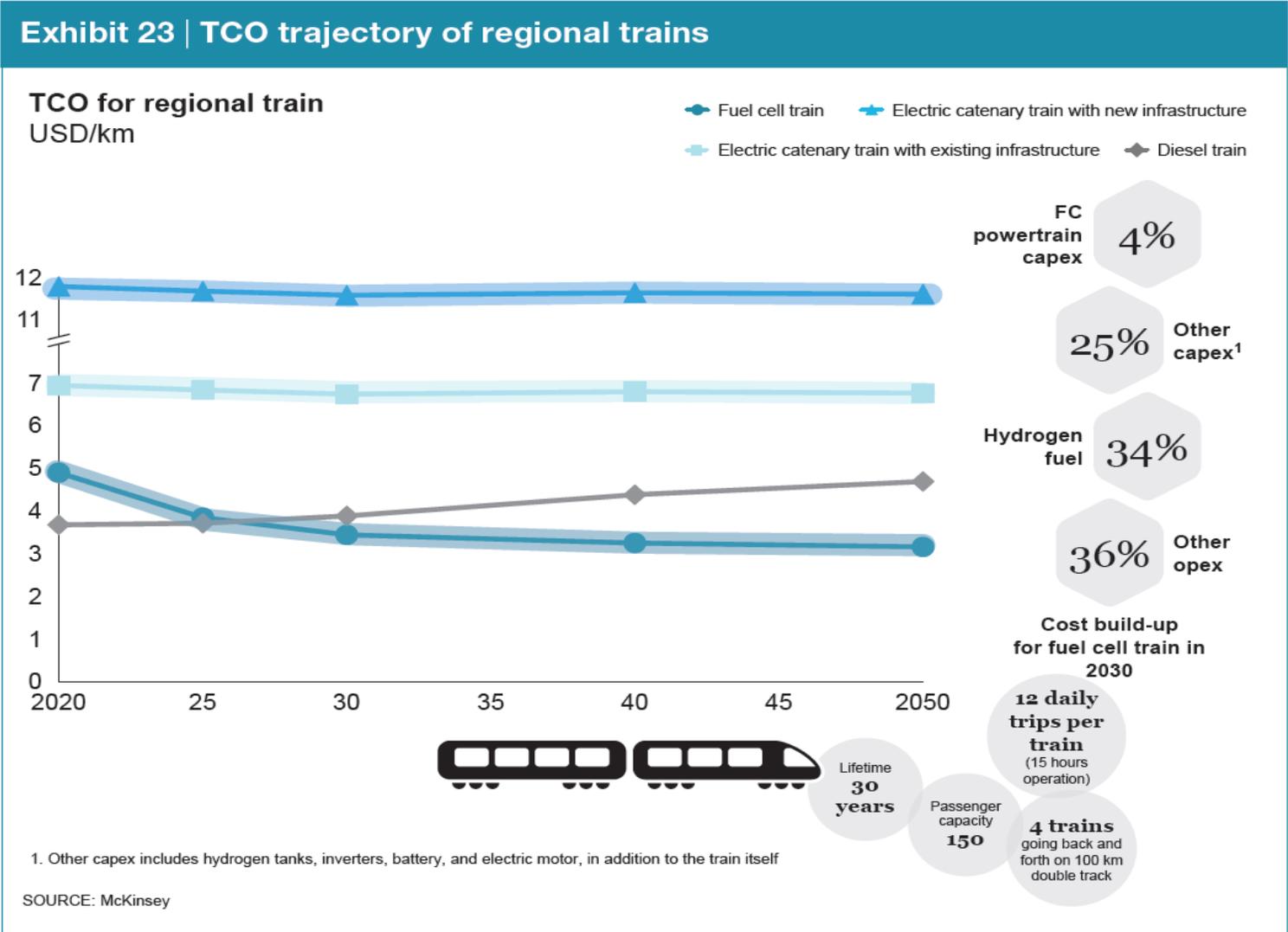
	 Lens - Houdain	 6	2019	
	Versailles	 2	2019	
	 Pau	 8	2019	
	Grand Paris	 2	2020	
	 Le Mans	 10	 1	2019
	Marseille / Fos-su(Mer)	 3	2020	
	Belfort Montbéliard	 19	 1	2020



2021	 21	Dijon Métropole	
2021	 2	Lyon Métropole	
2023	 6 - 8	Toulouse	
2023	 21 - 51	Montpellier	
2023	 6	Châteauroux	
-	 5	Auxerre	
-	 3	Chaumont	

2019 Date de 1er déploiement
  En circulation
  En test
  En projet
  Constructeur retenu
  Projet lauréat de l'AAP ADEME Mobilité H₂

Hydrogène mobilité : train



Hydrogène mobilité : train

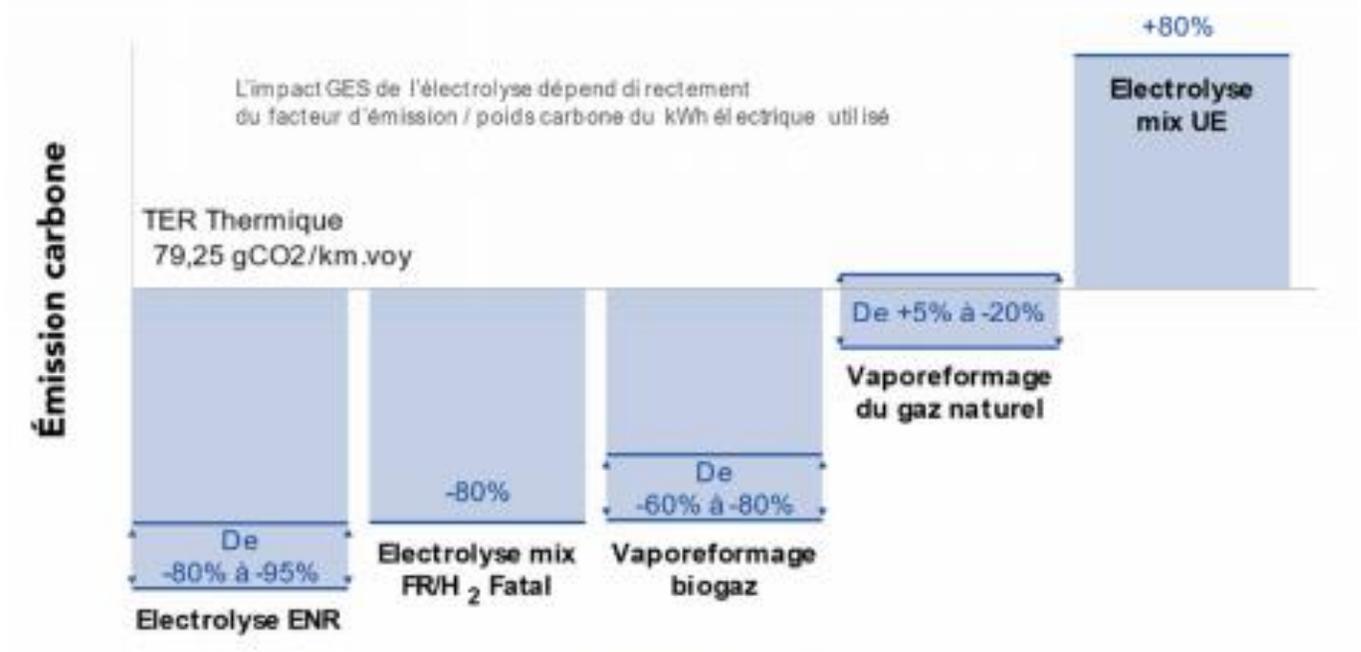
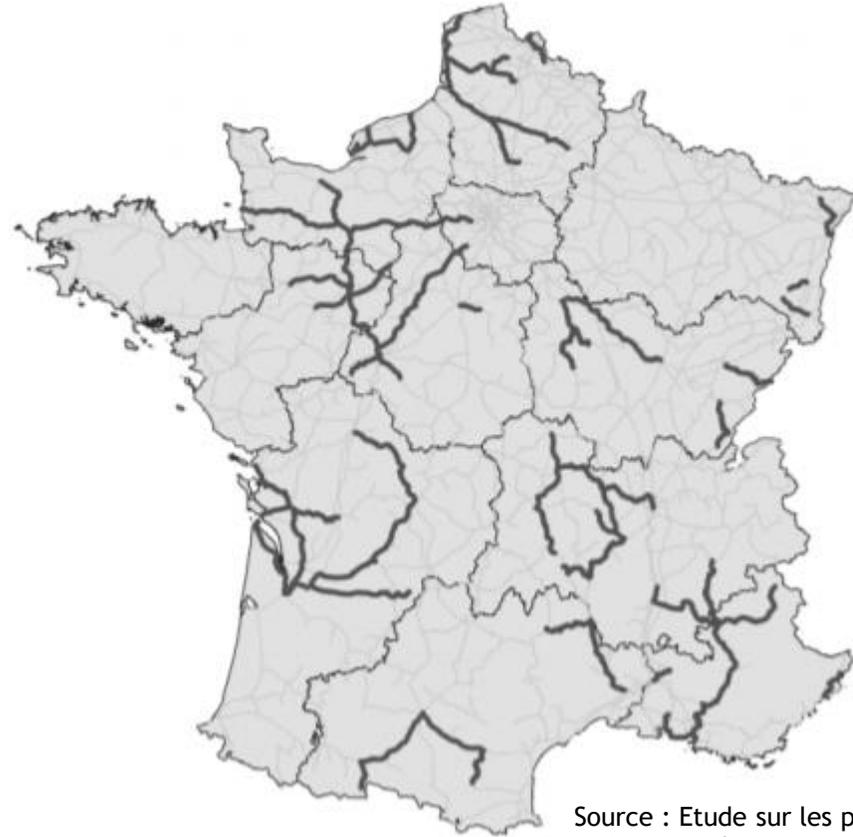


Figure 1 - Bilan carbone de l'usage ferroviaire de l'hydrogène selon son origine⁵

Source : Etude sur les perspectives du train hydrogène en France, ADEME

Hydrogène mobilité : train

- ▶ En France aujourd'hui : 50% des lignes non électrifiées
- ▶ 34 lignes ferroviaires peuvent être concernées par l'hydrogène
- ▶ 200-250 trains hydrogène
- ▶ 110 000 tonnes de CO2 évitées (nécessitant la production d'environ 8000 tonnes d'hydrogène, c'est peu !)
- ▶ ~20000 emplois



Source : Etude sur les perspectives du train hydrogène en France, ADEME

Hydrogène énergie : Power to gas

- ▶ Solution au problème du stockage :
 - aujourd'hui, 94% de l'électricité stockée l'est dans les STEP (total de 163GW, dont 5GW en France)
 - énergie cumulée de 5TWh à l'échelle mondiale, 0,1-0,2 TWh en France... alors qu'il est nécessaire d'avoir plusieurs dizaines de TWh de stockage rien qu'en France si on veut passer à du 100% ENR... Besoin en stockage de quelques milliers de TWh à l'échelle mondiale
- ▶ Capacité stockage gaz naturel (en TWh) :

	France	Europe
Stockage souterrain	~130	>800
Consommation gaz	~490 (2016)	~5000 (2017)
Consommation élec	~480 (2018)	~3300 (2018)



Hydrogène énergie : power-to-gas



- Un pipeline de 1,2m de diamètre transporte autant d'énergie que 8 pylones THT (3GW chacun)
- Grande puissance activable quasi-instantanément (en France : 90GW)
- Liaison France-Allemagne : 2GW électrique contre 28GW gaz !

Hydrogène énergie : power-to-gas

- ▶ Stockage direct de l'hydrogène pour réutilisation :
 - Pour l'hydrogène industrie
 - Pour la mobilité
 - Pour du soutien réseau
- ▶ Mélangé avec le gaz naturel, pour en réduire l'impact carbone
 - Plusieurs projets/démonstrateur afin d'étudier la fraction d'hydrogène pouvant être injectée : aujourd'hui 6% d'injection est possible sans modification significative des installations de gaz.
- ▶ Avec étape de méthanation, pour injection sans limite dans le réseau de gaz déjà existant



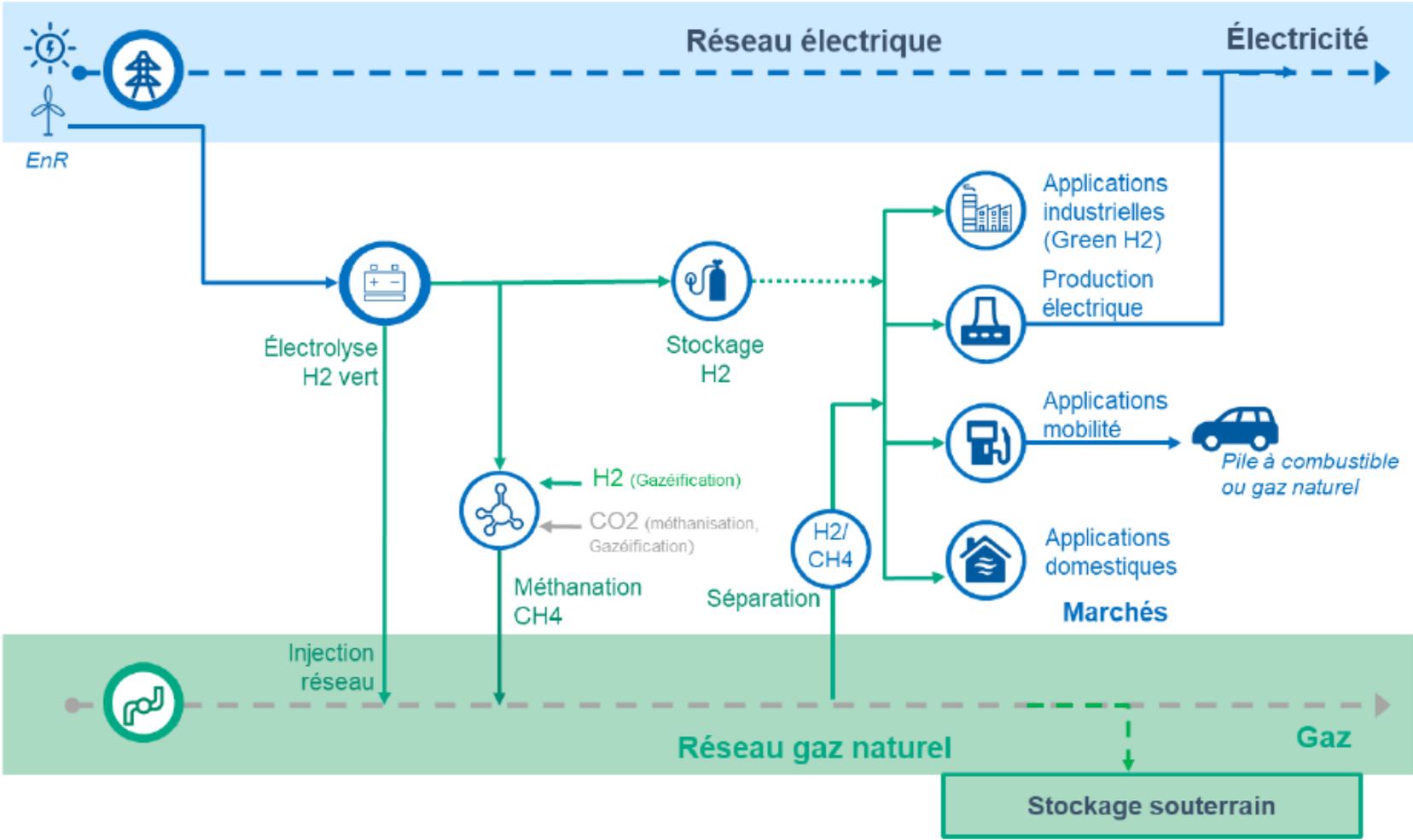
Hydrogène énergie : la méthanation



- ▶ Deux techniques de méthanation :
 - Méthanation catalytique, à base de nickel
 - Méthanation biologique à base de micro-organisme
- ▶ Nécessite une étape de captation du CO_2 , plusieurs technologies
 - Captage fumées par solvant (amines) : absorption exothermique à 70°C puis désorption au-delà de 120°C . Taux de captage $> 90\%$ dans des fumées à 10-15% de CO_2
 - Captage fumées avec contacteur membranaire : séparation de la phase gazeuse de la phase liquide à travers une membrane. Transferts de matière 10x plus important. Taux de captage $< 90\%$ dans des fumées à 10-15% de CO_2
 - Séparation membranaire en phase gazeuse : utilisation de membranes perméables au CO_2 . Plusieurs étapes de compression/séparation nécessaires. Utilisation pour le biogaz.
 - Captage CO_2 atmosphérique : cycles adsorption/désorption sur un support solide amine

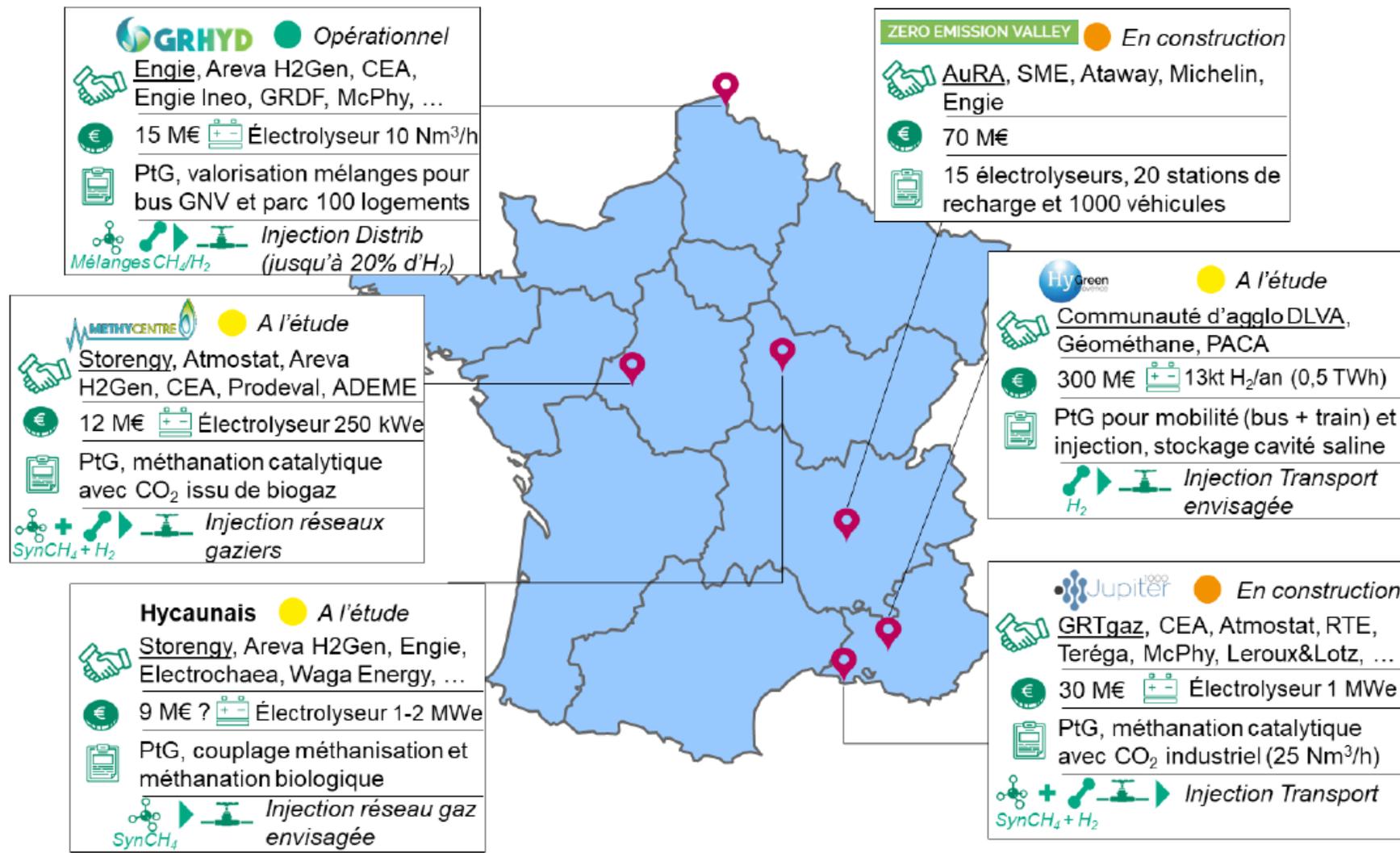


Hydrogène énergie : power-to-gas

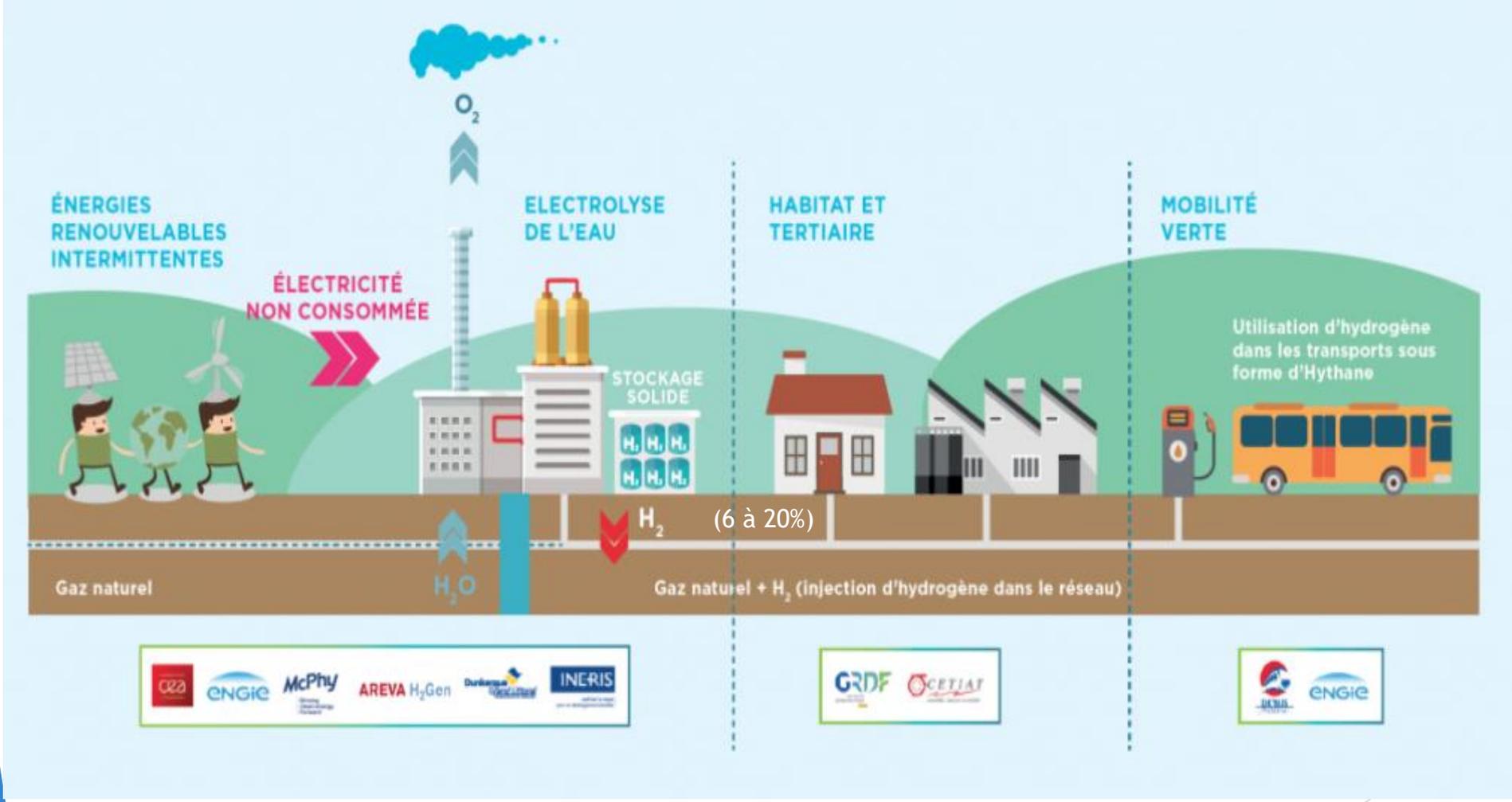


Source : Rapport final « Conditions technique et économiques d'injection d'hydrogène dans les réseaux de gaz naturel ». GRTgaz et al.

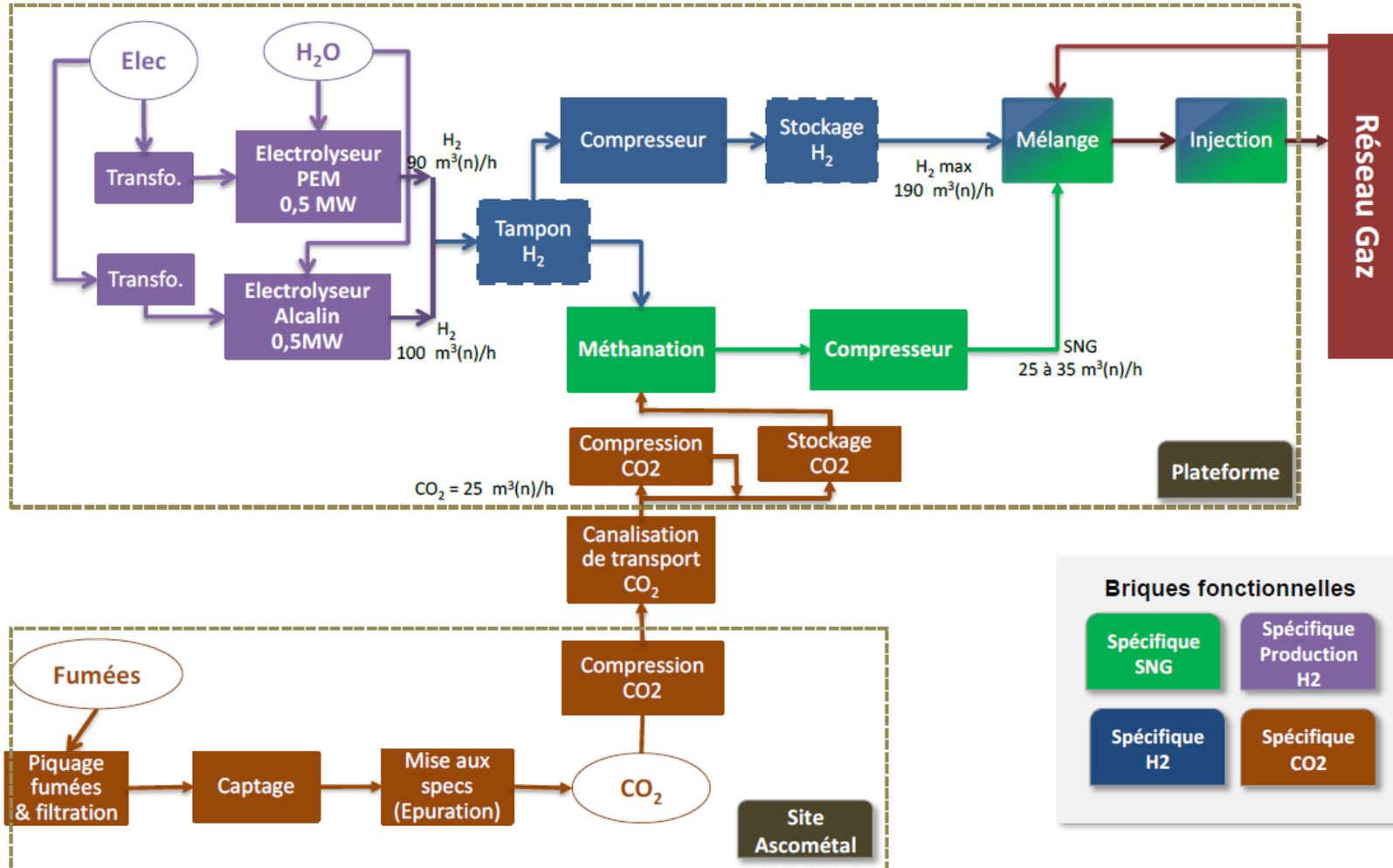
Power-to-gas : les projets français



Power-to-gas : projet GHRyD



Power-to-gas : projet Jupiter 1000

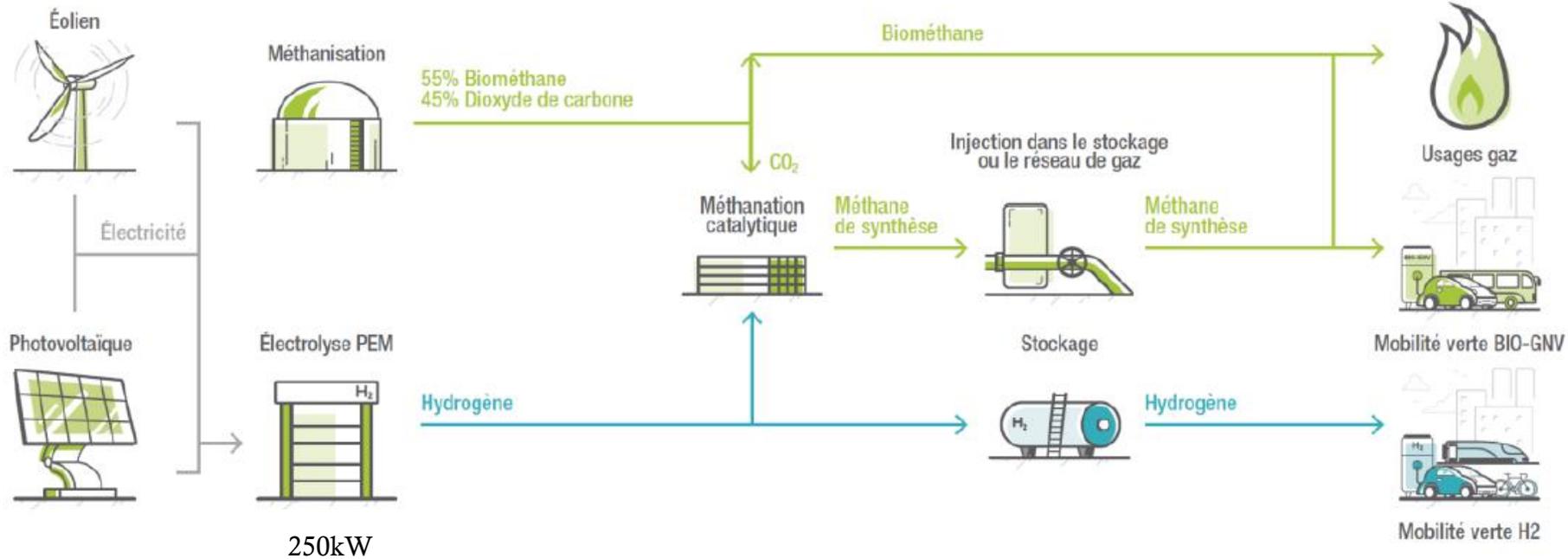


Acteurs :

- GPM (plateforme)
- MacPhy (électrolyseurs)
- Atmosat (méthanation)
- Leroux & Lotz (captage)
- CEA (étude)
- CNR (électricité)

Power-to-gas : projet Méthycentre

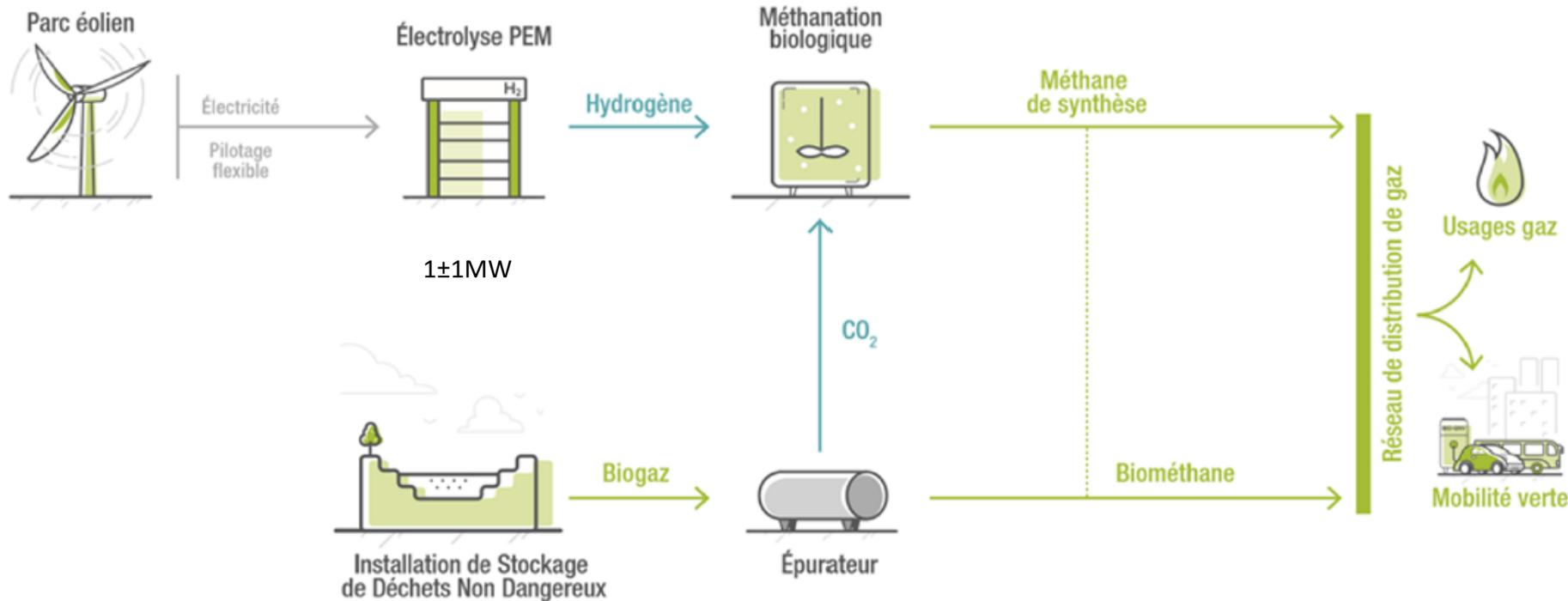
MÉTHYCENTRE



Acteurs :

- Storengy (porteur projet)
- Atmostat (méthanation)
- Prodeval
- CEA (étude)
- Areva H2Gen
- La Sablière (méthanisation)

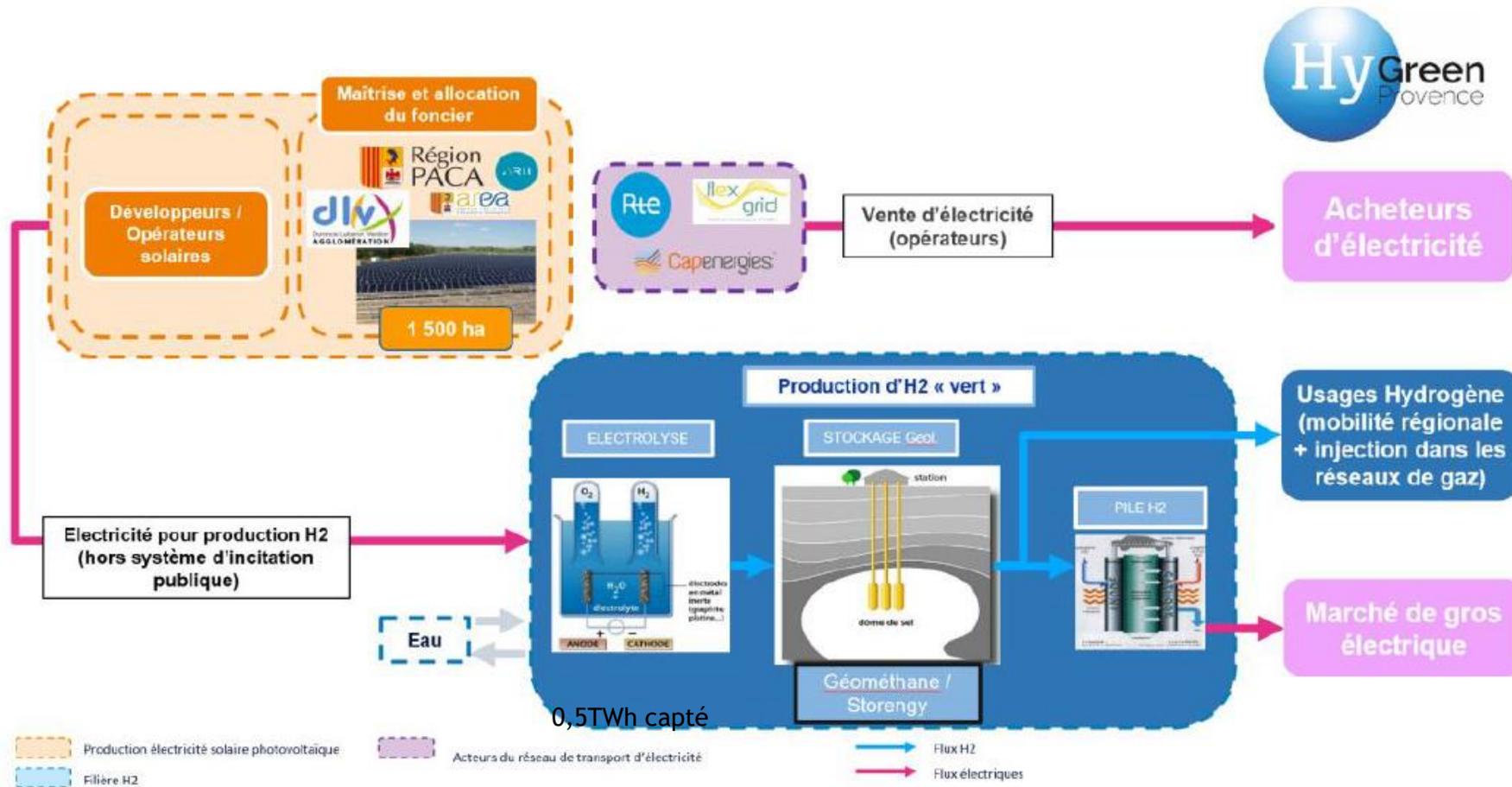
Power-to-gas : projet Hycaunais



Acteurs :

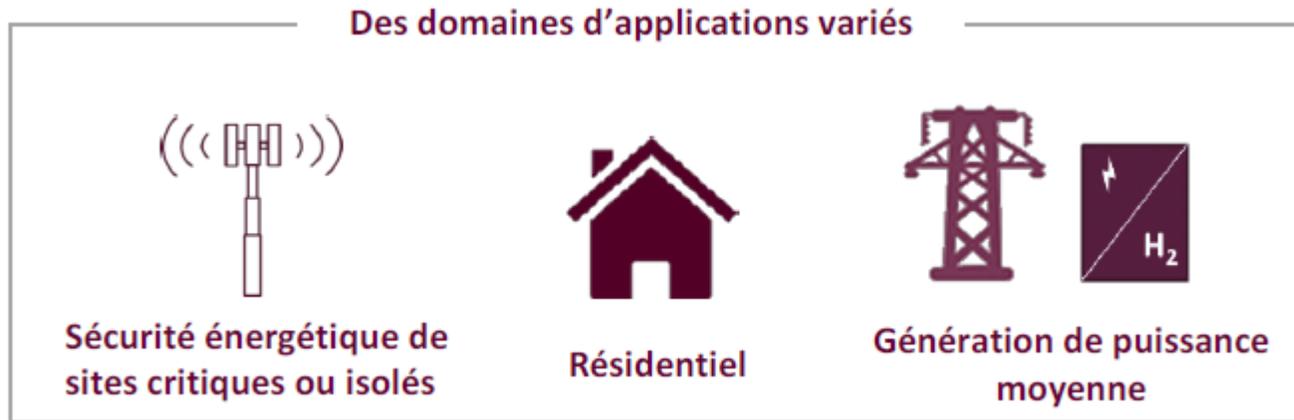
- Storengy (porteur projet)
- Engie Lab Crigen
- Engie Green
- Electrochaea
- Areva H2Gen
- SDEY
- SEM
- FC Lab université Franche-Comté

Power-to-gas : projet Hygreen



Acteurs :
 • En pré-développement

Hydrogène énergie : applications stationnaires



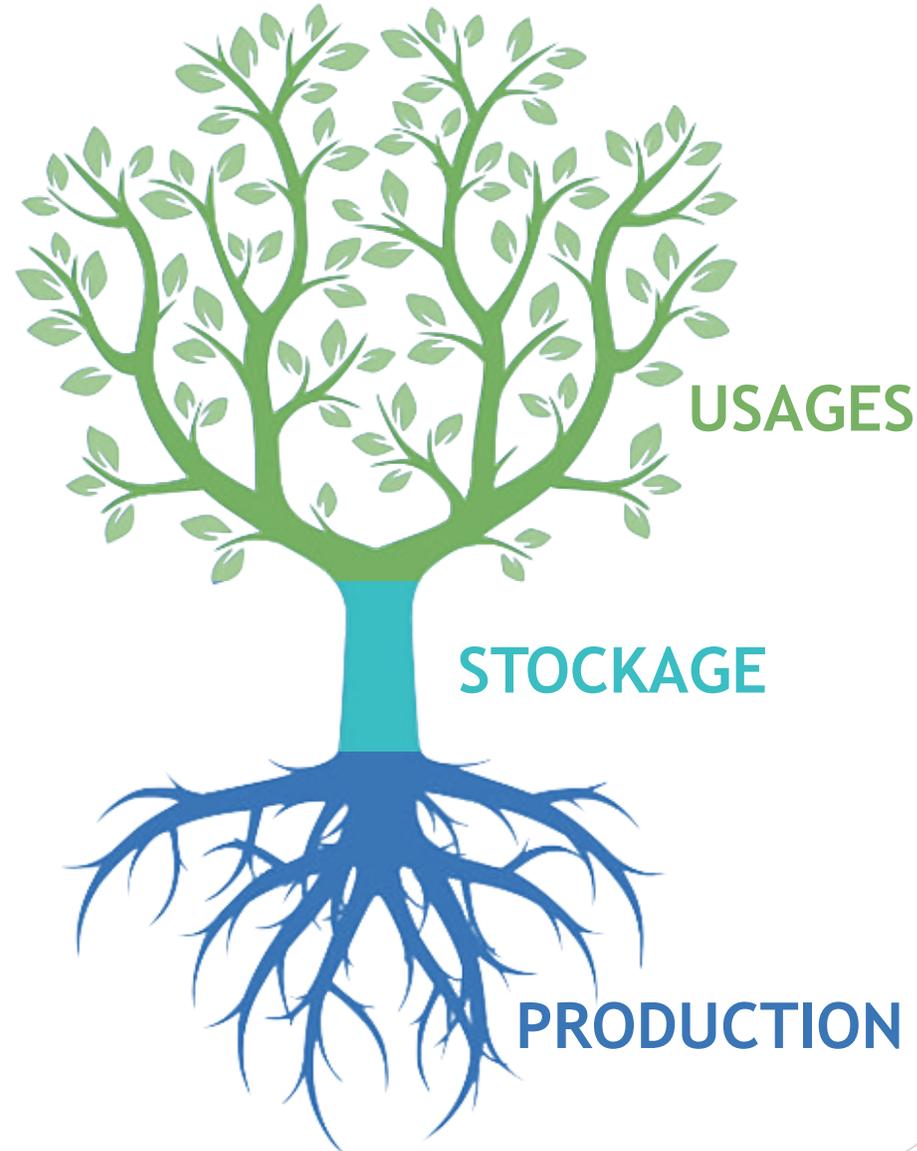
- ▶ Utilisation d'une pile à combustible comme groupe électrogène :
 - PEM : Flexible. Rendement 40 à 55%. Entre 1500 et 3800\$/kW
 - MCFC : Rendement 60% (85% en cogénération). 4000 à 6000\$/kW
 - SOFC : meilleure durabilité que MCFC. Rendement > 50%. 3000 à 4000\$/kW

Hydrogène énergie : nomadisme

- ▶ Micro-piles : 100mW-1kW
 - Objets connectés de plus en plus énergivores. Autonomie pouvant être multipliée par un facteur 3 à 5. Même Apple a un brevet sur une techno hydrogène
 - Suppression du temps de charge
 - Utilisation pour des interventions de secours
 - Faible rendement des PAC du fait de la plage étendue de température d'utilisation
- ▶ Le principal obstacle reste le coût actuel des PAC



Le futur de l'hydrogène : Economie de l'hydrogène



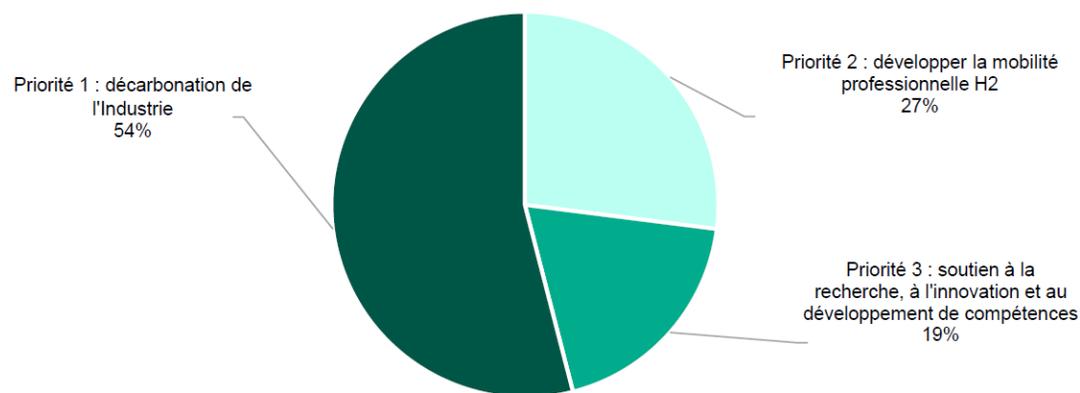
Le futur de l'hydrogène : plan de relance ambitieux

- ▶ Plan de relance : 2 milliards d'euros d'ici 2022, 7 milliards en tout d'ici 2030
 - ▶ Plus ambitieux que le plan Hulot de 2018 d'à peine 100M€
- ▶ Plusieurs enjeux à ce plan :
 - ▶ Contribuer à la décarbonation de l'économie (le bilan carbone de l'industrie française doit passer de 80 à 53MtCO₂ d'ici 2030)
 - ▶ Créer une filière française porteuse et génératrice d'emplois
 - ▶ Réduire notre dépendance énergétique
 - ▶ Valoriser les technologies françaises (ne pas reproduire les erreurs du passé...)

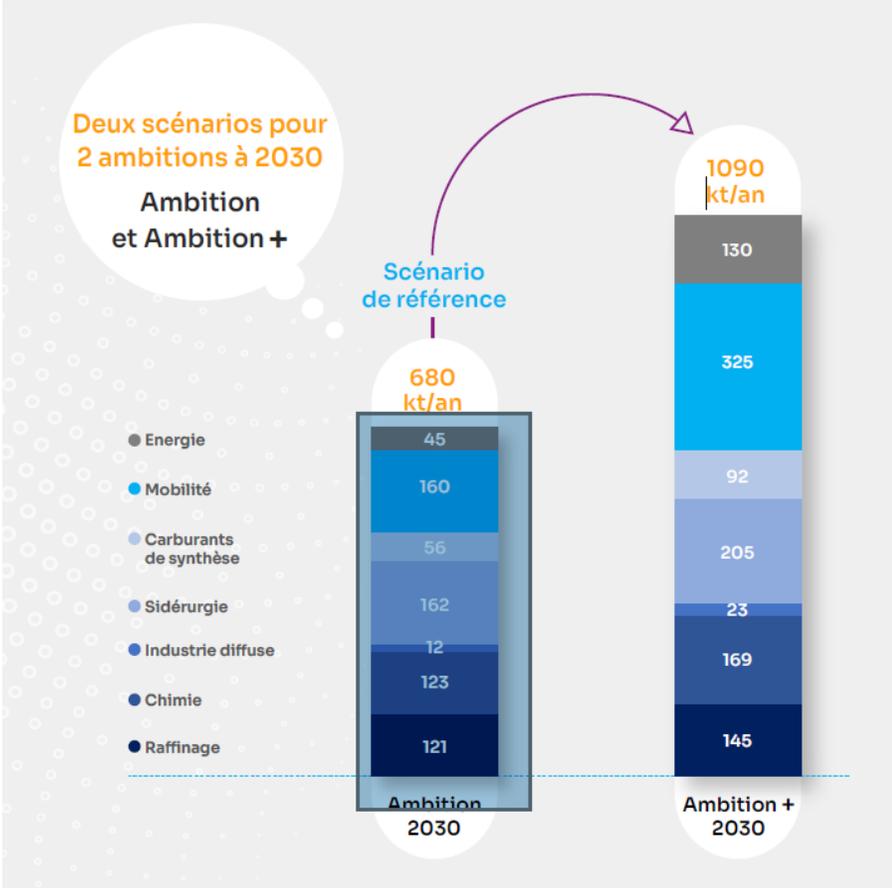
Le futur de l'hydrogène : plan de relance ambitieux

- ▶ Objectif du plan de relance :
 - ▶ Installer 6,5GW d'électrolyseurs d'ici 2030
 - ▶ Générer entre 50 000 et 150 000 emplois
 - ▶ Economiser plus de 6MtCO₂ (soit ¼ de la baisse des émissions prévues de l'industrie française à cet horizon)
 - ▶ Développer une offre de mobilité lourde

Répartition des 3,4 Mds€ alloués sur la période 2020-2023



Le futur de l'hydrogène : plan de relance ambitieux



Source : Trajectoire pour une grande ambition hydrogène, France Hydrogène

	Groupe	Description	Marchés
Industriels	Air Liquide	Deuxième producteur mondial d'hydrogène, Air Liquide se positionne sur les nouveaux usages de l'hydrogène : les stations de distribution (plus de 100 stations livrées dans le monde) et les PAC.	
	ALSTOM	Alstom se positionne sur le marché de la mobilité ferroviaire à hydrogène avec le développement de trains à hydrogène.	
	Schneider Electric	Schneider Electric est présent dans les technologies de stockage d'hydrogène, via notamment un partenariat avec Areva et le co-développement avec ENGIE du micro-réseau SPORE en Asie.	
Energéticiens	TOTAL	Total s'implique dans la recherche sur l'hydrogène comme carburant, a investi dans le fabricant d'électrolyseurs Sunfire pour produire de l'H ₂ vert et met en place des stations service hydrogène.	
	EDF	EDF se positionne sur les marchés de l'hydrogène, via un partenariat et une participation de 16M€ dans le fabricant d'électrolyseurs McPhy, et via la création sa nouvelle filiale Hynamics en 2019.	
	ENGIE	ENGIE a lancé une filiale spécifique hydrogène en 2018. Le groupe dispose de compétences sur toute la chaîne de valeur H ₂ (génération d'hydrogène vert, mobilité, industrie, stockage d'énergie...).	
	GRTgaz TERÉGA	GRTgaz et Teréga s'intéressent de près au Power-to-Gas et ont lancé fin 2015 Jupiter1000, un projet de démonstration d'une puissance prévue de 1MW.	
	AREVA	La nouvelle structure issue d'Areva conserve les filiales spécialisées dans les technologies de stockage d'hydrogène et d'électrolyse : AREVA H ₂ Gen et AREVA Stockage d'Énergie (Helion).	
Equip. Auto et constructeurs	RENAULT	Renault a annoncé la commercialisation de deux modèles d'utilitaires hydrogène conçus en partenariat avec Symbio pour l'année 2020.	
	faurecia	Faurecia développe des réservoirs à hydrogène en collaboration avec Stelia Aerospace et via sa participation dans ad-Venta, et commercialise des piles à combustible en collaboration avec le CEA.	
	MICHELIN	Michelin s'investit dans la filière hydrogène transport avec l'entrée au capital de Symbio en mai 2015, spécialiste français de la pile à combustible pour véhicule électrique.	
	PLASTIC OMNIUM	Leader mondial des pièces et modules de carrosserie et des systèmes à carburant, Plastic Omnium se positionne sur les technologies de la mobilité hydrogène par le biais de plusieurs acquisitions.	
Légende	Stations de ravitaillement H ₂ Distribution d'H ₂ (camion, pipeline) Production d'H ₂ par électrolyse Stockage d'H ₂ Power-to-Gas Applications stationnaires Mobilité H ₂		

Acteurs de l'hydrogène : les PME

Date de création	2002	2006	2010	2014	2018	2019
Production H ₂ Equipementiers technologiques		 Driving clean energy Forward	 L'Hydrogène Vert	 AREVA H ₂ Gen ⁽¹⁾	 HAFFNER energy	 Premier Element
Applications stationnaires et mobiles	 AREVA Stockage d'Énergie Helion ⁽²⁾ by AREVA		 Hydrogen Carrier	 ANTINE, ANTHER, ENERGY	 POWER IN ALL MERIDIANS H ₂ SYST Hydrogen to system	 Prenez le poids de votre énergie
Mobilité hydrogène		 The fuel cell company	 A TAL REZIA INC. DEL N. YERRECHY EDIARY	 hype		
Power to Gas Services/opération réseau		 INNOVATIVE ENERGY STORAGE		 HYDROGEN DELIVERY		 Carbon and hydrogen storage solutions

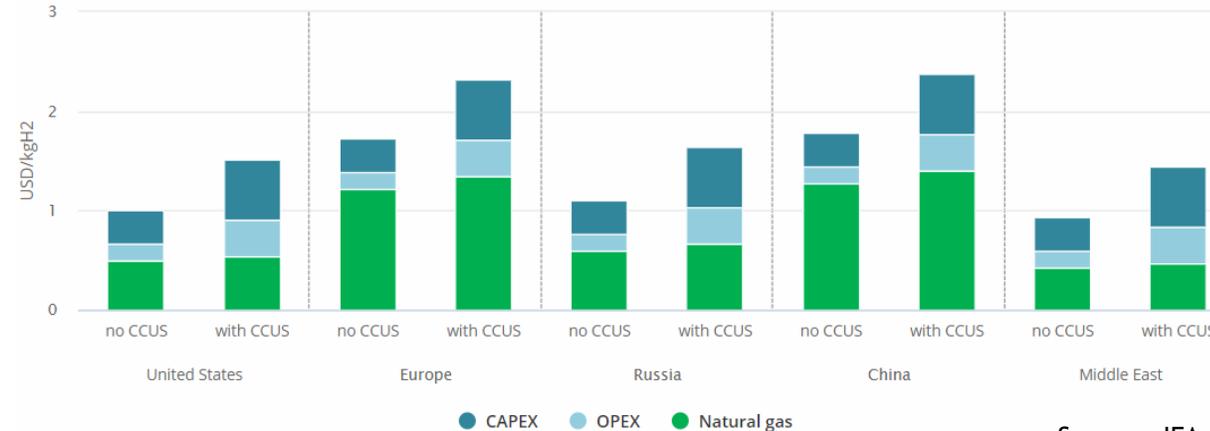
Source : Analyse Sia Partners (IEA, H2 mobility)

Acteurs de l'hydrogène : acteurs internationaux



Coût de l'hydrogène énergie

- ▶ En compétition avec l'hydrogène craqué...
- ▶ Coût hydrogène obtenu par reformage de méthane (EU) :
 - Entre 1,4 et 1,8€/kg à la production
 - Purification : entre 0,6 (99,5%) et 2€/kg (99,9995%)
 - Captage CO_2 : +0,5€/kg



Source : IEA

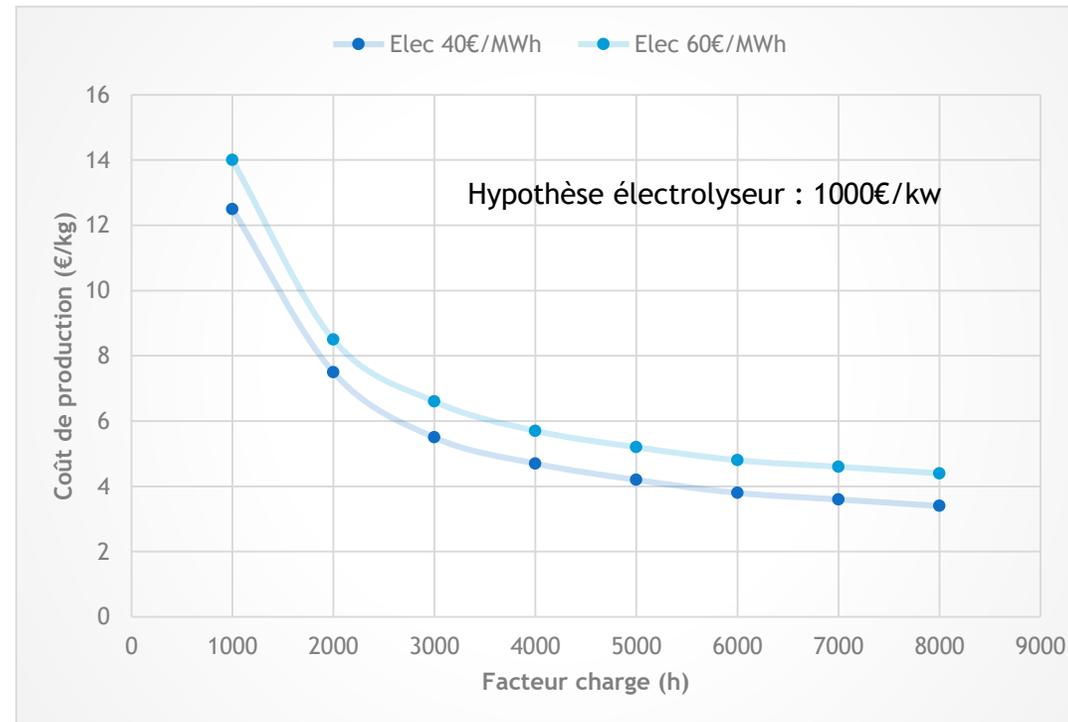
- ▶ Le coût de vente de l'hydrogène mobilité est aujourd'hui fixé arbitrairement à 10€/kg
 - Plein environ 500km pour 50€
 - Exonéré de taxe aujourd'hui... devra prendre en compte la taxation à terme

Coût de l'hydrogène énergie

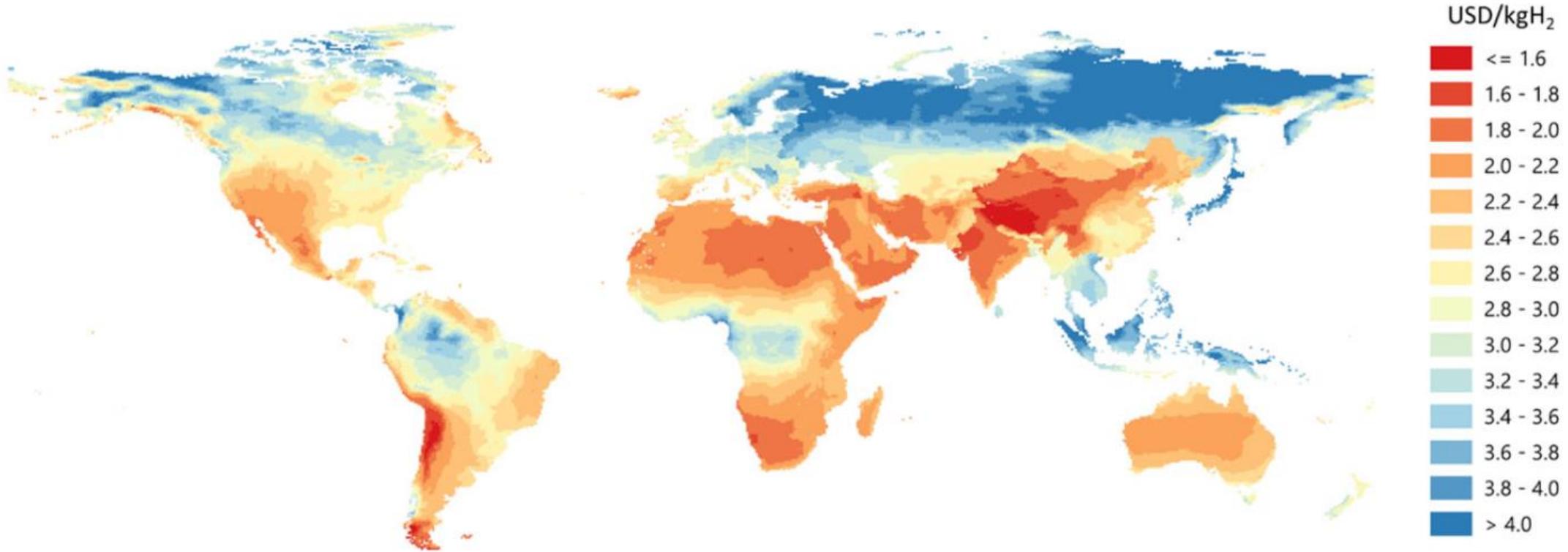
- ▶ Un coût qui dépend du prix de l'électrolyseur : entre 1000 et 2000€/kW aujourd'hui

➔ Passage sous la barre des 1000€/kW prévue pour le début des années 2020

- ▶ Et de son facteur de charge :



Coût de l'hydrogène énergie : perspectives à long terme à partir de renouvelable

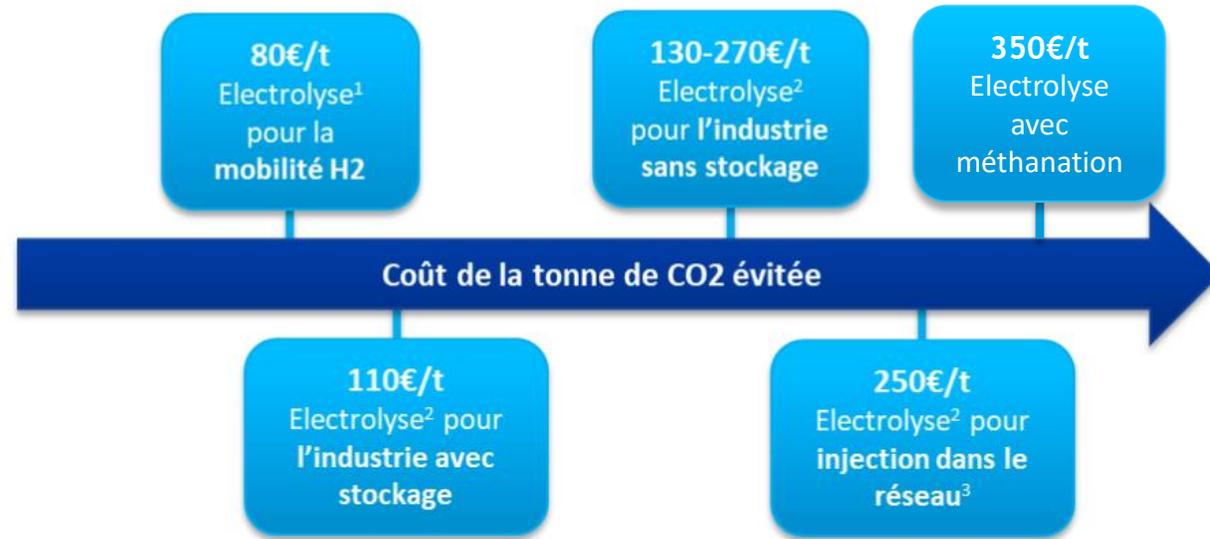


Et le power-to-gas ?

- ▶ En compétition avec le gaz naturel directement : $\sim 20\text{€}/\text{MWh}$
 - ➔ en comparaison : $1\text{€}/\text{kgH}_2 = 30\text{€}/\text{MWh}_{\text{th}}$
- ▶ Mais gaz naturel : $200\text{kg}_{\text{CO}_2}/\text{MWh}$, la donne peut être changée avec une taxation CO_2
 - ➔ Décision politique avant tout
- ▶ Nécessité de trouver des synergies entre les multiples usages de l'hydrogène pour créer une économie pour l'ensemble de la filière H_2
 - ➔ Nécessité de donner de la valeur aux services rendus aux réseaux électricité et gaz grâce au nouveau couplage permis par la filière

Coût de l'hydrogène : taxe CO₂

- ▶ Quel niveau de taxation CO₂ ?



Source : Etude PEPS4 ,ATEE, 2018

Comparatif :
100€/tCO₂ ≈ 0,2€/L
d'essence

- ▶ Aujourd'hui, la taxation est à 45€/t_{CO2}

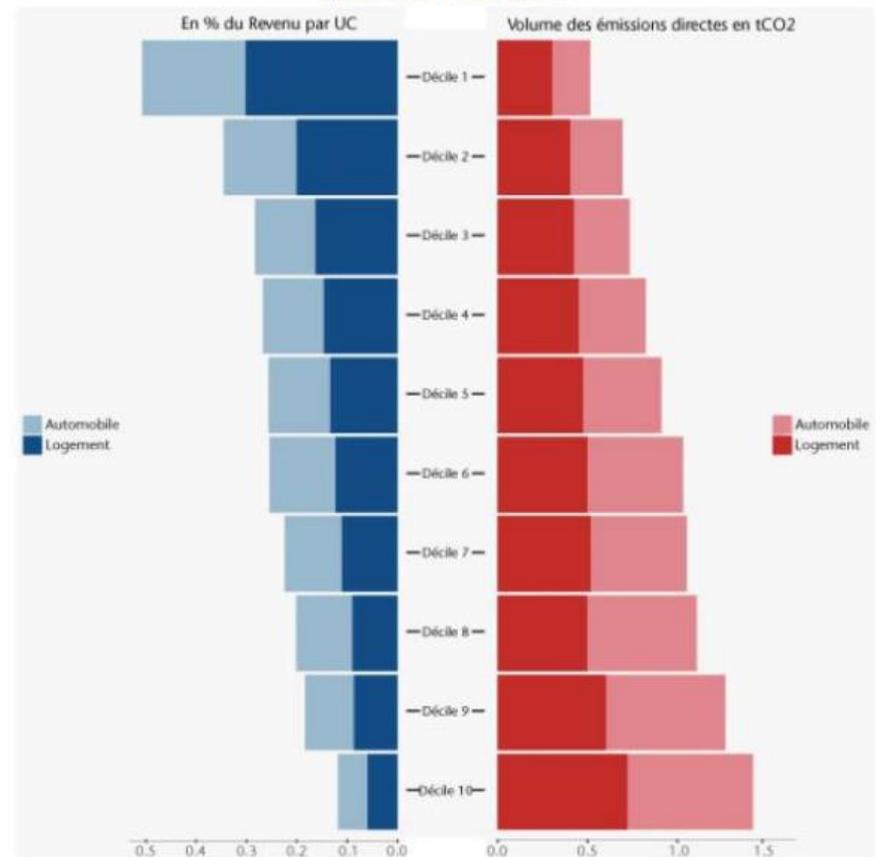
Coût de l'hydrogène : taxe CO₂

- ▶ Une taxation qui doit être équitable : principe pollueur/payeur.

Pas le cas aujourd'hui...

- ▶ Déclaration bilan carbone, avec augmentation progressive du prix de la tonne émise ?

Graphique 1. Impact de la fiscalité carbone sur les ménages et volumes des émissions par décile de niveau de vie



Lecture du graphique : Les ménages du premier décile consacrent en moyenne 0,5 % de leur revenu au financement de la contribution carbone associée à la TICPE, et émettent 0,6 tonnes de CO₂.

Sources : EXOBASE 3, Budget des familles 2011, calcul des auteurs.

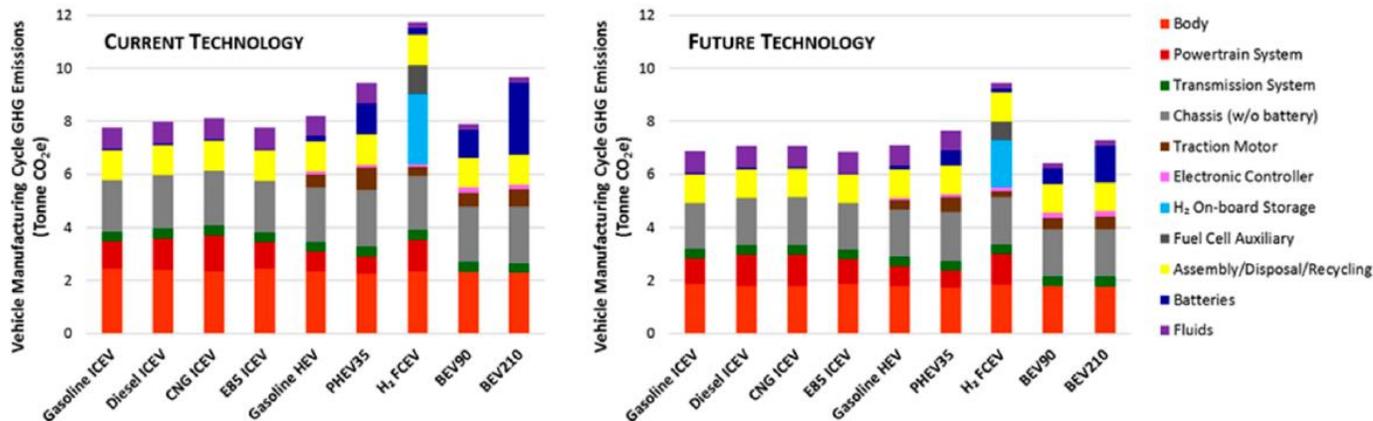
Défis de l'hydrogène

- ▶ La production d'électricité n'est pas infiniment extensible, des arbitrages seront nécessaires
- ▶ En France, production électrique actuelle : ~500TWh. D'après RTE, même dans le cas d'une révolution hydrogène, 120TWh peuvent être alloués à la production d'hydrogène en 2050. Or :
 - ▶ Substitution de tout l'hydrogène industriel actuel par de l'hydrogène vert : ~50TWh
 - ▶ Substitution des camions français par l'hydrogène : ~70TWh
 - ▶ Substitution du kérosène consommé en France par l'hydrogène : ~60TWh
 - ▶ Substitution de 10% du parc automobile français : ~60TWh
 - ▶ Substitution des trains diesel par l'hydrogène : ~0,5TWh

➔ Impossible d'adresser tous ces marchés ! Il faudra choisir...
Des gains de rendement sont également encore possibles

Défis de l'hydrogène

- ▶ Dépendance envers les métaux stratégiques : platinoïdes essentiellement
 - ▶ Des gros efforts ont déjà été réalisés pour réduire la quantité de platine dans les piles à combustible. Problème : diminution de rendement et des platinoïdes sont difficilement compatibles
- ▶ Stockage de l'hydrogène en caverne : des tests à grande échelle doivent encore être effectués pour valider la faisabilité
- ▶ Réservoirs composite : problème de recyclabilité et bilan carbone



Conclusion

- ▶ L'hydrogène, un couteau suisse de la transition énergétique :
 - Décarbonation des transports
 - Décarbonation du secteur gazier
 - Solution au problème du stockage (et du transport)
- ▶ Multiplicité des moyens de production
- ▶ Une compétition économique pas simple avec les énergies fossiles
 - Un soutien politique clair et fort en faveur du stockage est nécessaire
 - Taxe carbone équitable nécessaire pour accélérer la transition
- ▶ La solution à la crise actuelle ne peut pas être que technique. Il est largement temps de parler de sobriété dans le débat public !