



Quelle place pour l'hydrogène dans la transition énergétique ?



Sébastien Candell

Académie des sciences et Académie des technologies,
Colloque Les grand enjeux de l'énergie, 20 et 21 juin 2025



L'**hydrogène** est largement utilisé dans le **raffinage du pétrole** brut, pour éliminer les impuretés comme le soufre et produire des carburants plus propres, nécessaires au fonctionnement efficace des moteurs thermiques

<https://www.airproducts.fr/industries/oil-refining>

Ariane 6

Photo :
Air & Cosmos



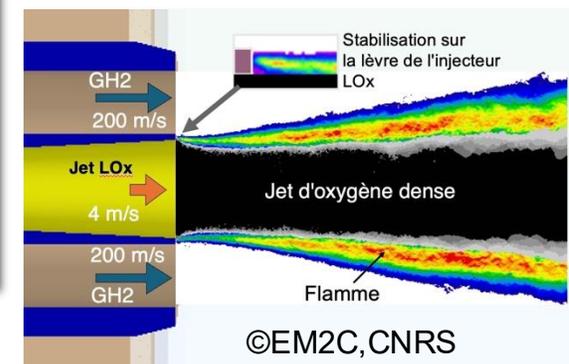
L'hydrogène, ergol cryotechnique des lanceurs Ariane

Moteur Vulcain
au banc d'essai

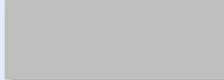
Hydrogène et oxygène stockés sous forme liquide alimentent le moteur Vulcain des lanceurs Ariane. Ces ergols cryotechniques permettent d'atteindre des impulsions spécifiques de 430 s. La puissance dégagée par Vulcain est d'environ 2.5 GW (la puissance de deux réacteurs nucléaires)



Structure d'une flamme LOx/GH2

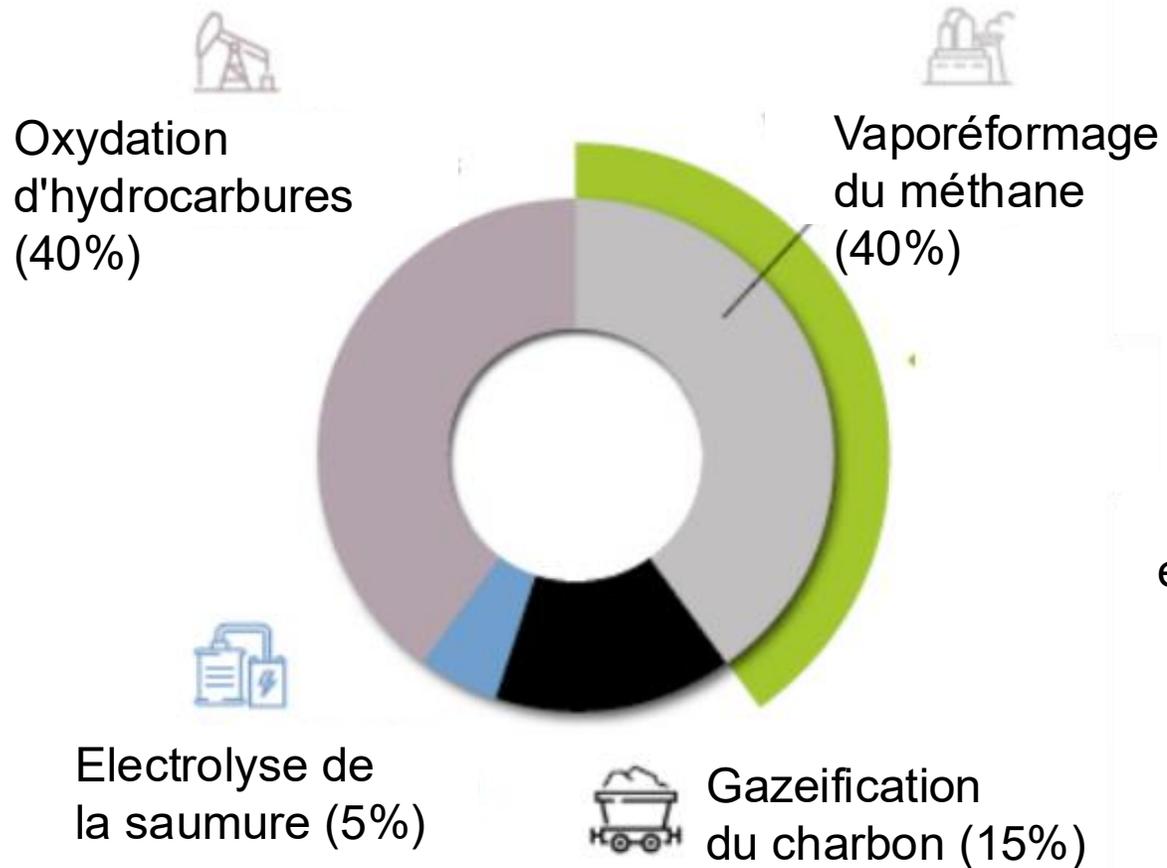


Dans les conditions normales de pression et de température, l'hydrogène est incolore... et pourtant il est désormais coloré

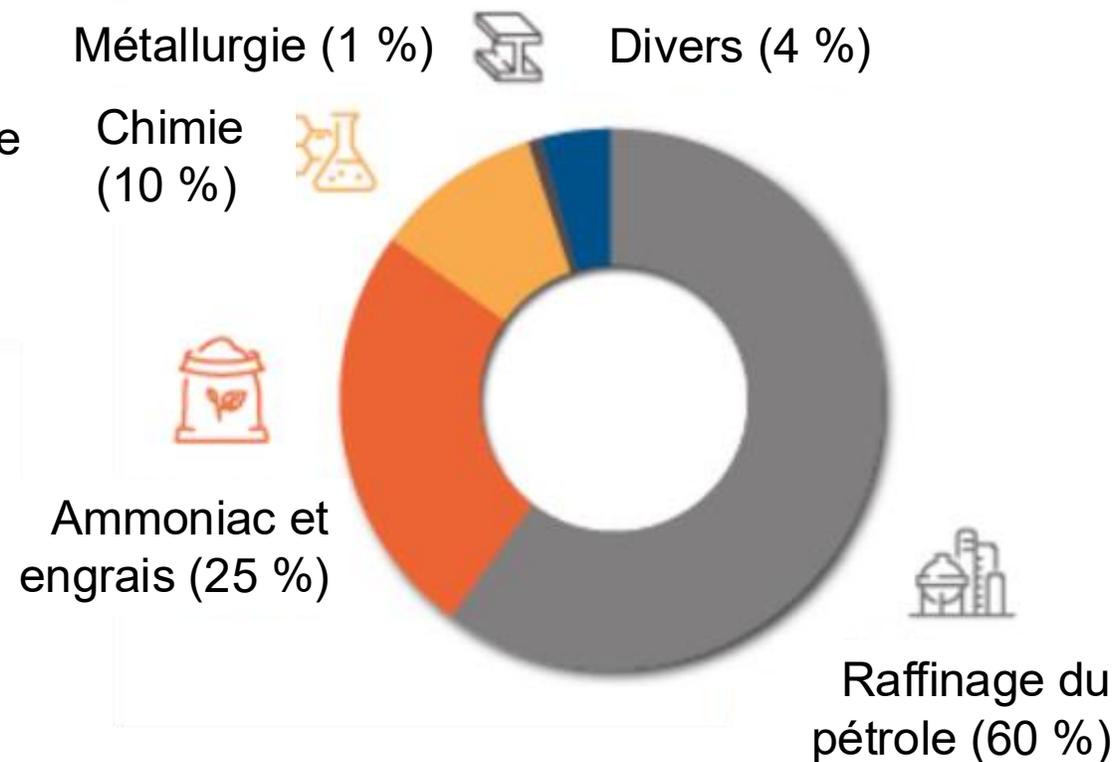
Couleur	Dénomination	Origine
	Blanc	Hydrogène natif, gisements souterrains
	Noir	Hydrogène produit par gazéification du charbon sans CCS
	Brun	Hydrogène produit par gazéification du lignite sans CCS
	Gris	Hydrogène produit par vaporeformage du méthane sans CCS
	Bleu	Hydrogène produit à partir de combustibles fossiles avec CCS
	Turquoise	Hydrogène produit par pyrolyse ou plasmalyse du méthane
	Rose, jaune	Hydrogène produit par électrolyse à partir d'électricité nucléaire, d'électricité bas carbone du réseau
	Vert	Hydrogène produit par électrolyse utilisant des sources d'énergie renouvelables

Production et consommation actuelles d'hydrogène en France (Source RTE)

Production d'hydrogène



Consommation d'hydrogène



- ❑ La France produit actuellement environ 0,9 million de tonnes (Mt) d'hydrogène par an. Comme partout dans le monde, il s'agit d'hydrogène gris, utilisé essentiellement pour le raffinage du pétrole et la synthèse de l'ammoniac (pour la production d'engrais)

Hydrogène gris



Hydrogène décarboné

- Dans quelles conditions peut-on considérer que l'hydrogène est décarboné (effectivement produit avec un gain net en termes d'émissions de gaz à effet de serre) ?
- Quelle contribution de l'hydrogène décarboné (vert) peut-on espérer à la décarbonation de l'énergie ?
- Quelles sont les technologies clés du développement de la filière hydrogène et quelles sont les avancées scientifiques et technologiques nécessaires pour assurer un avantage de compétitivité pour la France ?
- Quel niveau de production peut être envisagé et quel serait le besoin en termes de production électrique supplémentaire ?
- Peut-on avoir une idée du potentiel de l'hydrogène natif ? (Conférence d'Isabelle Moretti)

En France, le gouvernement soutient fortement la filière hydrogène

- ❑ Le développement d'une filière industrielle d'électrolyseurs pour l'installation d'une capacité de 6,5 GW pour produire 0,6 Mt d'hydrogène par an en 2030
- ❑ Un soutien à la recherche et aux technologies pour optimiser la production de l'hydrogène vert/jaune et en diminuer les coûts, encore trop élevés

	Stratégie Nationale Bas-carbone –SNBC Scénario de référence RTE	Scénario « trajectoire hydrogène + » de RTE	Commentaires
France	1 Mt	3,9 Mt	Les valeurs les plus élevées correspondent à une utilisation intensive d'hydrogène pour (1) le transport routier et aérien (hydrogène comprimé ou liquéfié, production de carburants liquides de synthèse) et (2) pour assurer la flexibilité du système électrique
	55 TWh	215 TWh	

L'hydrogène en Europe à l'horizon 2050

	Production annuelle	Energie électrique	Commentaires
Production en Europe	30 Mt	300 GW 1700 TWh	
Importation de pays hors de l'Union Européenne (Maroc, Algérie, Moyen Orient...)	30 Mt	300 GW 1700 TWh	Ce scénario nécessite l'installation de capacités d'électrolyse dans ces pays et d'infrastructures de transport de l'hydrogène

- ❑ Au delà de ces chiffres peu réalistes (la consommation d'électricité en Europe est de 2700 TWh) , cette politique conduirait à remplacer une dépendance vis-à-vis des énergies fossiles par une nouvelle dépendance, problématique dans un contexte d'instabilité géopolitique de certains des pays où l'hydrogène serait produit ou au travers desquels il serait transporté

Le *Suiso Frontier*, construit par *Kawasaki Heavy Industries*, premier navire transporteur d'hydrogène liquide au monde, a permis une fois, en 2022, de transporter 55t d'hydrogène entre l'Australie et le Japon. Le réservoir de 1250 m³ permet de transporter 75t d'hydrogène à -253°C. Projet : un navire doté d'un réservoir de 160 000 m³ pour transporter 10 000t d'hydrogène

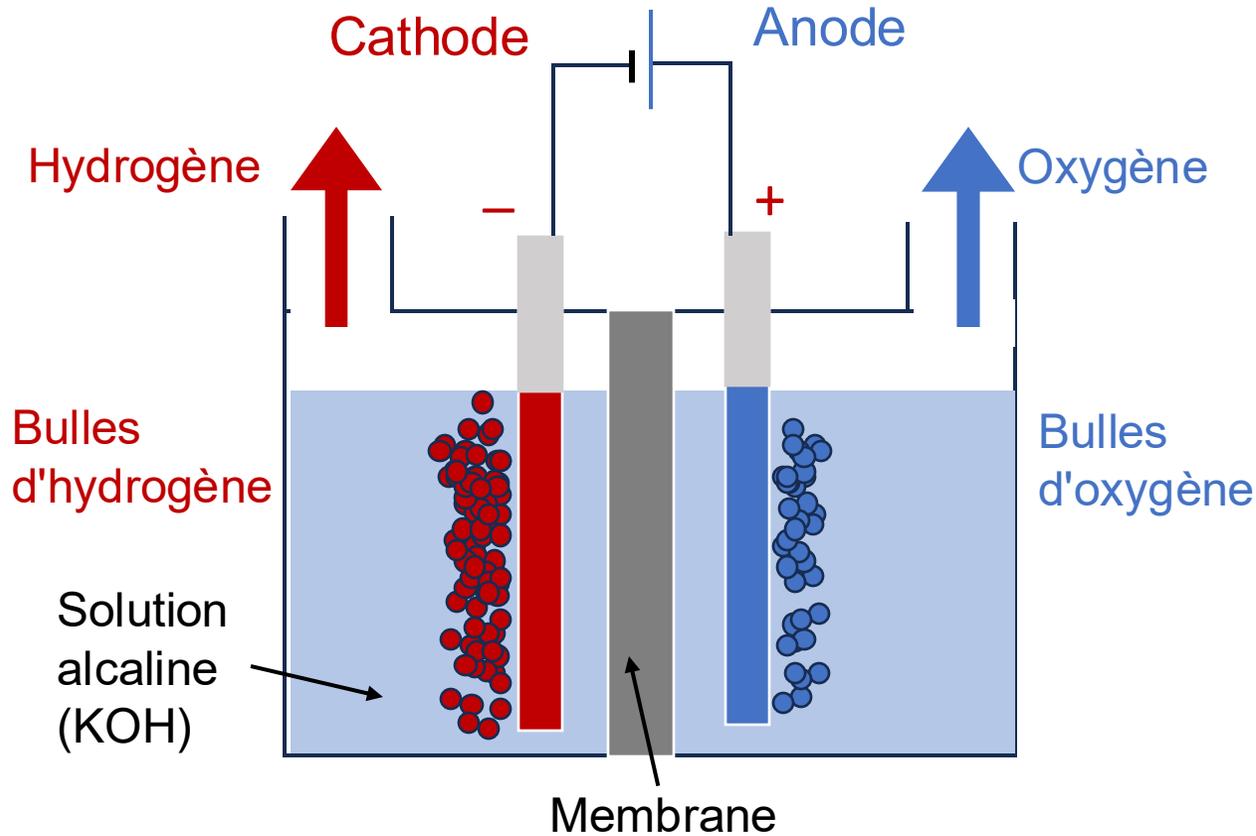


L'électrolyse de l'eau, technologie clé

❑ La technologie clé pour le développement d'une filière hydrogène reste l'électrolyse de l'eau. L'eau est une ressource pratiquement infinie et l'énergie à utiliser peut-être bas-carbone, même si l'électrolyse demande beaucoup d'énergie.

❑ Ce procédé reste encore limité par des faibles rendements, des problèmes techniques et des coûts trop élevés (4 à 8 €/kg).

❑ La production d'hydrogène par électrolyse stagne à quelques % dans les pays les plus développés (inférieure à 1 % globalement).

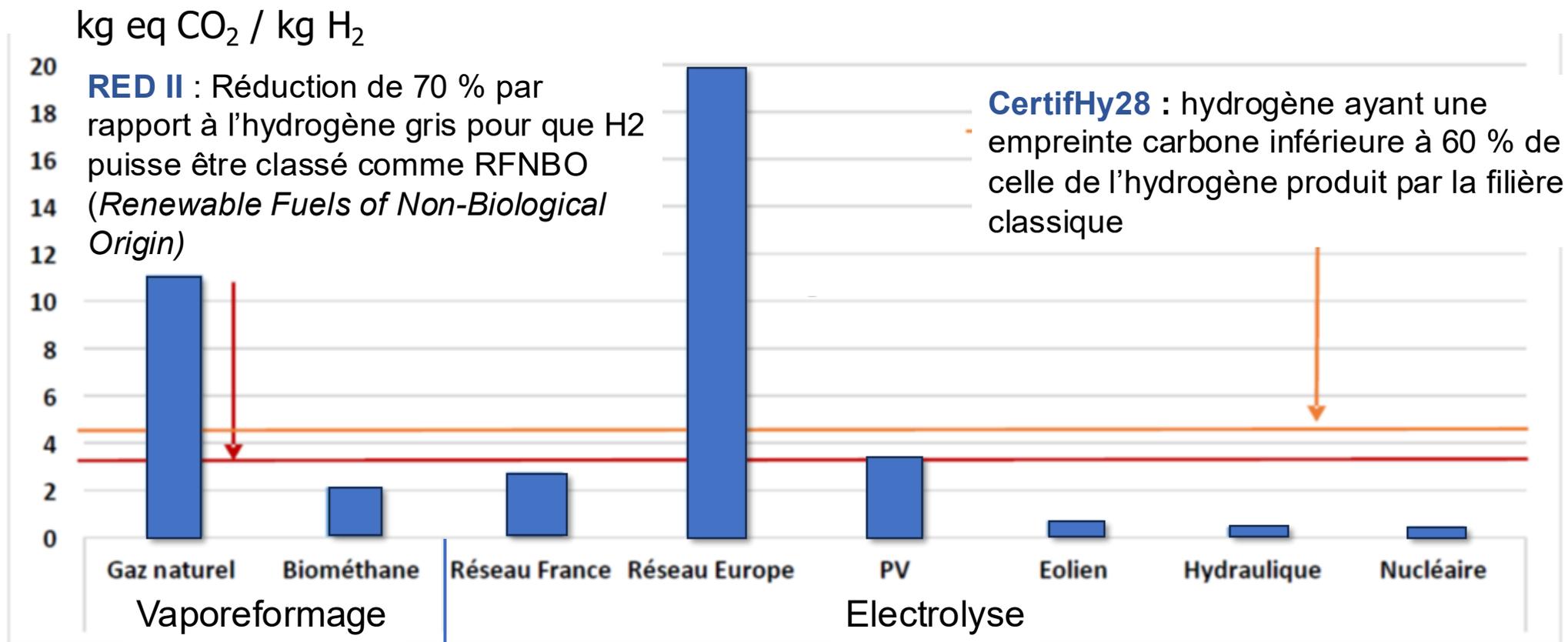


Cathode



Anode





Emissions de GES en ACV de différents moyens de production d'hydrogène (en kg eq CO₂ / kg H₂)

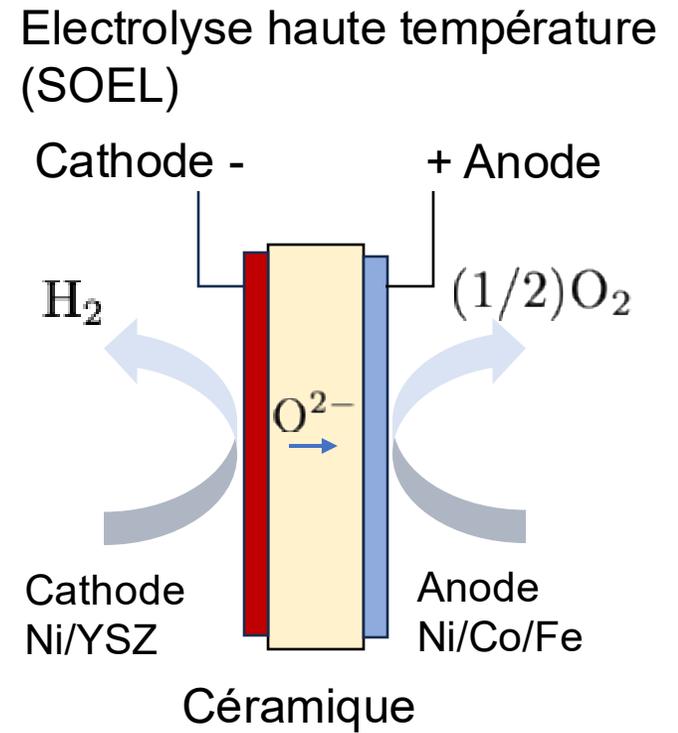
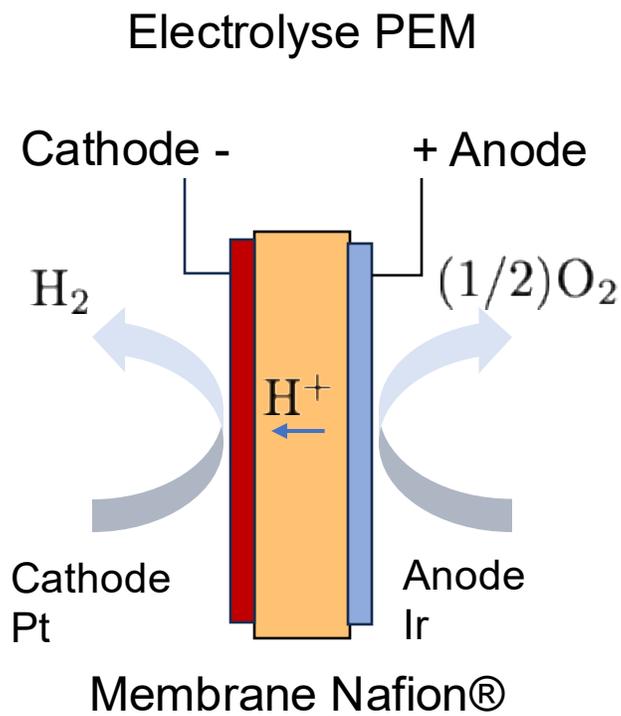
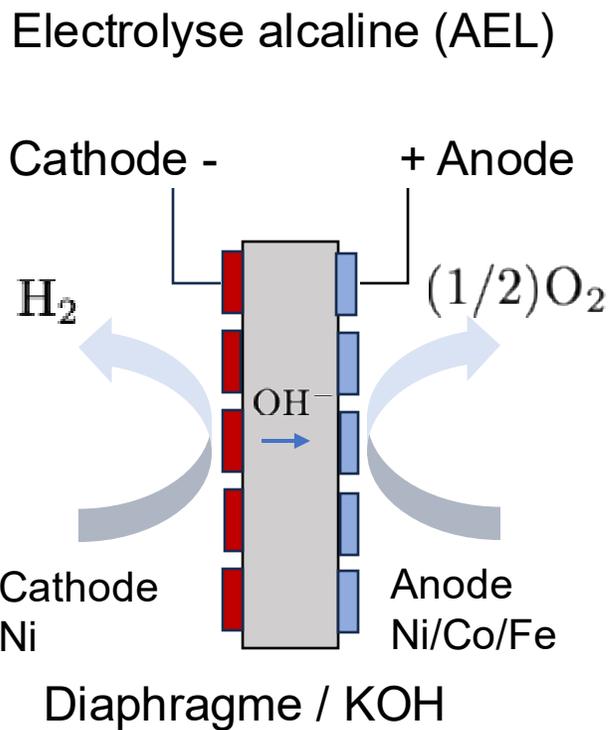
- ❑ **On ne peut appeler hydrogène vert tout hydrogène produit par électrolyse.** Le niveau d'émissions de CO₂ peut être très bas (< 1 kg eqCO₂ / kg H₂) si l'électricité est d'origine nucléaire, éolienne ou hydraulique
- ❑ Un pays comme la France, doté d'un mix électrique très décarboné, peut produire de l'hydrogène par électrolyse en n'émettant qu'environ 2 kg eq CO₂ / kg H₂



Un grand électrolyseur (24 MW), inauguré récemment, capable de générer jusqu'à 10 tonnes de H₂ par jour. Cette usine située à Porsgrunn, au sein du complexe industriel de Herøya, appartient à Yara International (nutriments pour végétaux sous forme d'engrais cristallisés) et lui permettra de réduire ses émissions de CO₂ de près de 40 000 tonnes par an. L'usine s'étend sur une superficie d'environ 1,5 km²

❑ **Beaucoup reste à faire en termes de recherche et d'innovation** pour développer des catalyseurs, des membranes plus résistantes, améliorer l'efficacité énergétique d'ensemble et la durabilité des électrolyseurs, avant déploiement à grande échelle

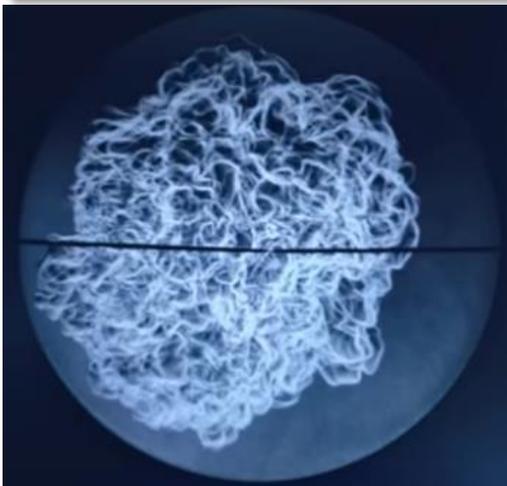
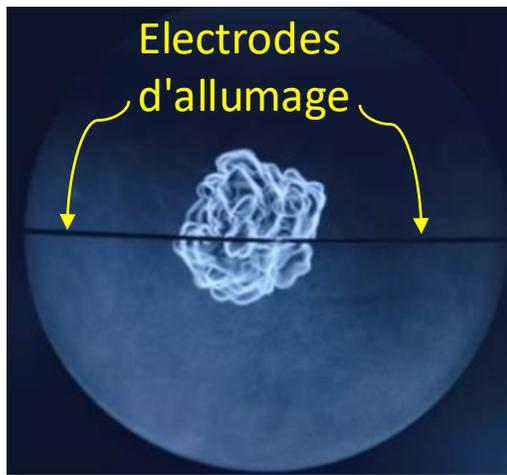
❑ Des technologies, qui consistent à **coupler dans le même dispositif des matériaux semiconducteurs et des matériaux catalytiques pour réaliser la décomposition de l'eau par exposition au rayonnement solaire**, décrites dès 1972 n'ont pas le niveau de maturité requis



Technologie	Alcaline (AEL)	Electrolyse PEM	Electrolyse haute température
Electrolyte	Solution aqueuse (KOH)	Membrane Nafion®	Zircone dopée (yttrium, scandium...)
Température	60-80°C	60-80°C	700-950°C
Pression (bar)	1-30 bar	10-60 bar	1 bar
Réaction (cathode)	$2 H_2O + 2 e^- \rightarrow H_2 + 2 OH^-$	$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	$H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + O^{2-}$
Réaction (anode)	$2 OH^- \rightarrow (1/2) O_2 + H_2O + 2 e^-$	$H_2O \rightarrow (1/2) O_2 + 2H^+ + 2 e^-$	$O^{2-} \rightarrow (1/2) O_2 + 2 e^-$

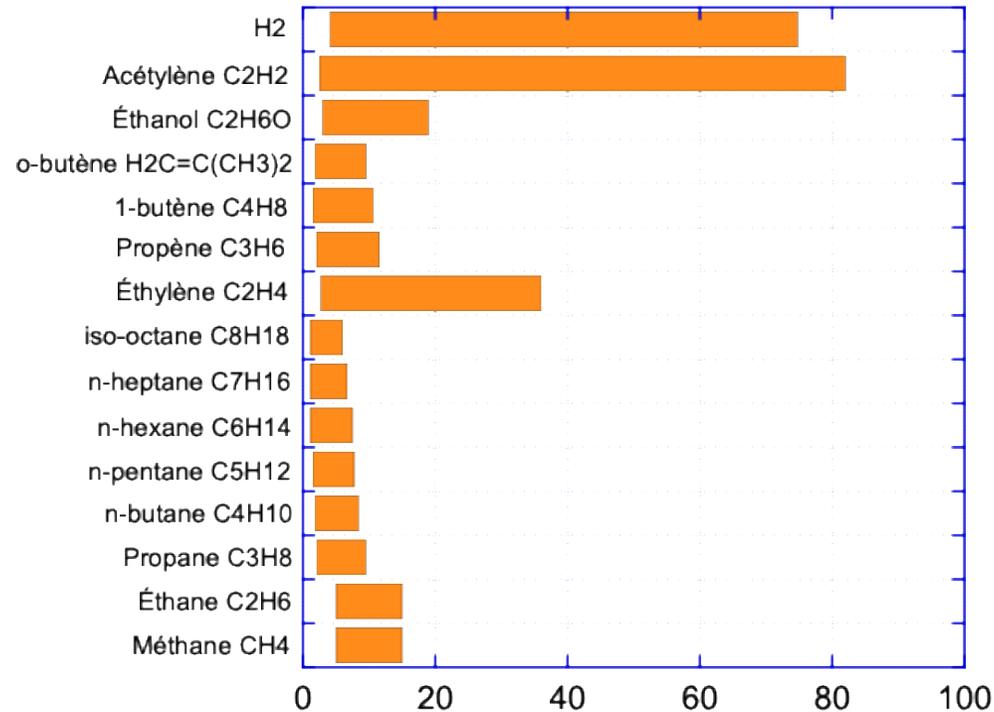
Type d'électrolyse	Atouts	Limites
<p>Électrolyse alcaline Technologie la plus mature, la moins coûteuse, utilisée industriellement</p>	Matériaux d'électrodes abondants et bon marché (acier, nickel, etc.)	Faibles rendements (60-65%). Sensible aux variations de courant, couplage direct à des sources électriques intermittentes limité
<p>Électrolyse à membranes échangeuses de protons (PEM) Plus récente, cette technologie est en développement sur le plan industriel</p>	Faible température (ambiante) Compatible avec des sources électriques intermittentes	Limite de durabilité : (i) membranes polymères, assurant la neutralité électrique, chères et fragiles ; (ii) milieu acide, corrosion, (iii) catalyseurs à base de métaux nobles (platine et iridium), (iv) rendements énergétiques <65%
<p>Électrolyse haute température à oxydes solides Technologie la moins mature. Genvia, un des acteurs principaux de ce domaine en France vise un électrolyseur de 1 MW en 2026 (produisant 600 kgH2/jour)</p>	La haute température (700-950°C), par couplage avec une source de chaleur, améliore le rendement (> à 80 %). Catalyseurs à base de métaux courants (nickel, oxydes métalliques)	Les membranes céramiques adaptées à la haute température restent fragiles . Supporte mal les variations de température
<p>Électrolyse à membranes échangeuses d'anions (AEM)</p>	Catalyseurs à base de métaux non nobles (nickel, oxydes métalliques)	Tenue de la membrane. Durée de vie. Gas cross-over. Technologie récente, loin de la maturité industrielle.

Combustion de l'hydrogène



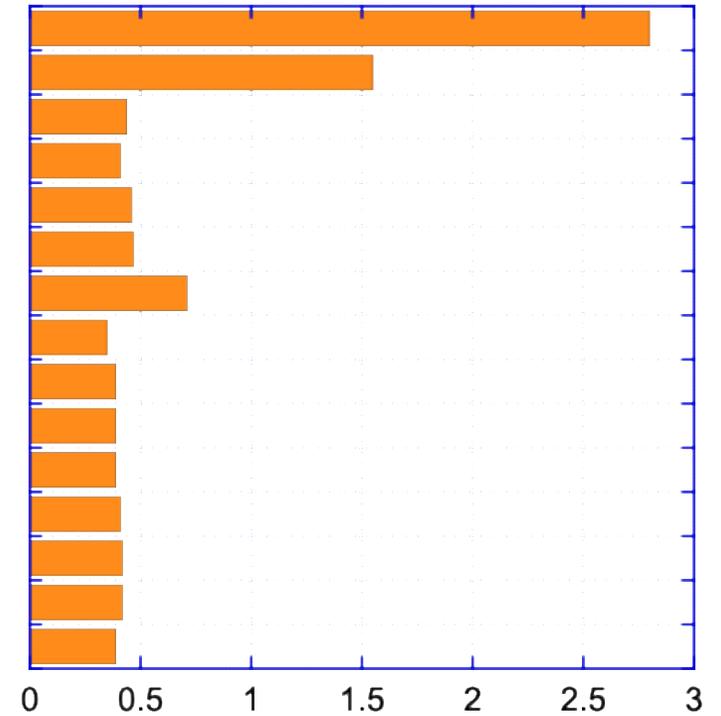
Propagation d'une flamme d'hydrogène dans une enceinte sphérique N. Chaumeix, CNRS, Orléans

- ❑ **L'énergie nécessaire à l'allumage** des flammes d'hydrogène est très faible



Limites d'inflammabilité (% vol)

- ❑ **Le domaine d'inflammabilité des mélanges hydrogène air est bien plus large** que ceux des autres hydrocarbures (il y a quelques exceptions)

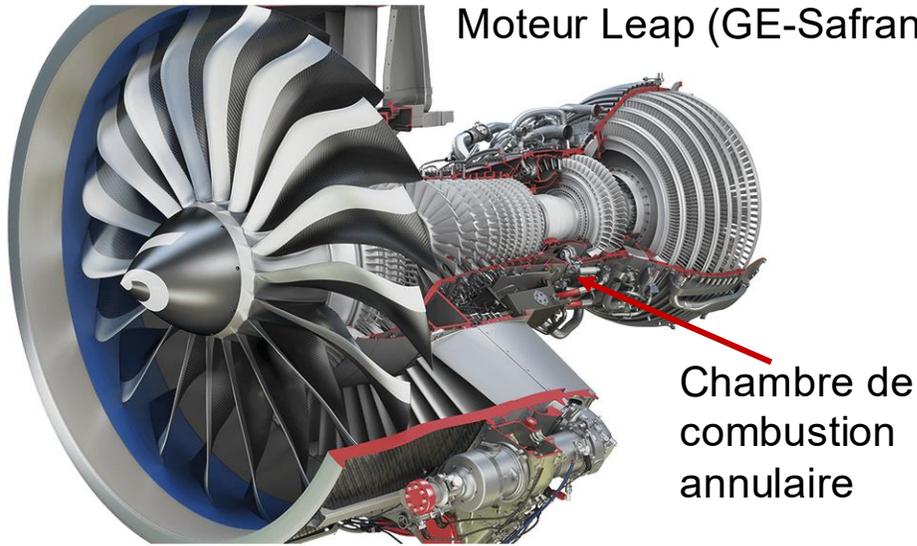


Vitesses de flammes (m/s)

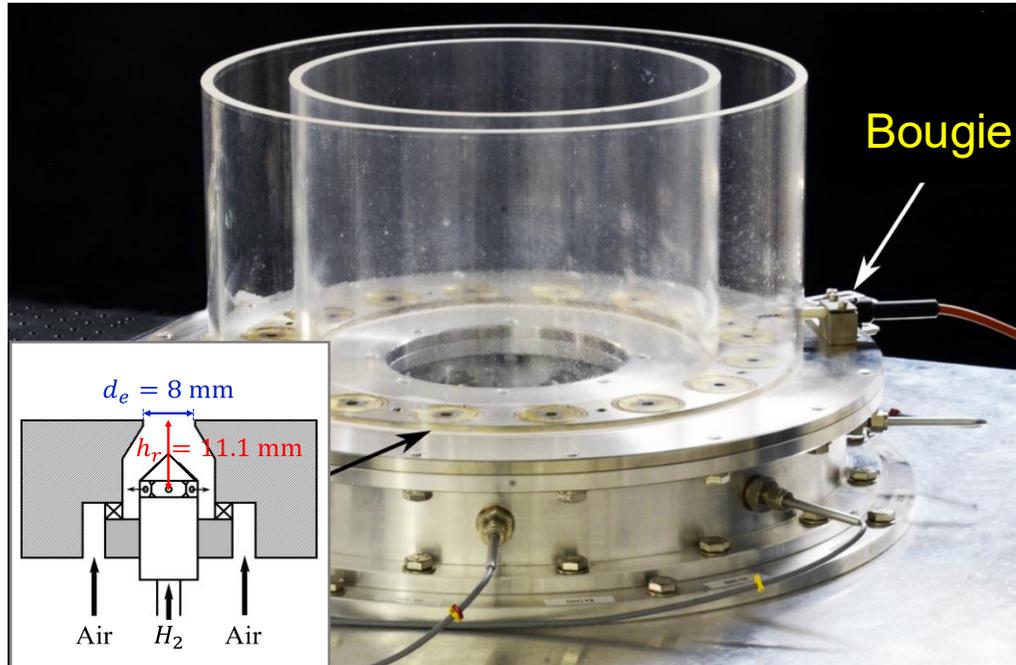
- ❑ **Les flammes d'hydrogène sont typiquement dix fois plus rapides** que les flammes d'autres combustibles (il y a quelques exceptions)

Allumage circulaire d'une chambre annulaire

Moteur Leap (GE-Safran)



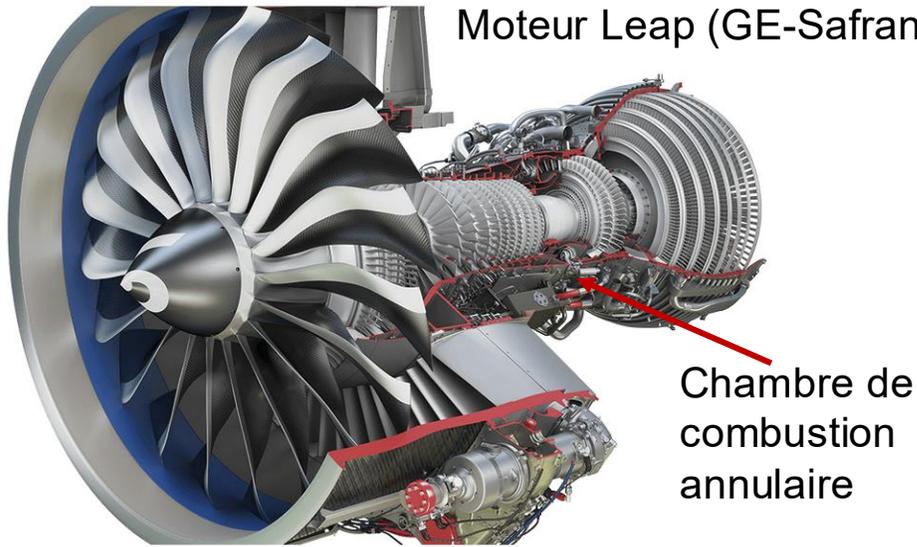
Chambre de combustion annulaire de laboratoire



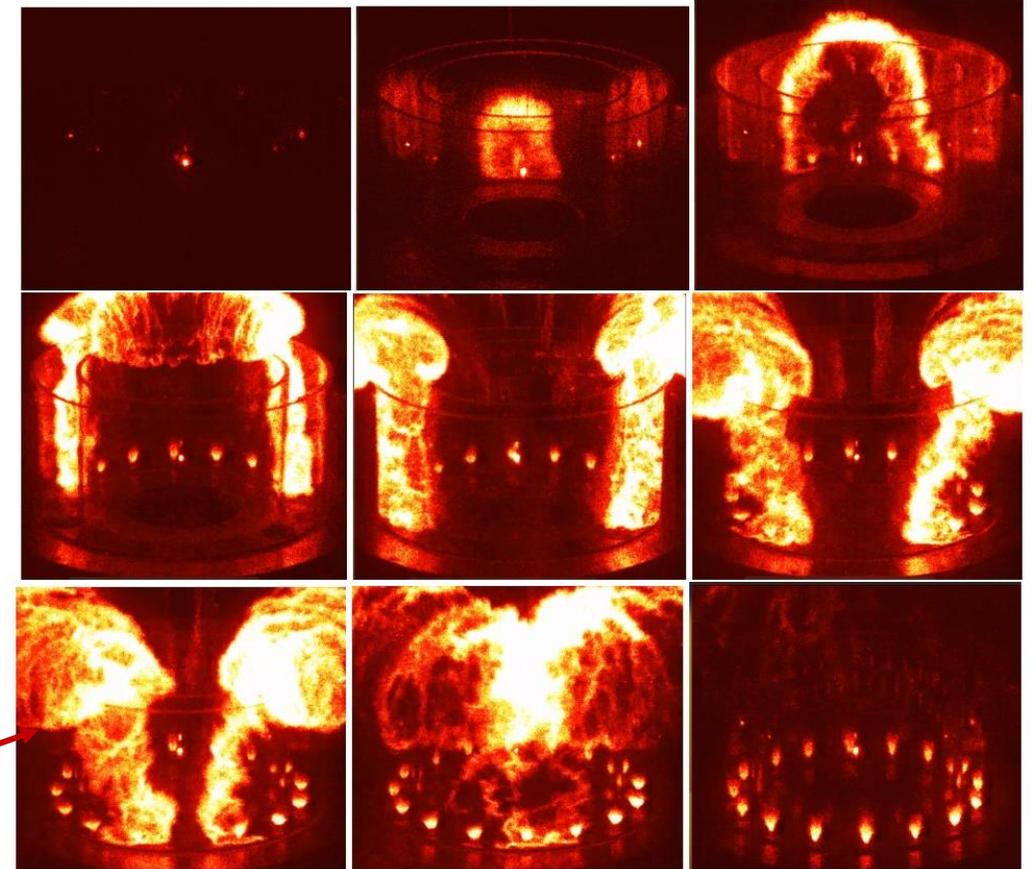
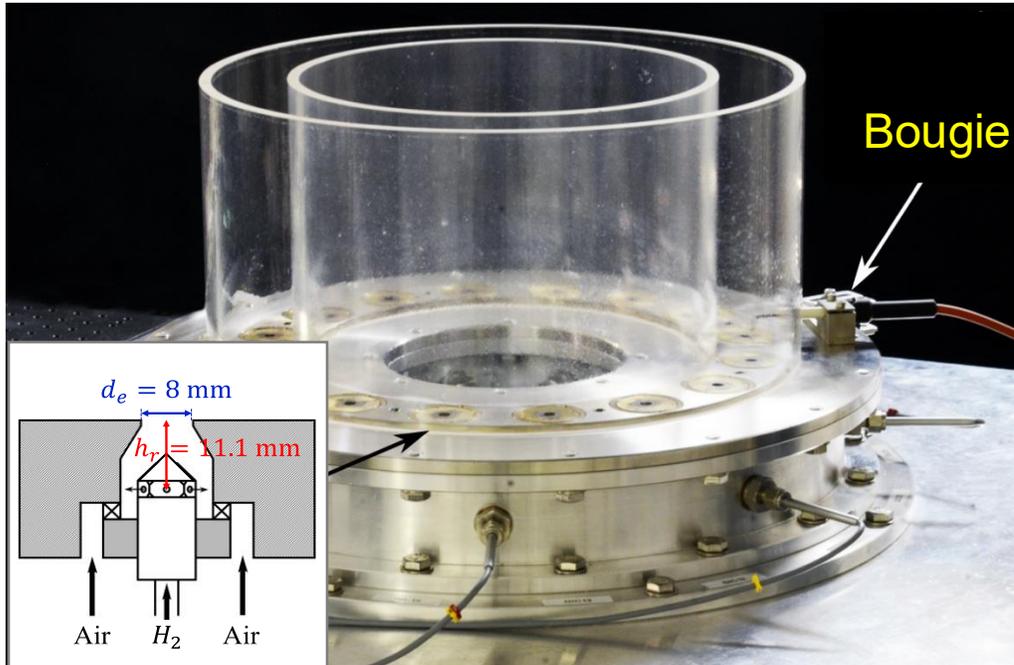
Film à 1000 images par seconde de l'allumage circulaire (light round). La chambre comporte 16 injecteurs alimentés en air et hydrogène pur. L'allumage, initié par l'étincelle d'une bougie, se déroule en 25 ms (EM2C, CNRS, CentraleSupélec)

Allumage circulaire d'une chambre annulaire

Moteur Leap (GE-Safran)



Chambre de combustion annulaire de laboratoire



Film à 1000 images par seconde de l'allumage circulaire (light round). La chambre comporte 16 injecteurs alimentés en air et hydrogène pur. L'allumage, initié par l'étincelle d'une bougie, se déroule en 25 ms (EM2C, CNRS, CentraleSupélec)

Enjeux de sécurité actuels et à venir de l'utilisation de l'hydrogène

FUITE D'HYDROGÈNE

Allumage
immédiat

Allumage ultérieur après accumulation
et mélange dans une ambiance confinée

Flammes et feux

Explosions



A gauche : flamme d'hydrogène ancrée sur un réservoir haute pression. A droite : propagation d'une explosion dans un canal

- ❑ En présence d'air, l'hydrogène s'allume facilement, dans une large gamme de compositions et de températures, pour des énergies d'allumage faibles. Une décharge électrostatique peut suffire
- ❑ Les flammes d'hydrogène sont typiquement dix fois plus rapides que les flammes d'autres combustibles
- ❑ Petite, la molécule H_2 est plus à même de fuir que celle des autres gaz. L'hydrogène fragilise les métaux, augmentant les risques de rupture des réservoirs et la probabilité de fuite,
- ❑ Dans un lieu confiné, l'hydrogène accumulé peut conduire à des explosions violentes. Dans certaines conditions et notamment en présence d'obstacles, l'explosion peut transitionner vers une détonation

Station-service en
Norvège (2019)



- ❑ Les applications prévues pour l'hydrogène conduisent à l'employer dans des conditions nouvelles potentiellement dangereuses. Ainsi, l'utilisation de réservoirs haute pression (700 bar) dans les voitures pose des problèmes spécifiques : à de telles pressions, la probabilité de fuite est plus élevée et peut donner lieu à un auto-allumage (en absence d'étincelle)

site de production en
Californie (2019)



- ❑ Toute erreur de manipulation, par exemple au moment du remplissage des réservoirs, peut mener à des feux avec des effets destructeurs

Deux domaines où la sécurité est une question critique



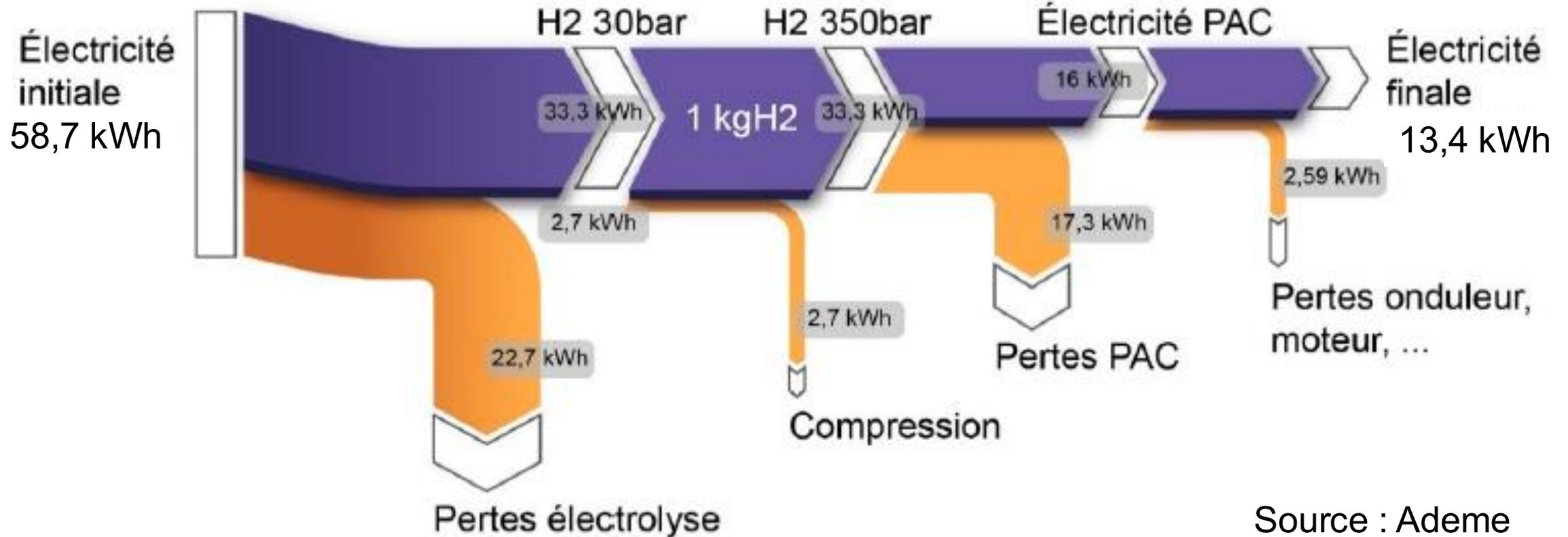
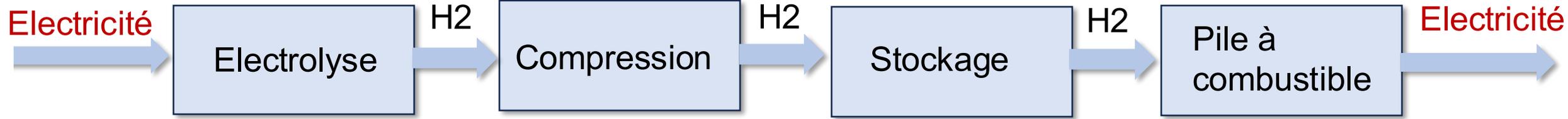
Concept d'avion à hydrogène à fuselage mixte (BWB). Source : Airbus



Pour décarboner son acier, ArcelorMittal mise sur l'hydrogène vert

- ❑ **L'emploi de l'hydrogène liquide à 20K envisagé pour le stockage dans les avions.** La compréhension des scénarios « combustion » dans le cas de fuites d'hydrogène liquide reste parcellaire
- ❑ **L'utilisation conjointe d'hydrogène et d'oxygène** permet **d'atteindre** les températures élevées nécessaires à la mise en œuvre de certains procédés industriels (ciment, acier, verre, etc.). Manipuler de grandes quantités de ces deux gaz, même dans un cadre industriel, soulève des problèmes de sécurité, (bien connus dans des domaines particuliers comme la propulsion par fusée, le raffinage...)

Le rendement de la chaine « power-to-hydrogen-to-power »



Source : Ademe

Du fait des pertes énergétiques, cette chaine restitue 23% de l'énergie électrique initiale. Les chiffres correspondent à 1 kg d'hydrogène

L'hydrogène vert pourrait permettre de...

- ❑ **Décarboner les usages actuels de H₂ (en remplacement de l'hydrogène gris) :** (1) le raffinage (il y aura encore du pétrole à raffiner en 2040-2050) ; (2) la production d'ammoniac (engrais) ; (3) la pétrochimie (gaz de synthèse, méthanol...) à hauteur de 0,9 Mt aujourd'hui, peut-être à hauteur de 0,4 Mt en 2050 (pour tenir compte essentiellement d'un moindre besoin de raffinage)

- ❑ **Décarboner de nouveaux usages, notamment dans des secteurs où l'électrification directe ne sera pas possible à court terme :** (1) décarbonation de la production d'acier (remplacement du procédé au coke par un procédé à H₂), (2) du ciment, (3) de la mobilité lourde avec la production de carburants avancés (ou carburants durables), issus de la valorisation du CO₂ par hydrogénation, à un niveau, pour le moment, difficile à anticiper mais qui pourrait correspondre à 1 Mt supplémentaire



Quelques grandes orientations

- ❑ **Décarboner la production d'hydrogène**, un enjeu important sur le plan industriel. L'hydrogène peut devenir l'un des leviers de décarbonation de procédés haute température et pourrait permettre la production de carburants durables pour l'aviation
- ❑ **Poursuivre l'effort de R&D** pour améliorer l'ensemble des éléments (efficacité des électrolyseurs et des piles à hydrogène, durée de vie, réduction de leur empreinte environnementale, logistique de stockage et de transport)
- ❑ **Augmenter les capacités d'électrolyse en améliorant les technologies** pour réduire le prix de production et le ramener en dessous de 3 €/kg (aujourd'hui selon les technologies entre 4 et 8 €/kg à comparer à 1,5-2 €/kg pour l'hydrogène gris)
- ❑ **Faire un effort significatif sur les questions de sécurité**, notamment dans le domaine des transports, où un ou quelques accidents dus à l'hydrogène pourraient bloquer toute politique de déploiement

Quelques grandes orientations

- ❑ **Conduire une politique d'arbitrages** entre les différents usages de H₂ pour éviter de basculer dans un niveau de demande inaccessible. Priorité à donner à l'utilisation d'hydrogène vert pour la décarbonation de l'industrie et de certains transports
- ❑ **Limiter le niveau des importations d'hydrogène** pour éviter de passer d'une dépendance extérieure forte (importations de ressources fossiles) à une autre (importations d'H₂)
- ❑ **Soutenir sans hésitation les projets d'exploration** du sol français visant à évaluer rigoureusement le potentiel réel en hydrogène naturel



Isabelle Moretti : L'hydrogène naturel : l'exploration a démarré mais quelle production attendre et quand ?
Photo: Science et Avenir



Interview de **Marc Fontecave** sur YouTube

Cycle Hydrogène
Production d'hydrogène par électrolyse

Energy@Paris Saclay - E@PS

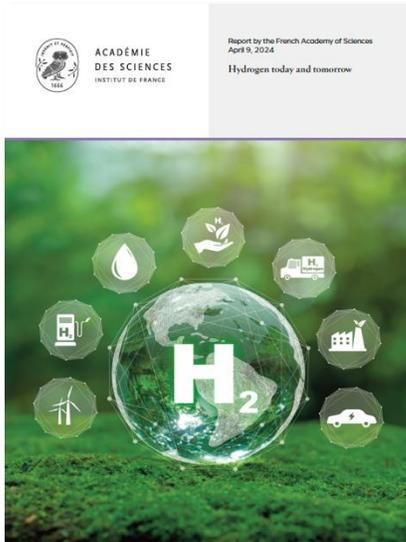
Déroulé des webinaires sur l'Hydrogène sur 2021 et 2022 :

- W1 : **Session introductive** : Hydrogène, état de l'art international, évolutions et perspectives ; 24 mars 2021
- À revoir https://www.youtube.com/channel/UCaW1_V3u0RXRtWZ1KCvHkQ
- W2 : **Production d'hydrogène par électrolyse I** ; 9 juin 2021
- W3 : **Production d'hydrogène par électrolyse II** ; 7 juillet 2021
- W4 : **Production chimique et biochimique** ; 22 septembre 2021
- W5 : **Transport de H₂ et distribution** ;
- W6 : **Stockage de H₂** ;
- W7 : **Utilisation de H₂**, aspects fondamentaux ;
- W8 : **Usages stationnaires et mobiles** ;
- W9 : **Bilan**, évolutions et perspectives.

Animation
Patrick Guenoun
Daniel Ritti

E@PS - WTE 2021 - CYCLE HYDROGENE 09 juin 2021

Cycle hydrogène (2021)
(Energy@Paris-Saclay) YouTube



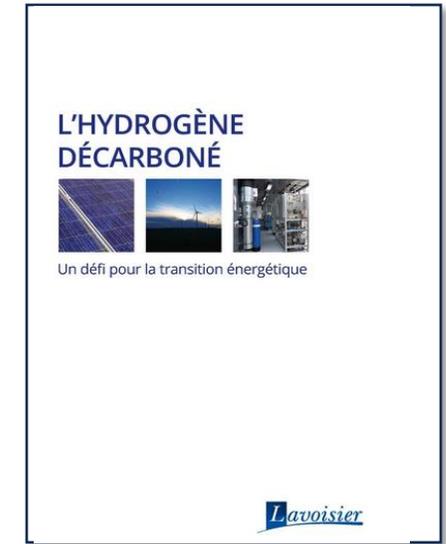
L'hydrogène aujourd'hui et demain (2024)



Rôle de l'hydrogène dans une économie décarbonée (2020)



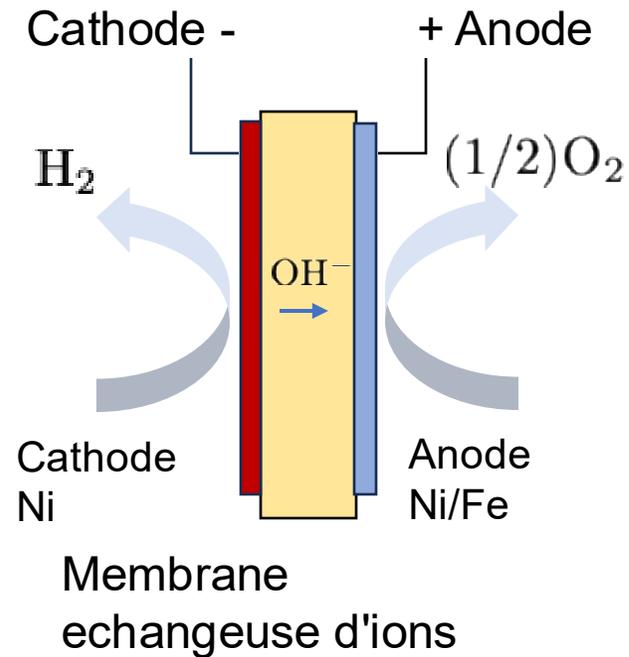
Y-aura-t-il trop d'électrolyseurs en France pour la demande prévisible (2024)



L'hydrogène décarboné (2019)



Electrolyse par membrane échangeuse d'anions (AEM)



- ❑ L'électrolyse par membrane échangeuse d'anions (AEM) utilise une membrane conductrice d'ions hydroxyde (OH^-). La membrane sépare les produits, assure l'isolation électrique entre les électrodes et conduit les ions hydroxyde.
- ❑ Ce type d'électrolyse fonctionne dans un environnement alcalin, ce qui permet d'utiliser des catalyseurs non nobles et peu coûteux à base de Ni, Fe, Co, etc.
- ❑ La durée de vie des membranes est relativement courte quelques milliers d'heures et elles ne tolèrent pas des températures supérieures à 60°C . La traversée de l'hydrogène pour rejoindre le côté oxygène (gas crossover) peut aussi induire un risque d'explosion (si le contenu en hydrogène dépasse 4% en mol)

Technologie	Anion exchange membrane
Electrolyte	Solution aqueuse faiblement alcaline
Température	$<60^\circ\text{C}$
Réaction (cathode)	$2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2 \text{OH}^-$
Réaction (anode)	$2 \text{OH}^- \rightarrow (1/2) \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^-$

Hydrogène naturel : quelles ressources ?

- ❑ **On sait depuis longtemps qu'il y a des émanations d'hydrogène gazeux** en de nombreux endroits de la surface de la terre et laisse anticiper des quantités importantes de ce gaz. Cet hydrogène, « blanc » est particulièrement intéressant car il est naturel, obtenu sans aucune production parallèle de CO₂
- ❑ **On commence à comprendre de façon détaillée les mécanismes de sa synthèse** essentiellement au travers de réactions d'oxydoréduction (serpentinisation) entre des roches contenant des minerais de fer ferreux et de l'eau. Les ions ferreux transfèrent leurs électrons à l'eau produisant de l'hydrogène de façon continue dans la croûte terrestre, à grande profondeur (1500-3000 m). Cette réaction est favorisée par des températures élevées
- ❑ **On ne dispose pas, à l'heure actuelle, de suffisamment d'expériences d'exploration et de données**, pour fournir une évaluation précise des potentialités mondiales en production d'hydrogène naturel
- ❑ **Il est trop tôt pour dire si cette ressource naturelle pourra être exploitée** industriellement et à quel coût. Il faut non seulement mettre au point les technologies pour capturer ce gaz très diffusif mais également pour le purifier
- ❑ **La première étape devrait être la détermination précise des volumes accessibles**, paramètre clé pour conclure si l'hydrogène naturel jouera un rôle majeur demain

- ❑ **Découverte d'un gisement d'hydrogène natif en Lorraine**, dans le cadre d'un projet R&D entre le Laboratoire GeoRessources (Université de Lorraine/CNRS) et la Française de l'Énergie sur financement mixte État (Pacte Lorraine), Région Grand-Est et FEDER (Fonds européens de développement régional)
- ❑ **La collaboration entre GeoRessources et la société Solexperts**, a conduit à un dépôt de brevet européen relatif à la création de la sonde SysMoG™ qui permet la mesure des gaz dissous dans l'eau d'un forage profond. Cette sonde est associée à un banc de spectroscopie vibrationnelle, FT-IR et Raman, développée au laboratoire GeoRessources
- ❑ **Les estimations de ressources en H2 natif** ne peuvent pas être faites à partir de mesures en surface. L'établissement d'un profil de concentration en fonction de la profondeur est une avancée pour une telle estimation

- ❑ **A -1250 m de profondeur, la teneur en H2 dans la phase gaz est de l'ordre de 18 % en fraction molaire**, cela correspond à une teneur en hydrogène dissout égale à 2,8 mg/L. Le profil linéaire d'évolution de cette teneur entre -600 et -1250 m, (dans la partie supérieure du Carbonifère Lorrain), conduit à imaginer une source profonde et potentiellement importante d'hydrogène



La sonde SysMoG™ positionnée avant la descente dans le forage. Le dispositif a été miniaturisé pour qu'il puisse être introduit dans un puits de 6 cm de diamètre