

LE RÔLE DE L'HYDROGÈNE POUR LA NEUTRALITÉ CARBONE

Le message H2

- L'hydrogène, l'élément le plus abondant et le plus ancien de l'Univers, est apparu il y a 13 milliards d'années.
- De l'Antiquité au siècle des lumières, à la suite d'Aristote, tous les savants...
- Le philosophe et médecin suisse Paracelse (1493 -1541), qui était aussi alchimiste et physicien, se demande si « l'air » qui se dégage lors de la réaction du vitriol sur le fer est bien identique à l'air que nous respirons
- Lavoisier (1743 – 1794) synthèse de l'eau par combustion
- En 1800 William Nicholson et Anthony Carlisle confirment la composition de l'eau en découvrant l'électrolyse
- En 1839, Christian Friedrich Schönbein et William Grove découvrent le principe de la pile à combustible
- Au début du XXème siècle, les allemands Fritz Haber (Prix Nobel en 1918) et Carl Bosch (Prix Nobel en 1931) inventent le procédé de synthèse de l'ammoniac
- Ballard qui créa en 1979 la compagnie « Ballard Power Systems »

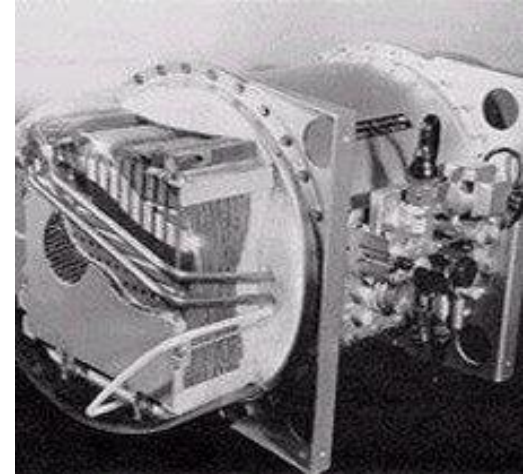
Quelle histoire !

Les plans français et européens

- 1974 plan français l'Ademe
- 1998 Réseau PACO
- Programme de l'Union Européenne depuis 2000, deux fois 1Md€
- Financement 2020 dans le cadre du plan de relance 6,7 Mds€

Lobby

- Joint initiative européenne : Hydrogen Europe
- France Hydrogène
- Implication de la commission dans le lobby
- Europe Hydrogène backbone
- Position allemande



L'hydrogène bas carbone : rôle dans la décarbonation et modes de production

Hydrogène actuel: « *H₂ gris* »: obtenu par vaporeformage à partir de sources fossiles

Le rôle de l'hydrogène bas carbone

Décarboner des activités historiquement consommatrices d'hydrogène

- Production d'ammoniac (NH_3)
- Raffinage ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$)
- Production de méthanol (CH_3OH)

Décarboner d'autres activités fossiles en développant de nouveaux procédés

- Sidérurgie : réduction de minerai de fer (*direct reduction of iron*, DRI) par l'hydrogène

Être utilisé comme vecteur énergétique décarboné

- Carburants de synthèse
- Production de chaleur (33kWh/kgH₂)
- Production d'électricité (rendement 30 %)

La production d'hydrogène bas carbone

Vaporeformage avec capture et séquestration carbone (CCS)
« *H₂ bleu* »

Extraction de l'hydrogène du méthane à l'aide de vapeur d'eau ($\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$) puis capture et séquestration du carbone émis.

Électrolytique renouvelable
« *H₂ vert* »

Décomposition de l'eau (H_2O) en ses composants de base : l'hydrogène (H_2) et l'oxygène (O_2), par le passage d'un courant électrique ($2\text{H}_2\text{O} = 2\text{H}_2 + \text{O}_2$).

Électrolytique nucléaire
« *H₂ rose* »

L'électricité provient d'énergie renouvelable ou d'énergie nucléaire.

Natif
« *H₂ blanc* »

Exploitation de gisements d'hydrogène à la surface de la terre.

Les prix de l'énergie, la technologie de capture et stockage du carbone (CCS) et l'H₂ natif sont des facteurs d'incertitudes importants sur le développement de l' H₂ électrolytique

Les prix de l'énergie et du carbone

- Le coût de production de l'**hydrogène électrolytique** bas carbone dépend des investissements initiaux et du **prix de l'électricité**.
- Le coût de l'**hydrogène fossile** dépend des investissements initiaux, du **prix du gaz** et du **prix du carbone**.

La capture et séquestration CO₂ (CCS)

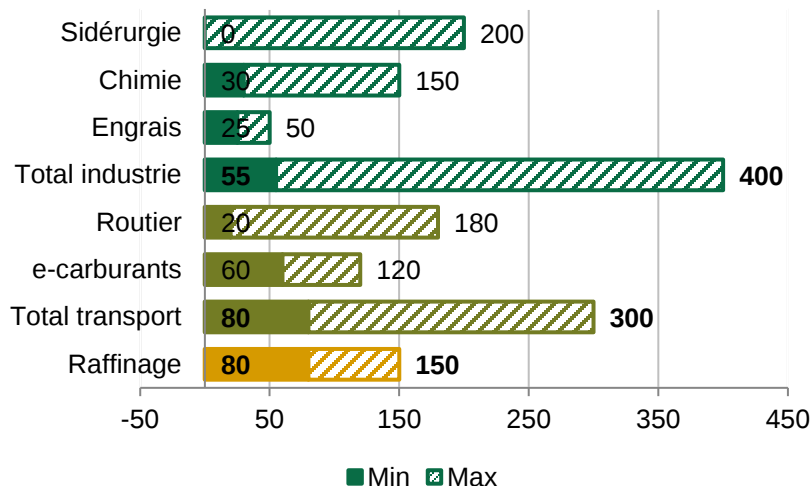
- Certains industriels envisagent de décarboner leur production d'hydrogène par CCS (H₂ bleu) ou de décarboner leurs procédés industriels directement par CCS sans avoir recours à de l'H₂ bas carbone.
- Le captage renchérit le coût de l'H₂ produit par vaporeformage de l'ordre de 1 à 2 €/kg
- L'H₂ bleu restera plus cher que l'H₂ gris tant que le coût du CCS sera plus élevé (estimé entre 100 et 200 €/tCO₂) que le quota carbone.
- L'H₂ produit par vaporeformage et CCS (bleu) est aujourd'hui plus compétitif que l'H₂ électrolytique.

L'hydrogène blanc ou natif

- La présence d'hydrogène à la surface de la terre, qu'il s'échappe du sol ou qu'il soit piégé dans des configurations géologiques, est observée de plus en plus fréquemment dans de nombreux pays et suscite l'intérêt d'investisseurs en particulier en Australie et aux USA.
- **Les travaux d'exploration** des gisements pyrénéens et, le cas échéant, lorrains permettront de caractériser leur potentiel réel.
- **le modèle économique reste à préciser** pour une potentielle exploitation industrielle de tels gisements dans **prochaine décennie**.

La consommation d'hydrogène électrolytique décarboné en France à l'horizon 2030

Le SGPE prévoit une consommation totale d'hydrogène électrolytique comprise entre 215 et 850 kt en 2030

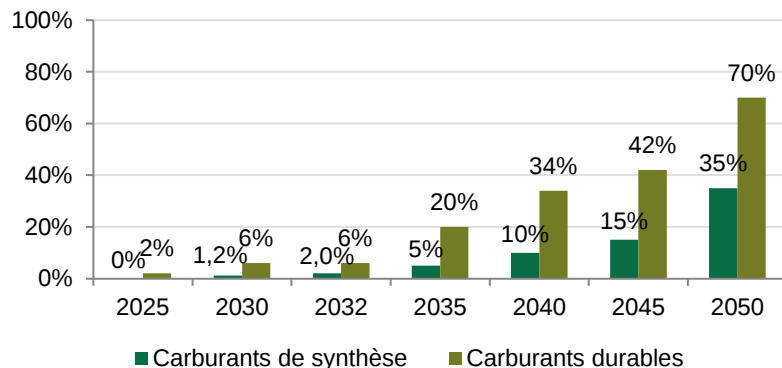


Dans l'industrie, la consommation d'hydrogène devrait s'illustrer notamment par:

- **Raffinage** : appel d'offres de TotalEnergies pour la fourniture de 500 kt par an à horizon 2030 d'H₂ bas carbone à ses raffineries européennes
- Les obligations relatives aux **carburants de synthèse dans l'aérien** entreront progressivement en vigueur à **partir de 2030**

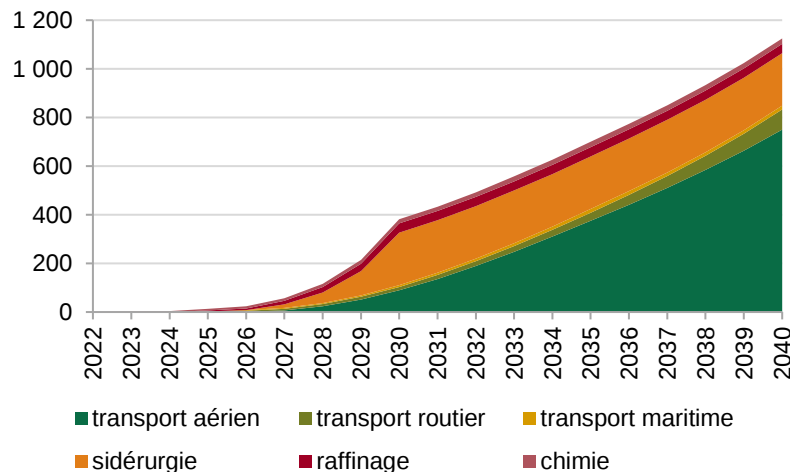
Le Carburant d'Aviation Durable (CAD) devrait porter la demande d'hydrogène bas carbone via le développement des carburants de synthèse

Obligations européennes d'incorporation minimale de carburants durables pour l'aviation (ReFuelEU Aviation)



Note de lecture : en 2050, au moins 70 % des carburants fournis dans les aéroports de l'Union européenne devront être durables dont au moins la moitié (ie. 35 % du total) de synthèse.

Évolution de la demande en hydrogène électrolytique en France, par usage (en kilotonnes, prévisions du CEA)



Le cadre réglementaire devrait conduire au développement d'une filière de carburants d'aviation de synthèse en France

Un cadre réglementaire et technique favorable au développement des e-carburants

- Le transport aérien est le **seul secteur qui fait l'objet d'obligations européennes prescriptives et progressives** d'incorporation d'hydrogène bas carbone, via les carburants de synthèse.
- Il s'agit du **principal levier de décarbonation** du secteur et est nécessaire pour réduire les émissions du transport aérien faute d'alternative technique.

Plusieurs projets de production de e-carburants en France ont été annoncés

- **Plusieurs projets de production d'e-kérosène d'échelle industrielle** ont déjà été **annoncés** en France et totalisent une capacité de production de 300 kt/an en 2030.

Le développement de cette filière est une opportunité de renforcer notre souveraineté énergétique

- Les carburants de synthèse peuvent être techniquement produits en France, si on a l'électricité nécessaire.
- Le cadre réglementaire, économique et énergétique est **incitatif au développement d'une filière de carburants de synthèse pour l'aviation en France**

Quels clusters locaux ?

Ecosystèmes locaux ou clusters industriels

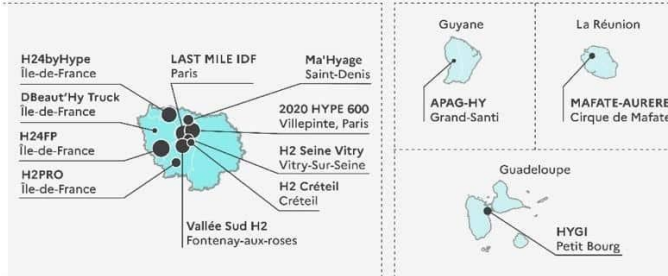
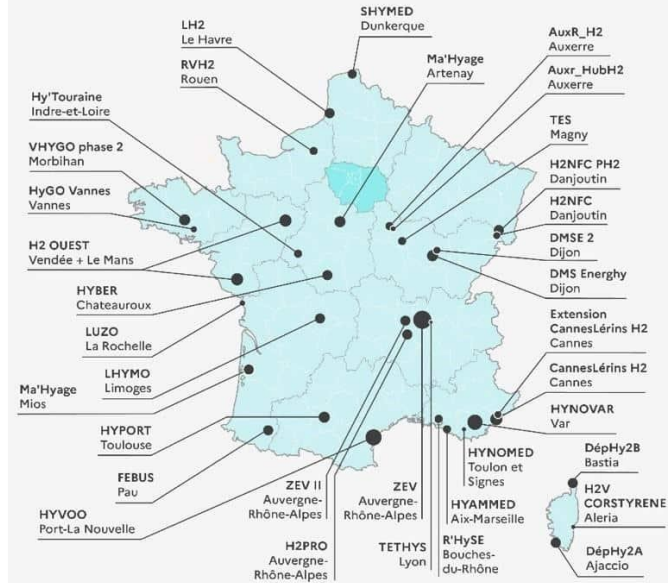
• AAP des écosystèmes locaux de l'Ademe

- Très soutenu politiquement
- Ciblé mobilité
- Petits électrolyseurs
- Largement financé par l'Etat (175 M€) plus de 50 dossiers

Ou six clusters industriels :

- Fos sur Mer, Vallée de la chimie, Lacq, Dunkerque, Le Havre...
- Avec des clients existants
- Des services partagés en distribution, en stockage...
- Eventuellement des terminaux d'importation

Découvrez tous les écosystèmes hydrogène soutenus par l'ADEME



La taille des points correspond au montant des investissements

L'Agence internationale de l'énergie doute fortement du développement d'un commerce international de la molécule d'H₂ au cours de la prochaine décennie

La part de projets de production d'H₂ dédié à l'export qui ont passé le stade de la décision finale d'investissement est très faible

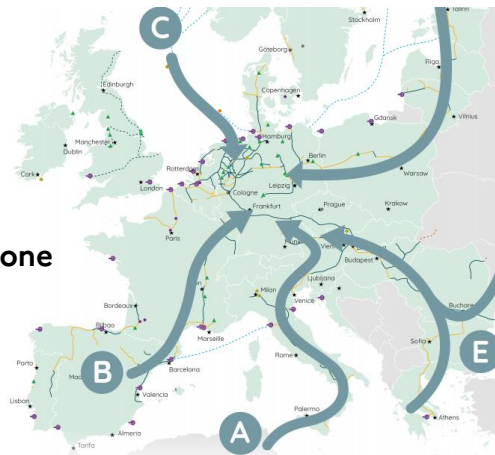
- 75 % des projets d'exportation annoncés à 2030 ne sont encore que des « **concepts** » sur lesquels un développeur de projet communique sans savoir si le projet est faisable.
- À ce jour, **seuls trois projets d'exportation** dans le monde ont atteint le stade de la **décision finale d'investissement**.
Au total, la quantité d'hydrogène exporté, sous forme d'ammoniac, **serait inférieure à 0,3 Mt d'équivalent hydrogène d'ici 2030**.

Dans ce contexte, l'AIE doute du développement d'un commerce international de l'H₂ au cours de la prochaine décennie

*« Malgré la forte dynamique des annonces d'exportation d'hydrogène au cours des dernières années, la faible proportion de projets commerciaux ayant atteint des stades de planification avancés **témoigne d'une grande incertitude quant à la capacité de développer un marché d'exportation à grande échelle au cours de la prochaine décennie** »*
(AIE, Global Hydrogen Review 2023).

L'initiative European Hydrogen Backbone

CAPEX total entre 80 et 143 Md€



Le message H2

Ce que vous ne trouverez pas

- **Les bases de rendements**

- Les rendements d'électrolyse sont au mieux de 60%

- **Les bases de cout**

- L'hydrogène électrolytique sera donc deux à trois fois plus cher au MWh que l'électricité

- L'électricité étant aujourd'hui deux à trois fois plus cher que le gaz

- **Les technologies d'électrolyseurs**

- Les électrolyseurs alcalins pH=13, densités de courants 2A.cm², membranes de 4m²...

- Les électrolyseurs PEM, catalyseurs métaux précieux, durée de vie...

- Les électrolyseurs à haute température, céramiques, étanchéité...

MERCI DE VOTRE ÉCOUTE