

L'hydrogène

Par Frédéric Livet
(Association « Sauvons le climat »)

Plan :

- Bref résumé
- A quoi sert l'hydrogène actuellement?
- Comment on le produit ?
- Comment on peut le produire ?
- A quoi pense-t-on l'utiliser ?
- Pourquoi on se lance là dedans ?
- Un exemple : les bus de Dijon

La Physique-Chimie de l'Hydrogène

- Unité de base : 1kg H₂=33-39KWh, ou 119-140MJ (PCI/PCS)
- À pression normale, 1m³=89g et ~3KWh
- Methane : 1Kg=12-15KWh, 1m³=0.7Kg et ~10KWh
- Liquide : 1m³=71Kg à 20K (-253°C)
- Comprimé : 350bars : 22Kg/m³, 700 bars 42Kg/m³
- Gaz-oil : 1Kg=12KWh, 1m³=700Kg et ~10MWh
- Impulsion spécifique H₂-O₂ : 435s (spatial)

Pourquoi l'hydrogène aujourd'hui ?



La solution à quoi ?

Un journal scientifique : *International Journal of Hydrogen Energy*, 45,000pages/an

L'hydrogène est un produit chimique !

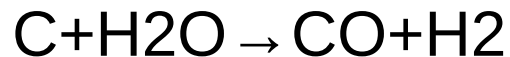
L'industrie fait une large utilisation de l'hydrogène :

- La production d'engrais à partir d'ammoniac
- Le reformage des hydrocarbures après cracking
- L'industrie des semi-conducteurs...

Production annuelle française : ~900,000tonnes, obtenues à partir de combustibles fossiles. Le Gaz (SMR) :



a remplacé le vieux « gaz à l'eau » :



Emissions CO₂ : ~10Kg CO₂/Kg H₂

Donc, c'est 10Mt de CO₂ pour la France, 3 % de nos émissions, comparables à celles de l'aviation.

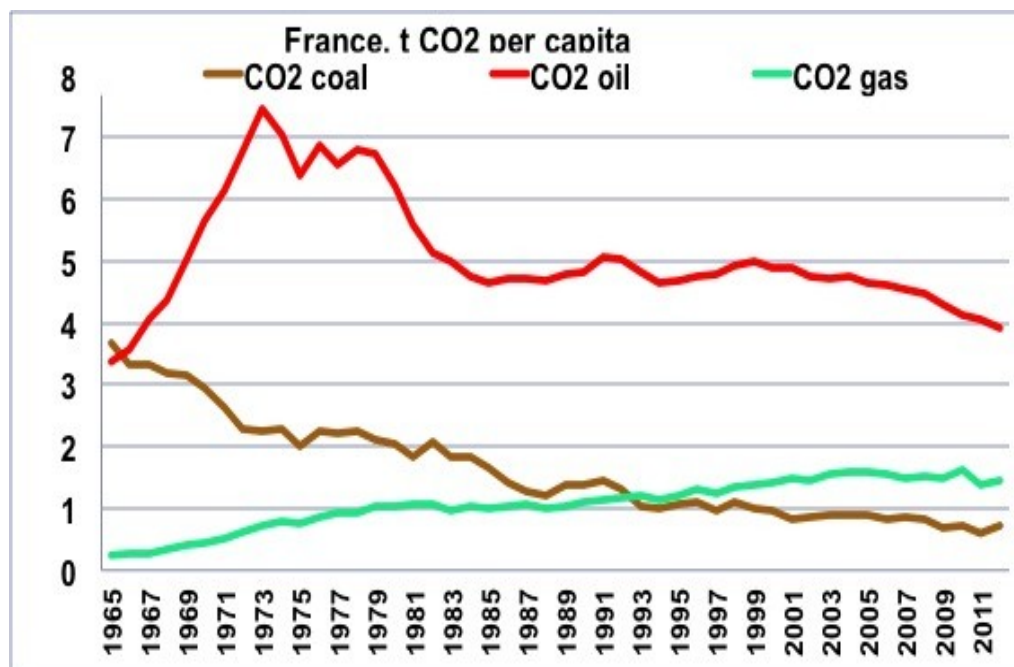
La situation industrielle

Les deux entreprises impliquées sont des leaders mondiaux : Air Liquide en France (AL) et Linde en Allemagne.



Une carte des pipelines de H2 dans le Nord de l'Europe. Ce sont des gaz industriels, comme
Il y a des transports d'oxygène..

Les émissions françaises (CO2)



Il semble urgent
d'agir pour diminuer
ces émissions
(10Mt de CO2),
Mais ce ne sont pas
Les plus importantes
émissions de la France :
Les transports (pétrole)
et le chauffage (gaz
naturel) sont beaucoup
plus importants

CO2 par habitant : pétrole et gaz !

La France émet ~340Mt CO2.

Le gaz, c'est ~450TWh, qui émettent
~100Mt de CO2 (principalement
chauffage).

Comment éviter le CO₂ pour produire de l'hydrogène ?

3 méthodes :

- Gaz naturel+CCS (récupération et stockage CO₂)
- Pyrolyse gaz naturel: $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$
- Electrolyse : 55KWh d'électricité pour un Kg de H₂

Estimer émissions pour un kilo de H₂ :

Méthode	SMR	SMR+CCS	Elec. FR (55KWh)	Elec. DE (55KWh)
Estim. CO ₂ Physicien	10Kg (« gris »)	2Kg (« bleu »)	3kg	20Kg

Dans un premier temps..

- D'abord décarboner l'hydrogène : en 2028, produire 0.4Mt de H₂ par électrolyse. Cela nécessite autour de 22TWh d'électricité, 5 % de la production électrique (on va bien se décider à l'augmenter?).

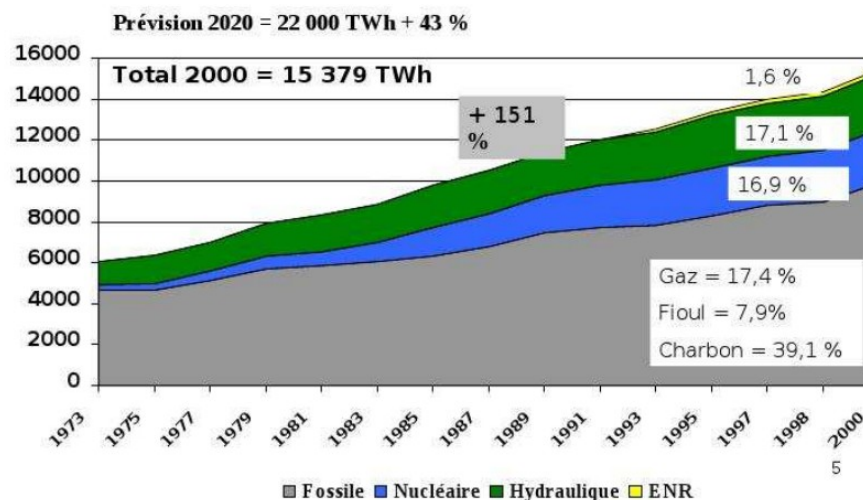
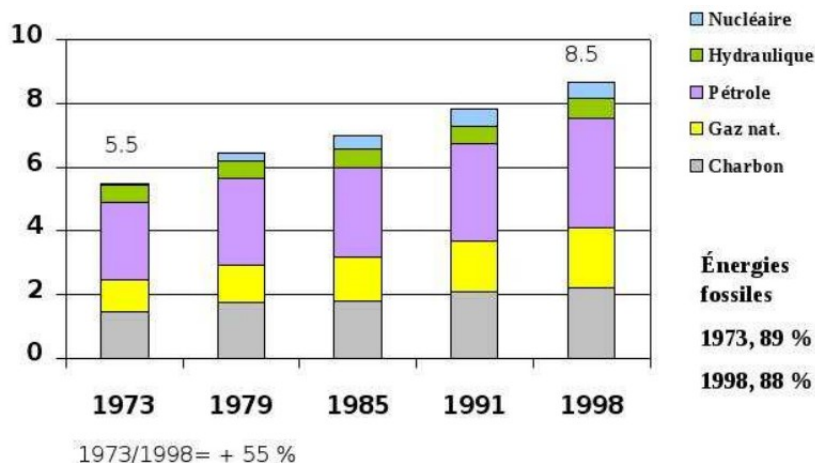
A quel prix ? Si gaz à 20€/MWh, élec. à 70€/MWh et charbon à 60€/t :

	SMR	SMR CCS	Pyrolyse	Elec. FR	Elec. All	charbon
Prix €/Kg	1.5	2.	2.8	5	5	1.5
Prix avec 500€/tCO ₂	6.5	3.	2.8	6.5	17	23.

- Mettre en place des électrolyseurs de grande puissance : 6.5GW en 2030. Actuellement électrolyseurs coûtent 1000€/KW. Quid des électrolyseurs HT ? Où trouver la production de 50TWh supplémentaires ? Comment se confronter économiquement aux américains qui garderont le gaz naturel ? Restera-t-il en Europe une industrie chimique avec de tels coûts ?
- Pour cela, 1.7G€ sont prévus (sur les 7-8G€ annoncés).

Importance de l'électricité

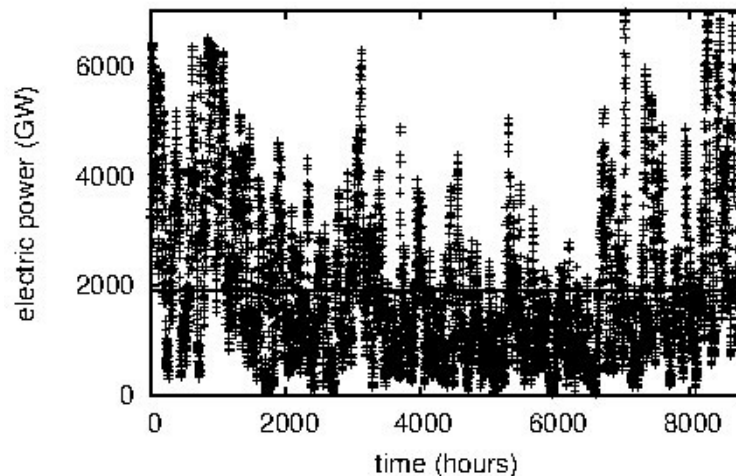
L'électricité devient le vecteur dominant du développement économique. Dans le passé, sa croissance a été bien plus rapide que celle de l'énergie primaire :



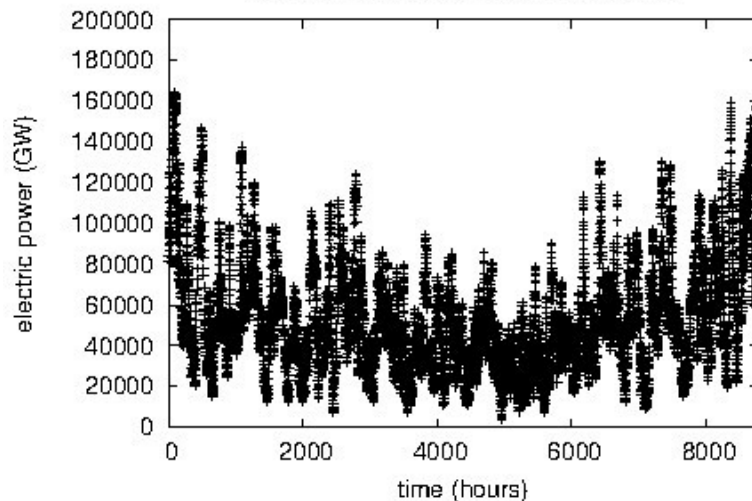
La production d'électricité dans le monde se fait surtout avec des sources fossiles, Il y a 10 % de nucléaire et 26 % de renouvelables (16 % hydraulique, 5 % éolien, 2 % PV). La production d'électricité est responsable de 41 % des émissions de CO₂. Les ENR sont mises en avant, mais éolien et PV sont très intermittents et saisonniers.

Une solution pour l'intermittence des renouvelables ?

wind electric production France 2014

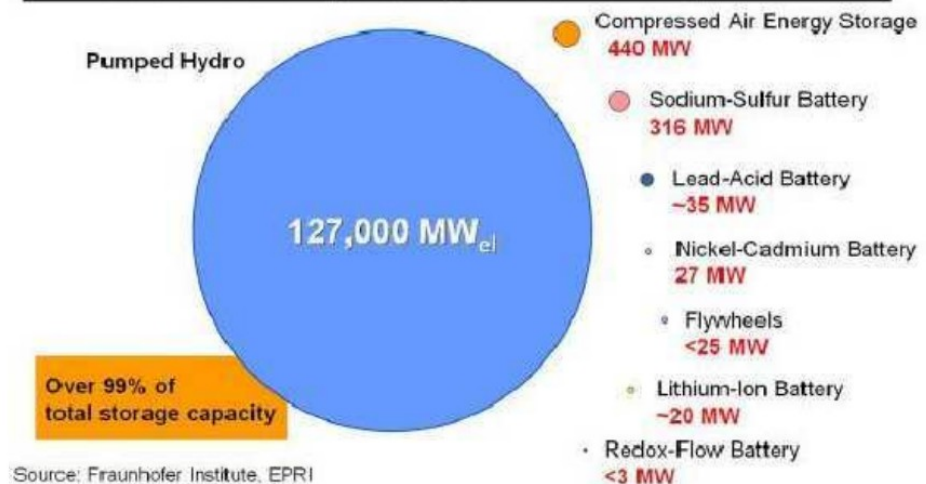


Simulation of 25% wind production 2012



La figure du haut montre les aléas de la production éolienne française, et celle du dessous est obtenue en combinant les productions de la plupart des pays européens en supposant que 1/4 de leur production est éolienne (France+UK+Belgique+Espagne+Allemagne+Danemark). On voit que le « foisonnement » est très limité : tous produisent un peu en même temps.

Worldwide installed storage capacity for electrical energy



Et les possibilités de stockage sont limitées

Le stockage par STEP

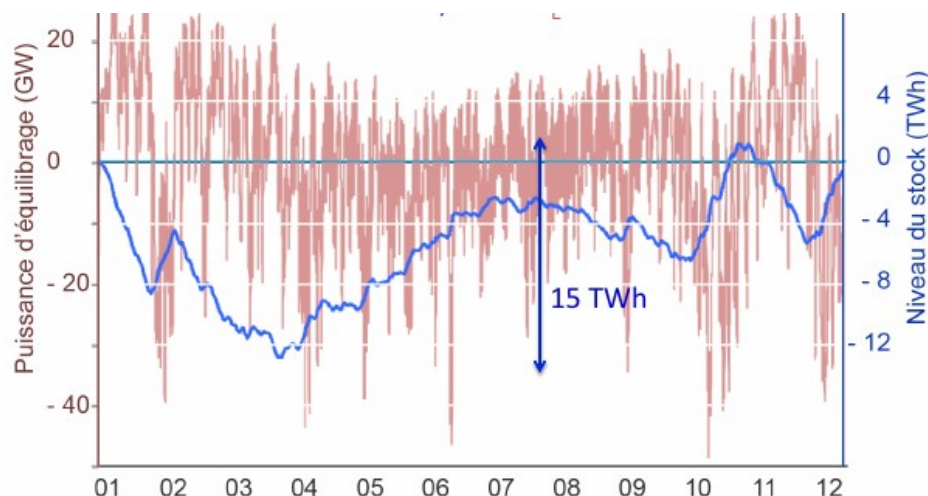
La France a de très beaux sites. AUCUN PROJET en route !



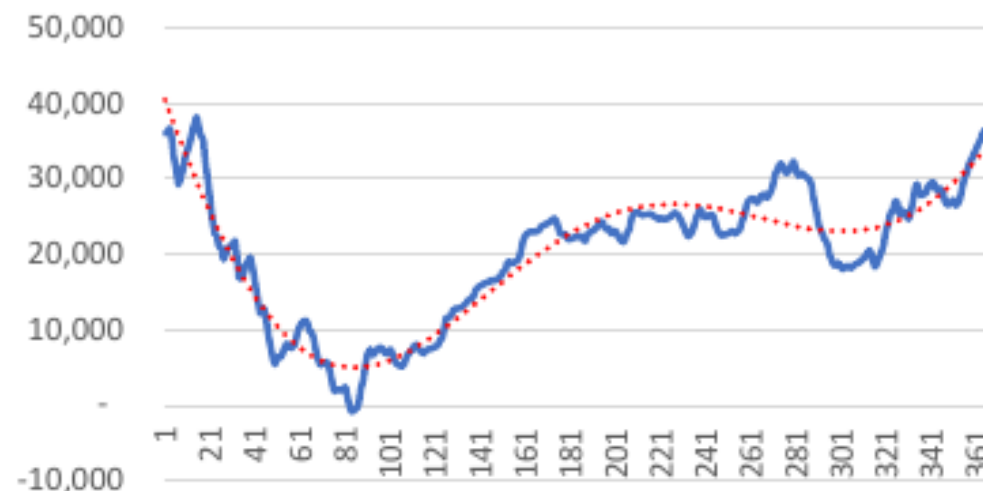
Autour de 4.5GW, stockage ~0.1TWh

Quelle quantité d'électricité stocker ?

Les estimations sont données pour 50 % et 100 % renouvelables :



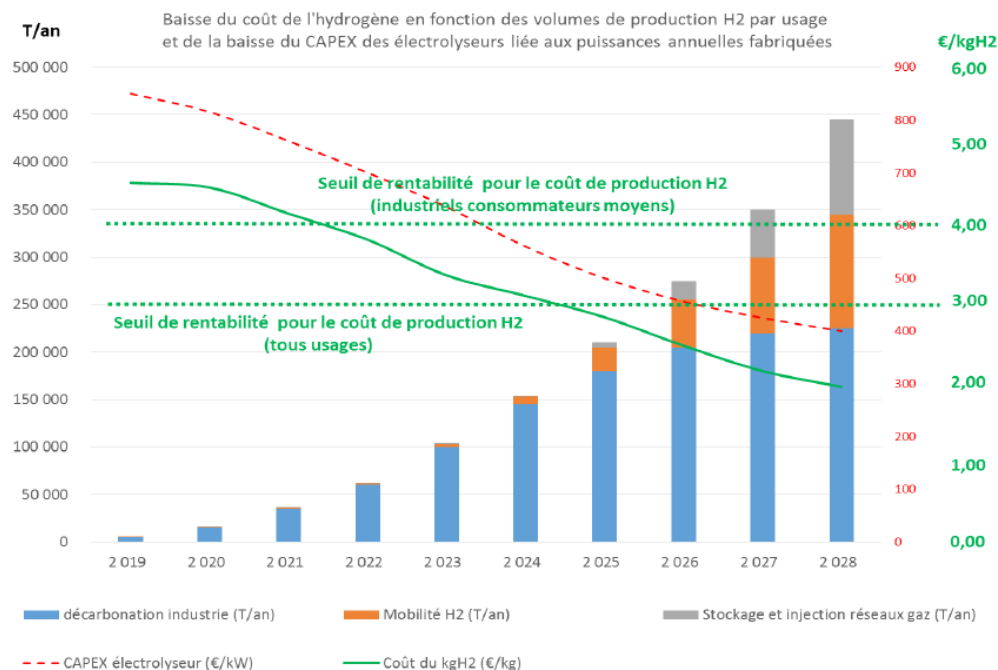
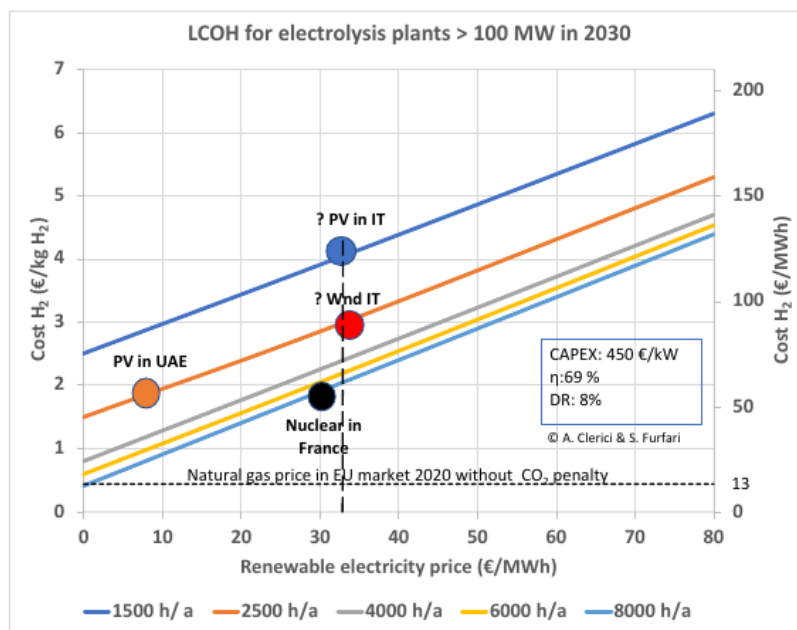
Ici, on suppose 50 % renouvelables et fermeture de centrales. Il faut restituer 15TWh, cad y consacrer 40TWhe



Ici, on suppose 100 % renouvelables, fermeture de toutes les centrales : pour 40TWh, il faut ~100TWhe au départ

Quel rendement ? Quel prix ?

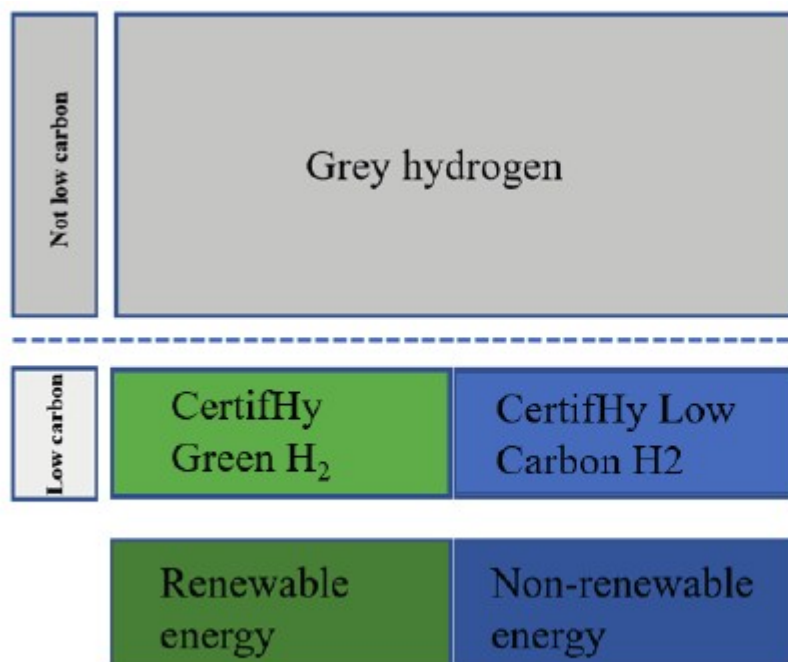
- Le cycle électricité-hydrogène-électricité a un faible rendement !
- électricité- → Hydrogène par électrolyse : 60-70 % PCI
- Stockage-compression-auxiliaires : 90 %
- Liquéfaction : 80 %
- Régénérer l'électricité : 40-60 % en PAC, 63 % en CCG



Les classifications européennes

L'hydrogène est conçu par l'Europe (Hulot..) comme moyen de compenser l'intermittence des renouvelables.

Cela veut dire qu'on entend exclure le nucléaire à travers la définition « hydrogène vert » :



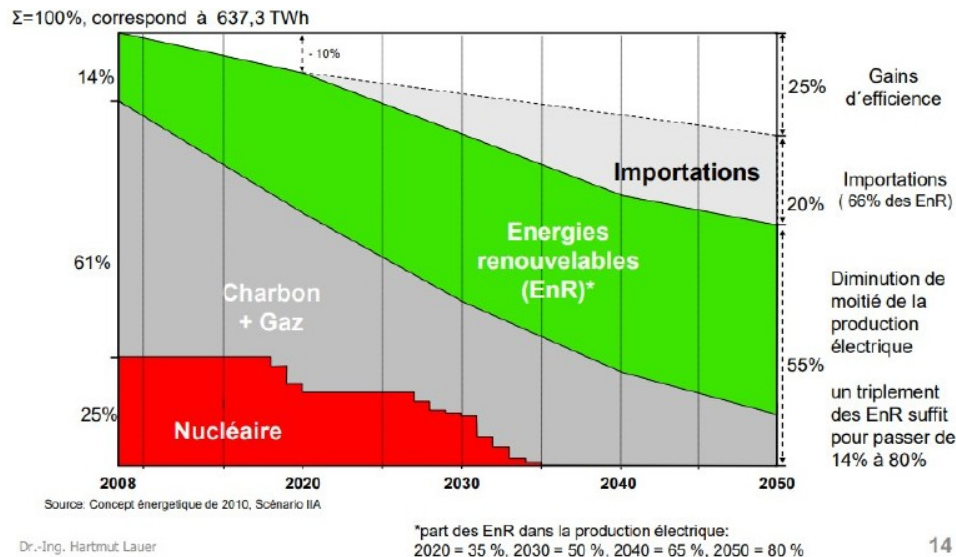
Low-carbon
threshold =
5Kg CO₂/Kg H₂

Ici, l'hydrogène « gris » est tout ce qui émet plus de 5Kg CO₂/Kg H₂. Donc le gaz, le charbon. Mais avec le nucléaire, il est « bleu », donc « impur ». On le considère comme « transitoire », car à terme, les renouvelables sont appelés à le remplacer.

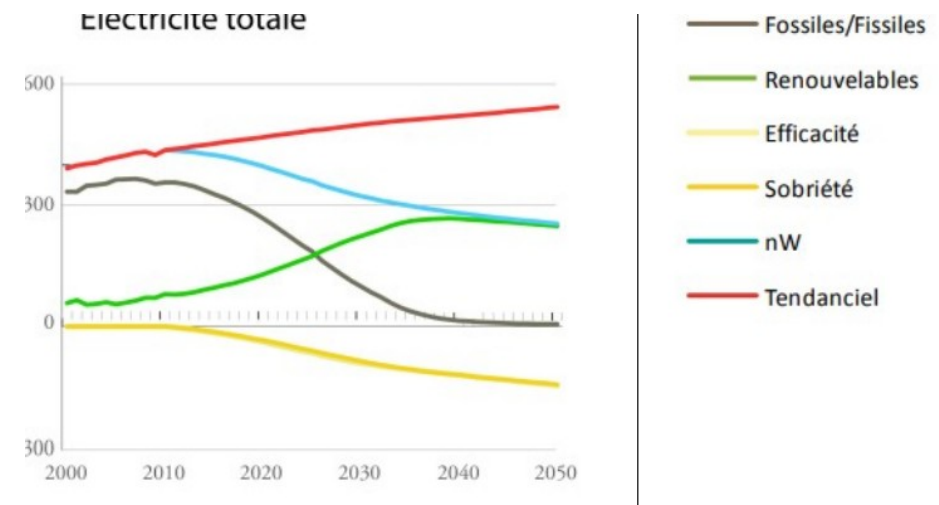
La limite 5kg semble ouvrir à un mix Gaz-renouvelables ?

Les ravages de l'écologisme anti-électricité

Depuis une vingtaine d'années les politiques énergétiques (FR, ALL) sont concoctées par des idéologues qui annoncent la décroissance de la consommation électrique



14



En Allemagne, « energiewende »

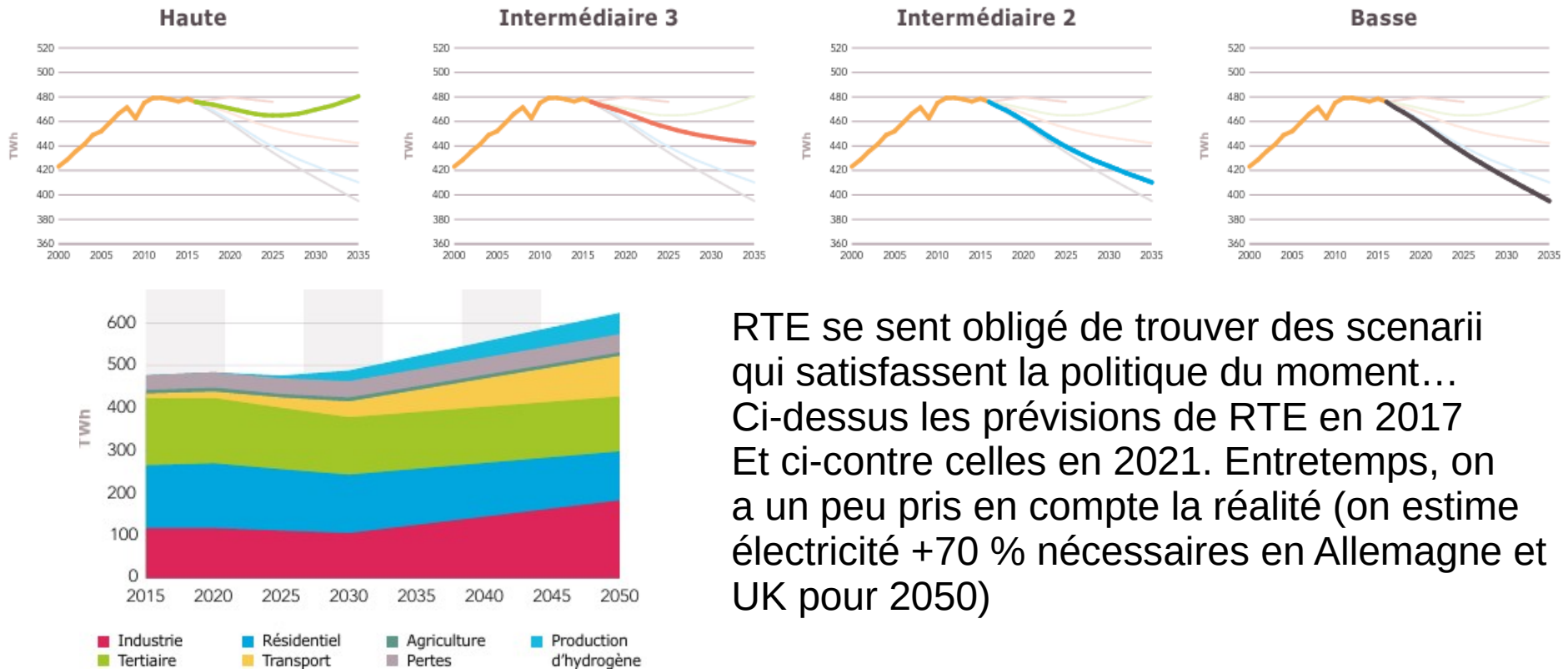
En France « negawatt »

Tout cela a abouti à la fermeture de nombreux moyens de production « pilotables »

Les surprises de la PPE et des prévisions RTE

- D'après les études de « Carbone 4 », les besoins en électricité « le scénario « PPE 2016 » modélisé par Carbone 4, « la consommation d'électricité est de 375 TWh en 2030 (hors moyens de production fossiles), et de 420 TWh (avec). Où alors trouver de quoi alimenter voitures électriques, électrolyseurs ? l'État a suivi ici fidèlement les antinucléaires de « néonawatt »

consommation



RTE se sent obligé de trouver des scénarii qui satisfassent la politique du moment...
Ci-dessus les prévisions de RTE en 2017
Et ci-contre celles en 2021. Entretemps, on a un peu pris en compte la réalité (on estime électricité +70 % nécessaires en Allemagne et UK pour 2050)

https://www.carbone4.com/wp-content/uploads/2018/03/201803_Carbone-4_Analyse-PPE_Messages-cles.pdf

https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-06/bp2017_synthese_17.pdf

<https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-05/Bilan%20previsionnel%202021%20-%20annexes%20techniques.pdf>

Pour l'avenir, l'hydrogène serait aussi important que l'électricité

- Il aurait un rôle essentiel pour stocker l'électricité. Mais rendement d'électrolyse ~70 % (grandes installations) et intermittence de fonctionnement. En plus, le rendement $H_2 \rightarrow \text{électricité}$ est autour de 50-60 %. La plupart des auteurs donnent un rendement global Elec- H_2 -Elec de 30 % (électrolyse HT???)
- Il est difficile à transporter (actuellement on utilise le H_2 comprimé ou liquide pour alimenter les stations service). Il paraît peu raisonnable de l'injecter dans les gazoducs.

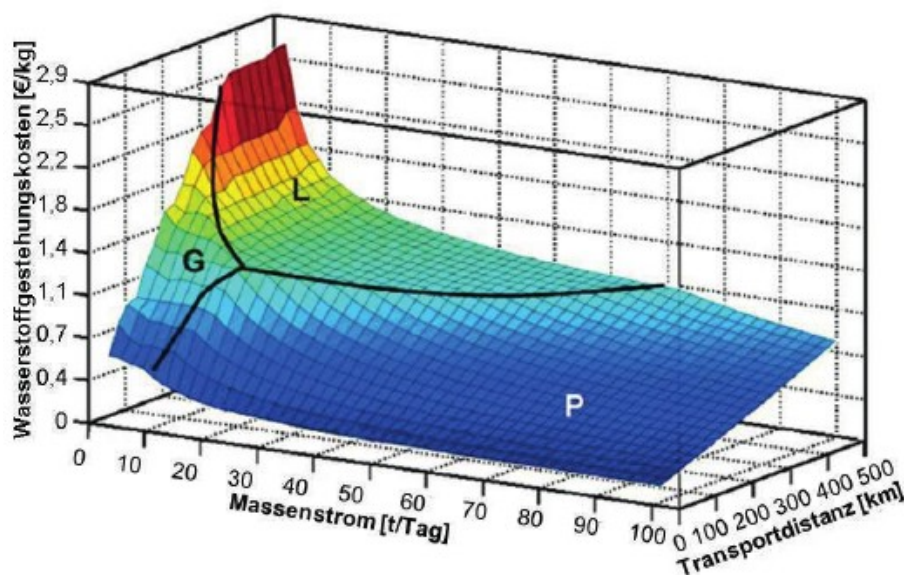


*Un très beau projet japonais qui
Importerait de l'hydrogène liquéfié
Obtenu à partir de charbon
Australien. Très fortes émissions
De CO_2 , qu'il sera bien difficile de
Stocker (CCS ?)..*

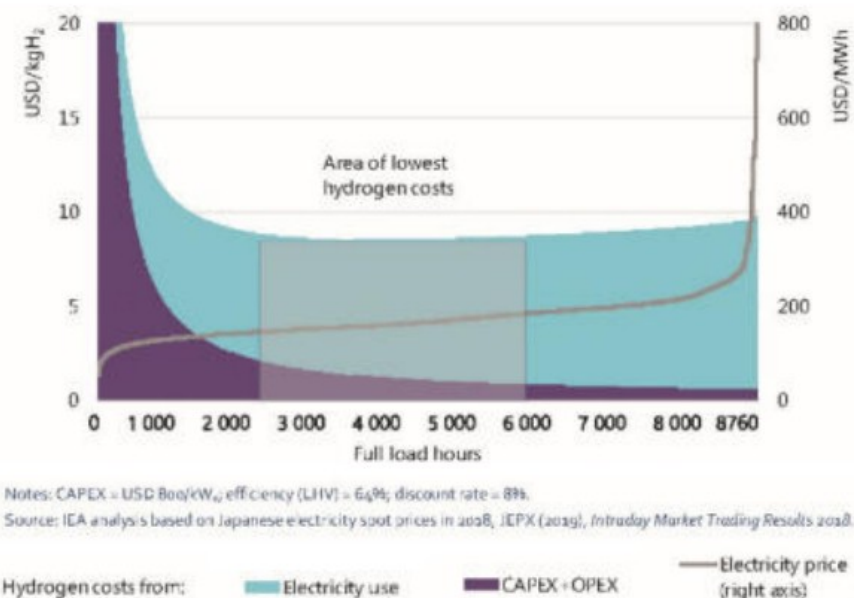
- Une électrolyse locale s'avère coûteuse et de rendement limité (small is beautiful, but inefficient). Mais on y pense avec des production d'électricité locale (PV, éolien).

Problèmes Prix et Transports

- Le H2 occupe volume ~4 fois le gaz naturel
- On ne fera pas de gazoducs hydrogène
- Le prix dépendra du prix de l'électricité



Une réflexion (Allemagne) sur les coûts de transport



Une réflexion (US) sur les coûts suivant Le cours de l'électricité avec le facteur de charge

La méthanation ?

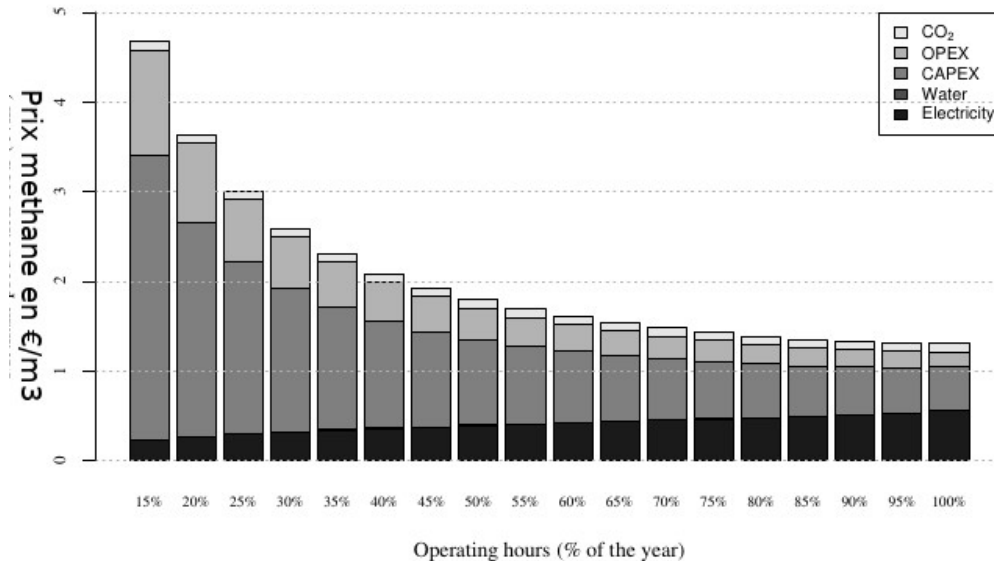
- c'est la réaction inverse du SMR, dite de Sabatier :



- Le méthane est bien maîtrisé : stockage, transport, utilisation. Mais là encore, 70 % de rendement. On perd plus de la moitié de l'énergie électrique, et si on veut encore refaire de l'électricité, le rendement global est ~ 25 %.

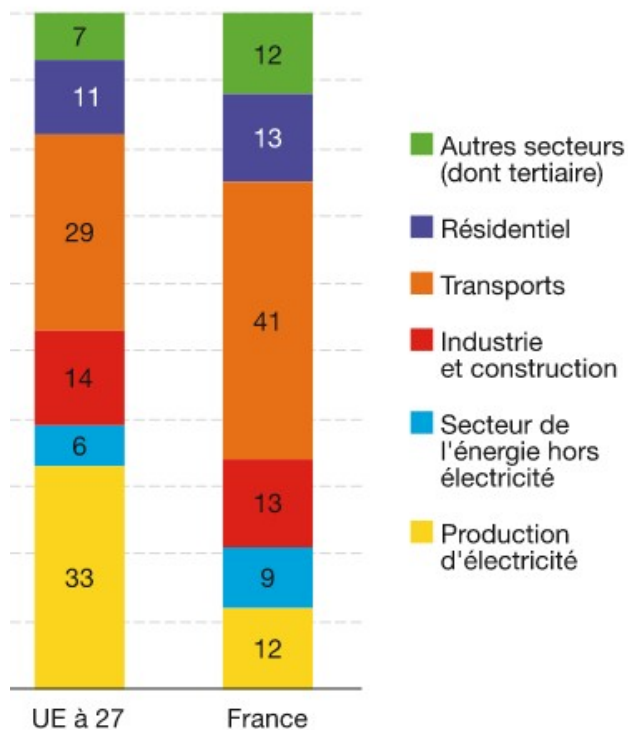
On peut espérer n'utiliser les installations que lorsque les prix sont bas (quand il y a du vent et du soleil). Cela a été étudié pour la méthanation. Si on utilise moins les installations, le prix d'amortissement augmente et cela compense les baisses de prix de l'électricité.

Ici, 1€/m³, c'est 100€/MWh et 3€/Kg gaz naturel : 20-40€/MWh.

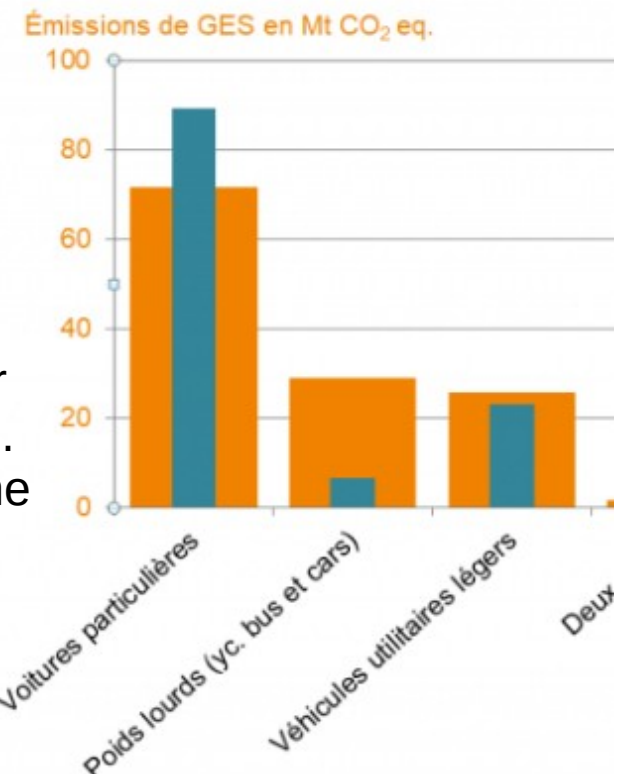


Voir : *Report on the costs involved with PtG technologies and their potentials across the EU*

Les émissions françaises : transports

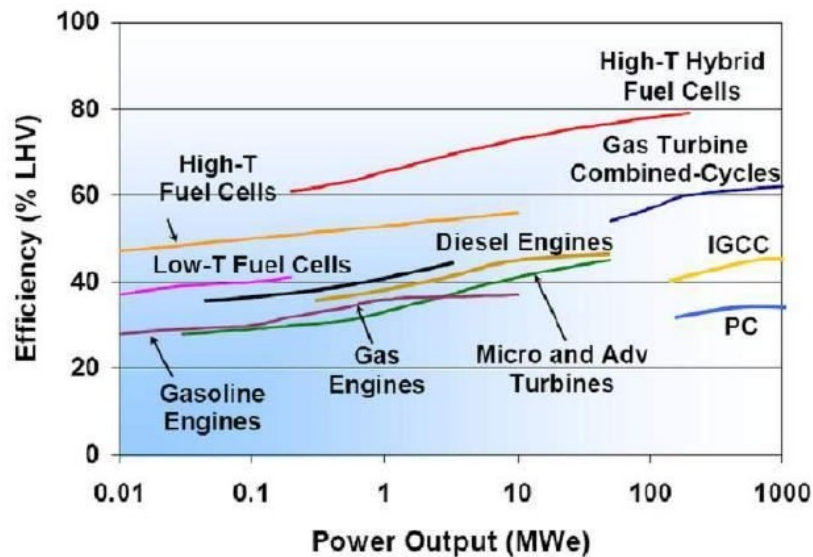


La France émet 340Mt CO₂
Les transports sont 41 % et
les VP sont la moitié. Avec
le chauffage (gaz), ce sont les
créneaux qui devraient être
prioritaires. Il faudrait s'appuyer
sur notre électricité décarbonée.
Mais l'hydrogène est-il une bonne
solution ?

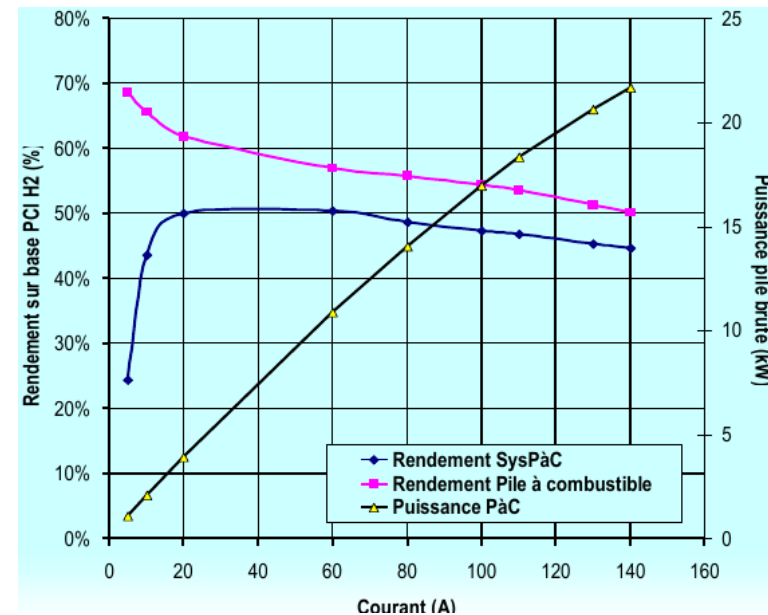


A quoi utiliser tout cet hydrogène ? LES TRANSPORTS !

Actuellement, gros effort pour la voiture à hydrogène avec PAC



After H. Nabelek FZJuelich 2001



Dans l'ensemble des machines thermiques, les piles a combustible (PAC) Permettent des rendements de ~50 % (PEFMC). Pour un kg de H₂, on obtient autour de 18KWh d'énergie électrique. Cette technique, basée sur de l'hydrogène gazeux comprimé est considérée comme la plus prometteuse.

Un exemple, la Mirai de Toyota

Un travail remarquable
de Toyota



Une voiture hydrogène
PAC de 114KW (2KW/Kg)
2 Réservoirs de 5kg H₂ à 700bars
Pesant ~90Kg à vide.
Moteur électrique de 113KW.
Rendement (<20KW) de 60 %.
Consommation de ~0.8Kg H₂/100km.
Pèse 1850Kg et coûte 68,000€. 11,000 ont été vendues (mi-2021)

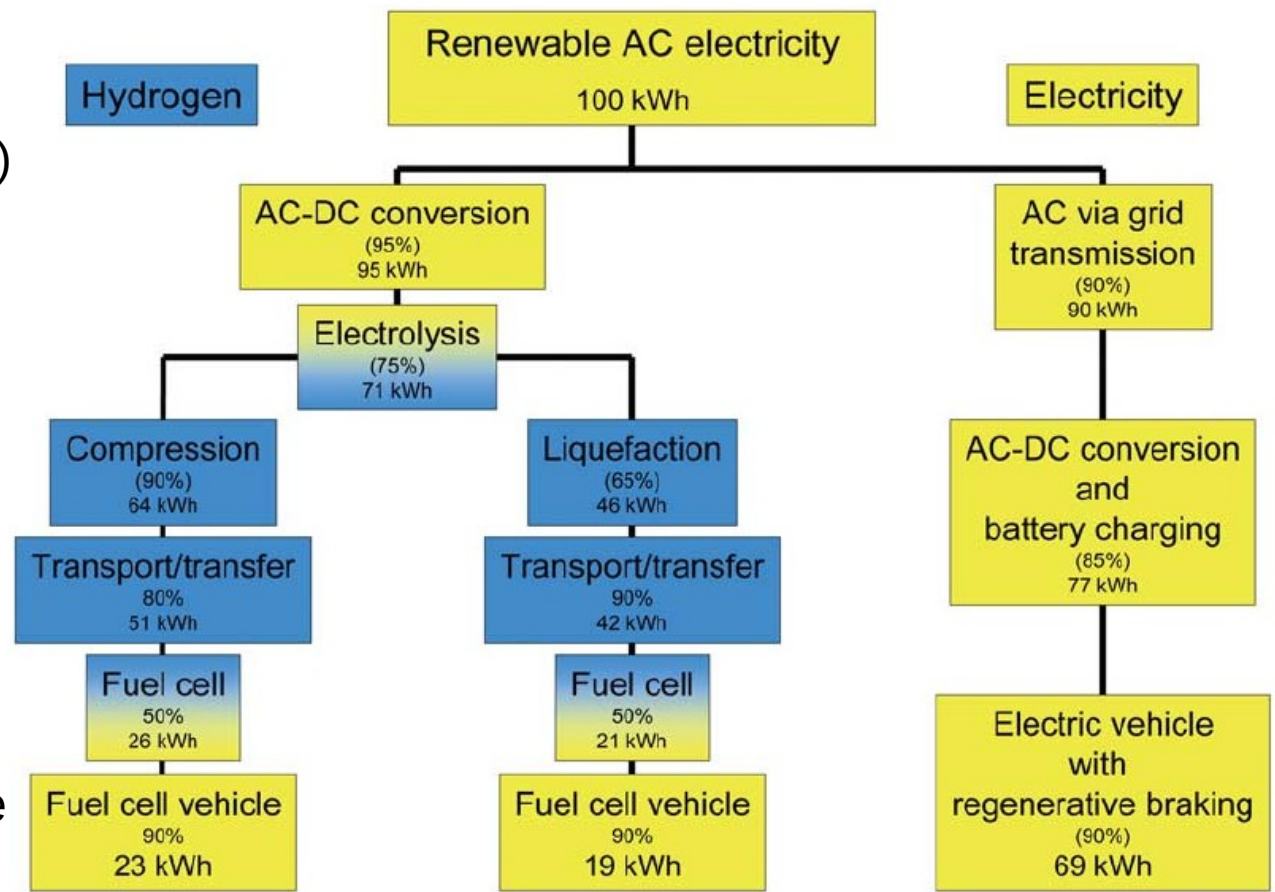
C'est un système extrêmement complexe, Toyota pour aider au développement de cette technologie a mis ses brevets en accès libre

Efficacité de l'hydrogène pour les transports

On se sert en général d'un schéma dû à Bossel :

Bossel, ingénieur suisse (EPFL) travaillait sur les renouvelables. Il a essayé de comparer les avantages de l'électricité avec l'hydrogène. On peut changer un peu ses valeurs, mais le résultat est toujours le même : l'efficacité du VEB est trois fois meilleure que celle du cycle hydrogène.

Le premier résultat est que le carburant hydrogène est cher. À peu près 12-15€/Kg dans une station en France.



Mise en place de stations hydrogène

Pour que les VHE circulent, il faut qu'ils puissent se recharger. Il est mis en place des stations hydrogène. Un plan de 20 stations hydrogène en Auvergne Rhône Alpes (AuRA) nécessite d'y consacrer les 2/3 d'un budget d'investissement de 70M€, dont 15M€ de la région, 14.4M€ de l'ADEME et 10.1M€ de l'Europe¹⁴. Aujourd'hui, la plupart des stations sont approvisionnées par camion et l'hydrogène est obtenu par SMR.

Une station qui coûte 2M€ fournit ~100KgH₂/jour, ce qui alimente 300 à 500 VHE.

Un problème est que souvent les stations françaises ne sont pas aux normes 700bars



Carte des stations en France : <https://www.h2-mobile.fr/stations-hydrogene/>

Quels avantages VHE ?

- La voiture hydrogène a une autonomie ~600Km
- La voiture hydrogène se charge en quelques minutes dans une station qui fournit un gaz comprimé vers 900bars pour remplir le réservoir à 700bars
- La voiture purement électrique a une autonomie de 300-400Km
- Il faut la recharger en électricité, et cela peut être assez long (batterie de 40-50KWh) : au domicile avec 16 Ampères, 12 heures.
- Pour les longs trajets, charges rapides de 20 à 80 %. Pour la Zoe, cela est limité à 50KW, mais il y a des bornes de 100 à 350KW (Tesla). Cela veut dire une recharge en 15-20minutes.
- L'installation massive de dispositifs de charge rapide sur les grands axes et sur les autoroutes est en cours. Dans quelques années, le problème de la recharge des batteries ne nécessitera que le temps de se prendre un café de temps en temps.

Des estimations comparant H2 et batteries

Les PAC sont chères : 300€/KW
Elles doivent être changées toutes
Les 7000 heures.
Elles offrent une meilleure autonomie
Elles se rechargent rapidement
Les stations de recharge sont chères
Il faut 55KWh pour un kilo de H2
Un kilo fournira moins de 20KWh
Il faut transporter H2,
Ou produire sur place

Les batteries coûtent ~200€/Kwh,
Elles « tiennent » 2000 recharges et
10 ans si on ne les brutalise pas.
Il faut de 10h à 15 minutes pour les
charger.
On estime qu'une borne de charge
rapide (100-350KW) coûte 1000€/KW
de puissance
Pour la même distance, elles sont
plus lourdes.

Pour le poids :

-Une Mirai embarque ~100Kg de réservoir, 60Kg de PAC, des batteries
et un moteur de 80Kg soit ~280Kg pour 600Km, coûte ~70K€ pèse
1850Kg.

-Une auto électrique (ZOE?) embarque 326Kg de batteries pour 300Km,
un moteur ~60Kg et coûte 32.5K€ (mais les Teslas sont plus grosses et
plus chères).

Le poids du système propulsif à batteries est 3 fois plus important pour
la même distance.

Comment évolue le parc auto ?

- En France, 211 VHE vendues en 2020. Les producteurs sont en Asie (Corée, Japon). VW a abandonné le créneau (« trop cher »), Daimler se concentre sur les poids lourds, BMW annonce un modèle en 2022 en partenariat avec Toyota. Le reste, ce sont des startups que chérit notre gouvernement en les subventionnant généreusement.
- Dans le même temps, l'industrie automobile connaît un chamboulement avec l'arrivée des VE qui ont besoin de batteries. VW y investit 30G€, malgré les incitations du gouvernement allemand à développer le H2.
- En 2020, en France, un total de 110 913 véhicules électriques (contre 42 764 en 2019) et 243 666 véhicules hybrides (125 436 en 2019), dont 74 590 hybrides rechargeables (18 592), ont été commercialisés.
- Dans le même temps, il n'y a pas de ces « gigafactory » de batteries en Europe, 30 projets, en général avec les Chinois qui semblent bien en avance.
- Une exception : la collaboration Total-SAFT, Stellantis, et Daimler (48GWh en 2030)

Quels besoins pour électrifier le parc automobile ?

- Il y a en France ~33 millions autos (VP), elles parcourent 14,000km/an, ce qui fait 46Gkm. Avec 7l/100km, on consomme 32Gl/an (un litre émet ~3KgCO₂, 97MtCO₂). Pour parcourir 100Km, il faut ~15KWh, et 20KWh au niveau d'une centrale électrique. Cela représente 92TWh d'électricité (production ~500TWh). Mais si on triple pour l'hydrogène, c'est 270TWh, rien que pour les VP !
- On peut reprendre ce raisonnement pour les utilitaires légers (6.2 millions) et pour les poids lourds (0.62 millions): le total de leur consommation sera du même ordre.
- Cela veut dire que l'électrification des transports routiers (avec batteries) nécessite plus de 150TWh et trois fois plus avec hydrogène.
- Evidemment, au-delà de ces très lourds besoins, il y a le problème du prix : quel sera le prix de cette électricité ? En aura-t-on assez?

Quid des émissions de CO2 des véhicules hydrogène ?

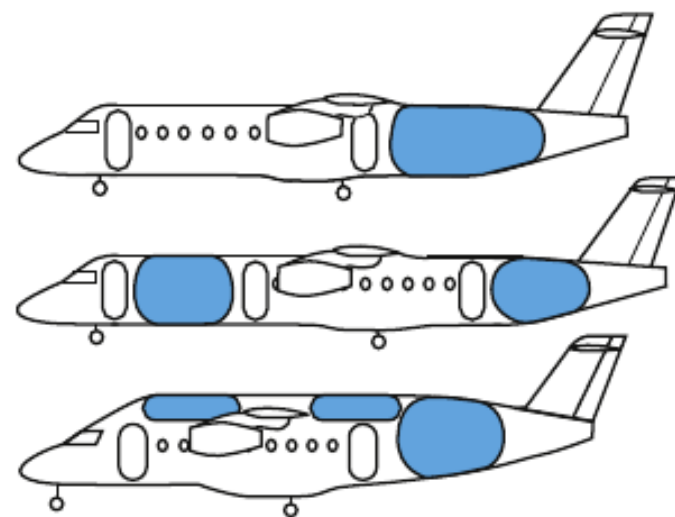
On peut donner des estimations avec les méthodes de production actuelles.

	Emissions CO2 électricité	VHE avec SMR	VHE avec SMR et CCS	VH2 avec électrolyse	VE avec batteries	Voiture essence
unités	Kg/MWh	Kg CO2 /100Km	Kg CO2 /100Km	Kg CO2 /100Km	Kg CO2 /100Km	Kg CO2 /100Km
France	55	9	3	3	1	17
Allemagne	450	9	3	25	9	17

On voit que l'électricité doit être très décarbonée pour que la voiture à hydrogène Soit bien placée. Mais la VE atteint d'excellentes performances.

Les transports « lourds »

- On observe une réorientation de H2 vers les poids lourds, les bus, les trains, les navires et les avions. Cela représente le quart des émissions des transports, et l'utilisation de l'hydrogène par électrolyse pèserait très lourd sur la production électrique (de l'ordre de 80TWh). Pourquoi les batteries qui marchent bien avec les voitures ne serviraient-elles pas pour tous les transports routiers ?
- Bien entendu cela semble difficile pour les avions. Il y a donc un programme Airbus, financé par 2G€ de développer des avions à hydrogène. Pour cela H2 liquide (20K) semble inévitable. Il faut des réservoirs de très gros volume et on a calculé qu'alimenter Roissy nécessite 5 centrales nucléaires.



Exemples de disposition
Des réservoirs dans un avion
De transport régional

Quels choix faire pour diminuer les émissions de CO2 ?

- Une agglomération veut remplacer ses bus diesel pour diminuer ses émissions de CO2. On peut estimer les coûts de l'opération et donner un ordre de grandeur du coût de la tonne de CO2 évitée, avec pas mal d'approximations. C'est une indication précieuse pour les choix que doit opérer une communauté de communes.

	Bus Diesel	Bus H2	Bus Batteries
Coûts infra-structures	0(?)	20M€	5M€
Coûts électricité	0€	41M€	15M€
Coûts gazole	86M€	0€	0€
Coût 1 Bus	0.25M€	0.6M€	0.35M€
Entretien (20 ans)	?	0.35M€ (PACs)	0.086M€ (batteries)
Coûts de 180 bus	45M€	171M€	65M€
Coûts totaux	131M€	232M€	85M€
Emissions	210Kt CO2	10Kt CO2	10Kt CO2
Surcoûts	0€	101M€	-46M€
Coût CO2 ?		500€/t	-230€/t

Résumer

- La France produit 900,000t de H₂
- Elle émet là 10Mt CO₂, 3 % de nos émissions de CO₂
- L'électrolyse est proposée. Il faut ~50TWhe, 10 % de la production
- Si on utilise H₂ pour stocker l'énergie (100% ENR), il faut 100TWhe
- Si on veut faire marcher le parc auto avec H₂, c'est 270TWhe
- Pour les poids lourds, c'est 80TWhe
- Pour les avions (hydrogène liquide), il faut 5 réacteurs nucl. pour Roissy
- Et on voulait diminuer la production électrique en 2016 (LTE, SNBC..) !
- En fait, l'énergie est entre les mains d'idéologues, soumise au Ministère de l'écologie....