

10/12/2020

Hydrogène : marchés et modèles économiques



Bertrand Chauvet : bertrand.chauvet@seiya-consulting.com

Jean-Paul Reich: jean-paul.reich@seiya-consulting.com



Bloomberg Opinion

Hydrogen Is a Trillion Dollar Bet on the Future

By David Fickling
2 décembre 2020



Et soudain, l'hydrogène s'est invité à l'agenda de la transition énergétique...

2018, Plan
« Hulot » :
100 M€ sur
3 ans...



Europe EC 08/07/2020	40 Md€, 40 GW d'électrolyse, 10 Mt H2 en 2040 14% du mix énergétique européen en 2050
Allemagne	9 Md€, 5 GW d'électrolyse 2030 pour une demande attendue de 110 TWh, 2 Md€ partenariat production H2 import Veut être un leader mondial des technologies H2
France	7,2 Md€ sur 10 ans dont 3,2 Md€ sur 3 ans 6,5 GW d'électrolyse 2030 Décarbonation de l'industrie, H2 pour les transports lourds, et émergence d'une filière industrielle nationale
Portugal	6,5 Md€, focus sur la production d'H2 vert via PV et éolien
Espagne	8,2 Md€ (fonds publics 4 Md€), production H2 vert, filière industrielle
Pays-Bas	9 Md€, production éolien offshore + électrolyse, développement de toute la chaine de valeur. Sécurisation de 66000 emplois existants dans la mobilité et les infrastructures gaz, création de 25000 (2030) à 45000 (2040) emplois (maintenance, opérations...)
Grande-Bretagne	£12 bn, 5 GW électrolyse pour alimenter 1,5 M de maisons (en remplacement du gaz nat), l'industrie et les transports, 75000 emplois en 2035



Les ambitions de la filière française

Créations d'emplois dans la filière hydrogène



Développement de la production d'hydrogène pour l'industrie et les nouveaux usages



* hydrogène issu de sources fossiles

2030

Emplois x 50

H2 Vert x 15

Stations x 25

Stations de recharge H₂



Agenda

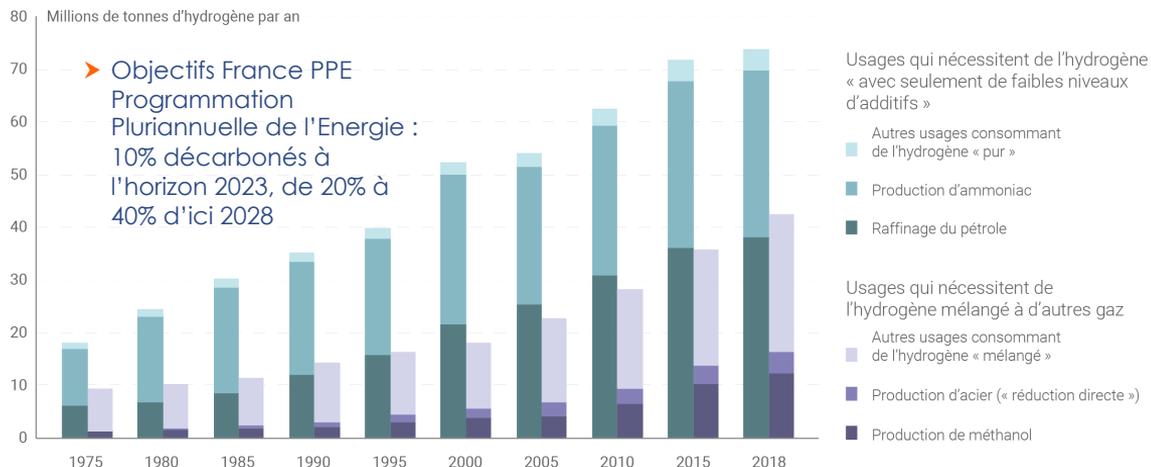
- **Marchés historiques et structuration de la chaîne de valeur**



Un marché de croissance régulière pour la molécule à usage industriel...

- Depuis 1975, la **production mondiale d'hydrogène a été multipliée par 4** -> 70 Mt H₂ pur en 2018
- Principalement raffinage du pétrole et la production d'ammoniac
- Source H₂ monde : gaz naturel 69%, charbon 27%, électrolyse et autres procédés pour le solde
- Coût de capture et stockage de CO₂ = 1€/kg. Avec un prix du carbone de 100€/t, on pourrait tout basculer vers de l'H₂ « bleu »
- Electrolyse sur mix énergie gaz naturel ou charbon, on rejette plus de CO₂ qu'avec du SMR H₂ gris
- L'électrolyse sur ENR devient par contre un intégrateur des ENR dans le système énergétique, produisant un H₂ vert

Hydrogène Consommation mondiale depuis 1975



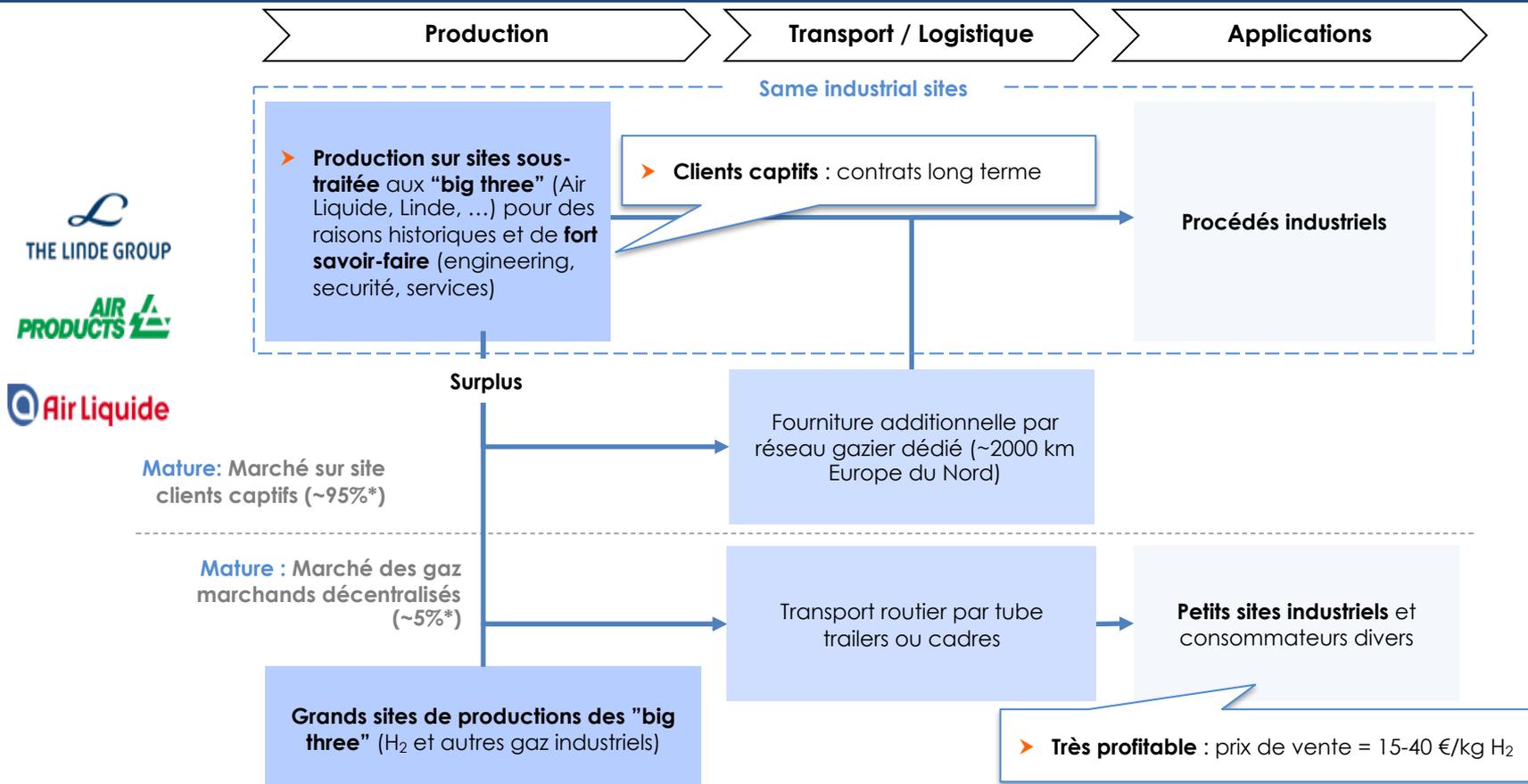
Source : *The Future of Hydrogen*, Agence internationale de l'énergie.

...Et un marché de l'hydrogène énergie en création :

Convertir 1% du parc automobile mondial reviendrait à multiplier par 10 la demande existante pour l'hydrogène

En 2050, les FCEV pourraient représenter 16% du parc mondial...

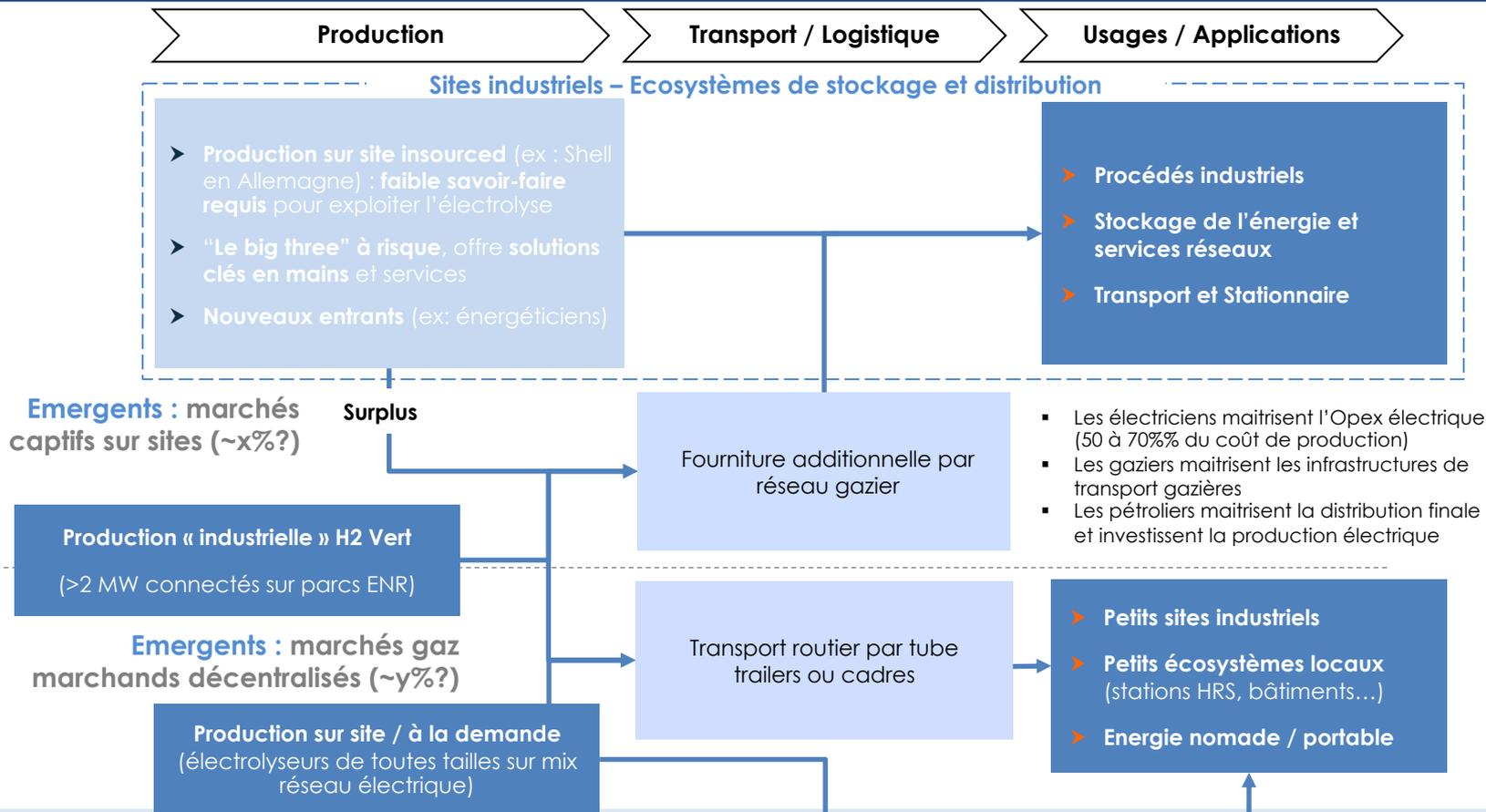
« Le big three » domine la chaîne de valeur : production, transport et marchés de niche hautement profitables



La demande pour un hydrogène renouvelable/décarboné et l'émergence du marché hydrogène énergie redessinent la structuration du marché et fait émerger de nouveaux acteurs



(Etc...)

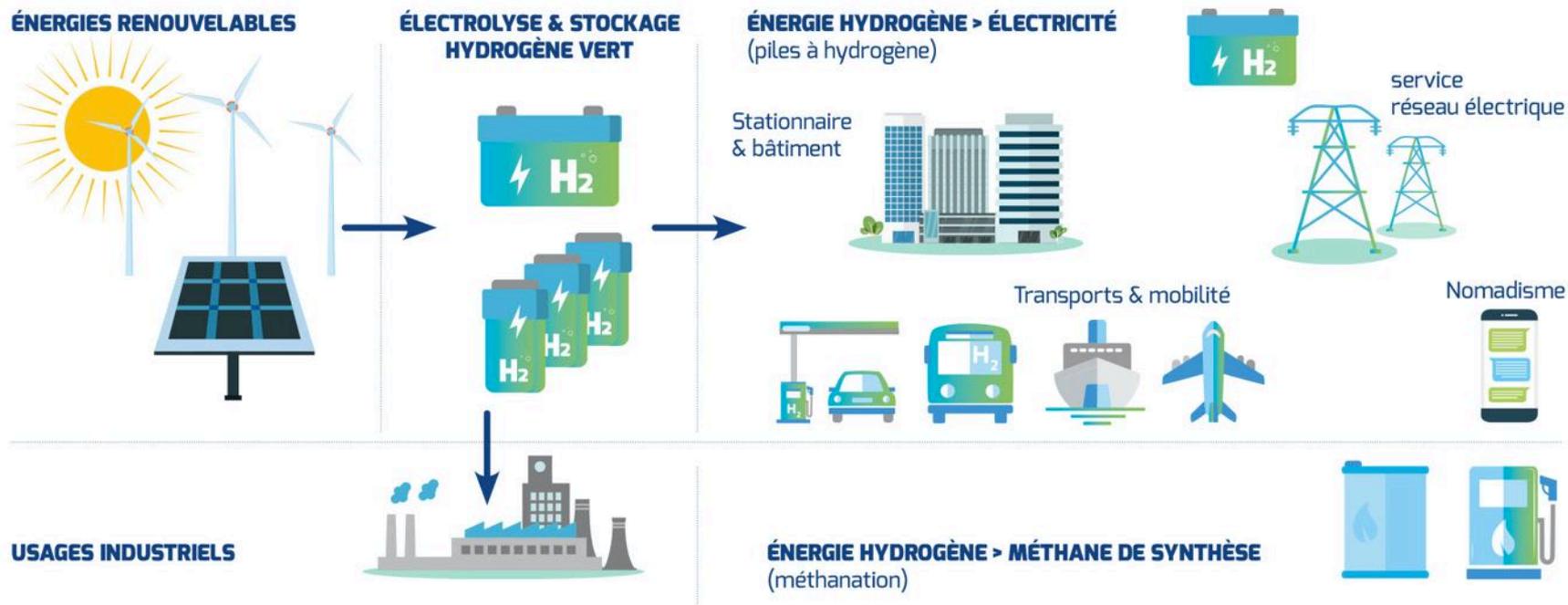


Agenda

- Marchés historiques et structuration de la chaine de valeur
- **Marchés émergents et hydrogène « vert »**



L'hydrogène « vert » et ses marchés cibles



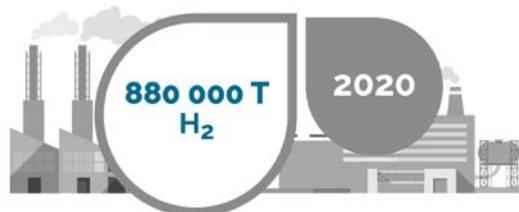
Un Code de l'Énergie modifié par une ordonnance et des décrets

- Ajout du Livre VIII « LES DISPOSITIONS RELATIVES À L'HYDROGÈNE »
- Décret en Conseil d'État définissant l'hydrogène renouvelable, bas-carbone ou fossile en fonction du procédé et de l'énergie primaire utilisés pour sa production, ou en fonction des émissions de gaz à effet de serre associées à ce procédé
 - L'H2 « nucléaire » est considéré comme bas-carbone
 - L'hydrogène fatal n'est ni renouvelable ni bas carbone
 - Les ressources biomasses, et notamment biogaz ne peuvent être utilisées pour produire de l'hydrogène « renouvelable ou bas carbone » en cas de concurrence d'usage (Article R 811-1) (*)
- L'ordonnance précise dans son Titre IV que des garanties de traçabilité (GT) et des garanties d'origine (GO) sont créées pour l'H2 renouvelable et bas-carbone. Le Décret en précise les conditions.
 - La connexion directe avec ENR permet de générer des GT renouvelable. Le mélange produit par renouvelable et bas-carbone permet de générer des GO.
 - La production entièrement basée sur bas-carbone génère des GT bas-carbone.
 - Des GO électricité renouvelable en cours de validité peuvent être convertis en GT renouvelable sous réserve de traçabilité physique, est en GO renouvelable dans les autres cas, à conditions qu'elles couvrent l'intégralité de la production.
 - Cela veut donc dire qu'acheter sur le marché de gros de l'électricité nucléaire et d'y ajouter systématiquement des GO électricité verte sans traçabilité physique conduit à générer des GO renouvelables.

(*) Précision du cabinet du DGEC le 9/11/2020 : « dans le cadre de projet valorisant du biogaz sous réserve de la réalisation d'un bilan carbone en analyse de cycle de vie **démontrant la réduction des émissions de gaz à effet de serre et l'absence de possibilité de valorisation directe du biogaz**, certains projets pourraient être considérés comme renouvelable ».

Industrie

Un vecteur de décarbonation



Mobilité

En circulation en 2020



Véhicules légers



Bus en service



Vélos



Chariots élévateurs



Bateaux

Objectifs de la filière en 2030,
342 000 T d'H₂ décarboné pour :



Véhicules légers¹



Véhicules lourds²



Trains



Bateaux

1 - production cumulée sur la décennie

2 - parc de bus, bennes à ordures ménagère poids-lourds et semi-remorques frigorifiques

Objectifs à 2028 de la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie

- 20 000 à 50 000 véhicules utilitaires légers
- 800 à 2000 véhicules lourds

2030 - OBJECTIFS de la Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France

6,5 GW* d'électrolyse déployés

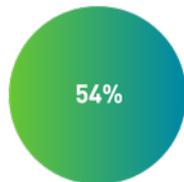
* 5 MW d'électrolyse déployés en 2020

6 000 000 T CO₂* évitées par an

* soit les émissions de la Ville de Paris sur une année

2020 2023 Répartition des 3,4 Md€ alloués

Priorité 1
Décarbonation de l'industrie



Priorité 2
Développer la mobilité professionnelle H₂



Priorité 3
Soutien à la recherche, à l'innovation et au développement de compétences



2030 LES MOYENS DÉPLOYÉS

POUR ATTEINDRE LES OBJECTIFS DE LA FILIÈRE H₂

Besoins d'investissements | identifiés par la filière H₂



Soutien public | Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France



L'hydrogène énergie dans la mobilité routière : des usages ciblés

- VUL = 1/4 à 1/3 des immatriculations en Europe



- VUL, bus et camions pèsent 41% des émissions nationales de CO2



- Fort besoin de disponibilité opérationnelle et d'autonomie



- Engins spéciaux



- Décarbonation d'usages auxiliaires polluants (groupes froids routiers)

De nombreux projets de navires, des APUs à la propulsion, sans oublier le fluvial



► Ferry, transbordeurs, CTV, barges et pousseurs...



Réservoir Cryogénique H2 Liquide de MAN

.... Et bien entendu le train 😊 Quelques exemples.



- Alstom iLint
- Alstom Régiolis



- Sifang Tram (Chine)

- Vivarail Class 230 (UK)



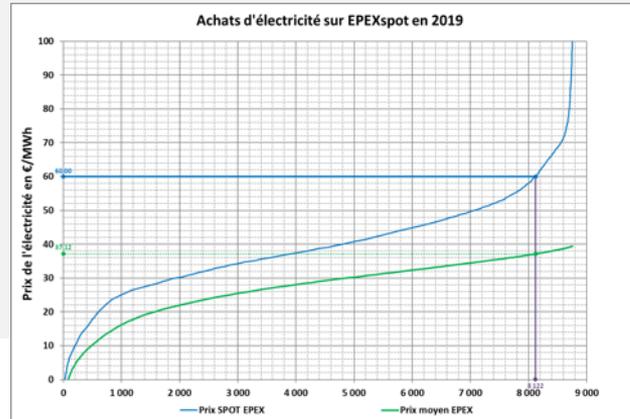
- Breeze (UK)

- Toyota FV-E991



Agenda

- Marchés historiques et structuration de la chaine de valeur
- Marchés émergents et hydrogène « vert »
- **Modèle économique de la production d'hydrogène renouvelable**



La logique économique du producteur industriel d'hydrogène par électrolyse

- La production d'H₂ par électrolyse est un gros consommateur d'électricité
 - Il faut environ 55 kWh d'électricité pour produire 1 kg d'H₂. Le contenu énergétique d'un kg d'H₂ est égal à 33,3 kWhPCI (39,5 kWhPCS)
- La production d'H₂ par électrolyse est un consommateur très flexible d'électricité
 - En fonction de sa technologie et son état (froid ou stand-up), un électrolyseur démarre et s'arrête en quelques dizaines de secondes à quelques minutes. Il offre également un gradient très élevé de variation de charge.
- L'approvisionnement en électricité (énergie + acheminement) représente environ 75% du cout de production de l'H₂ par électrolyse (à la sortie de l'usine)
 - L'acheminement (TURPE) représente entre 30 et 60% du cout complet de l'électricité
 - L'électrolyse est exonérée de CSPE, de TDCFE et de TCCFE
- L'hydrogène est stockable en grandes quantités sur de longues périodes, mais sa compression, son stockage et son transport peuvent coûter cher
- Un électrolyseur peut fournir des services au réseau et à un « responsable d'équilibre » en faisant varier rapidement sa charge à la hausse ou à la baisse

Les 4 leviers principaux du producteur d'hydrogène par électrolyse

- Des économies d'échelle : plus les électrolyseurs sont gros, moins ils coûtent cher à l'investissement. Passer de 1 MW à 20 MW permet de diviser par 2 le coût au kW installé

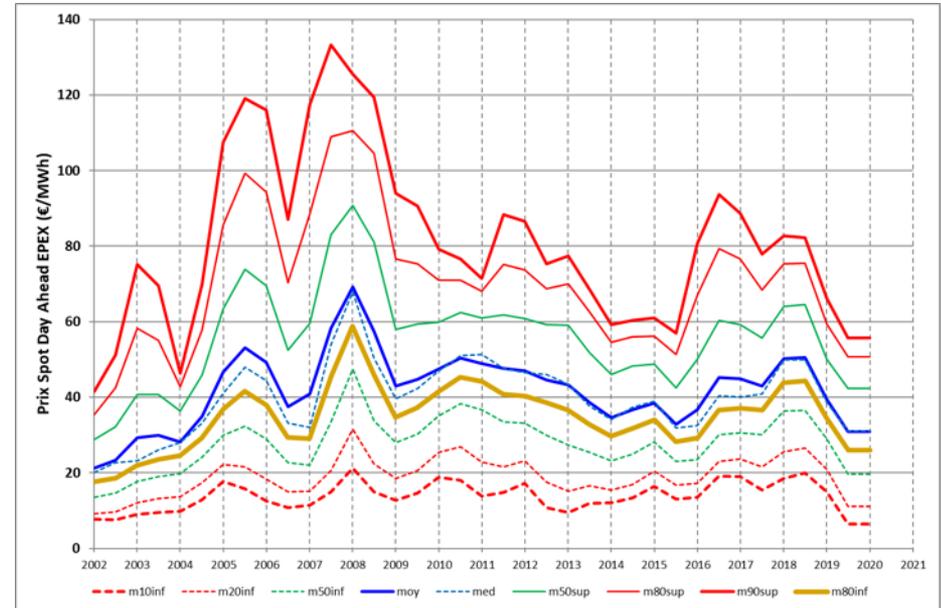
- Des stratégies d'achats d'électricité sur le marché de gros permettant de trouver un optimum entre nombre d'heures de fonctionnement de l'électrolyseur et coût moyen du MWh électrique

- Des compléments de rémunération (subvention au kg d'hydrogène produit) via des appels d'offres CRE

- Des exonérations de taxes (CSPE, TDCE, TCCFE), et des réductions sur la taxe d'acheminement (TURPE), dans des proportions variables pouvant aller jusqu'à 90% selon différents critères à remplir

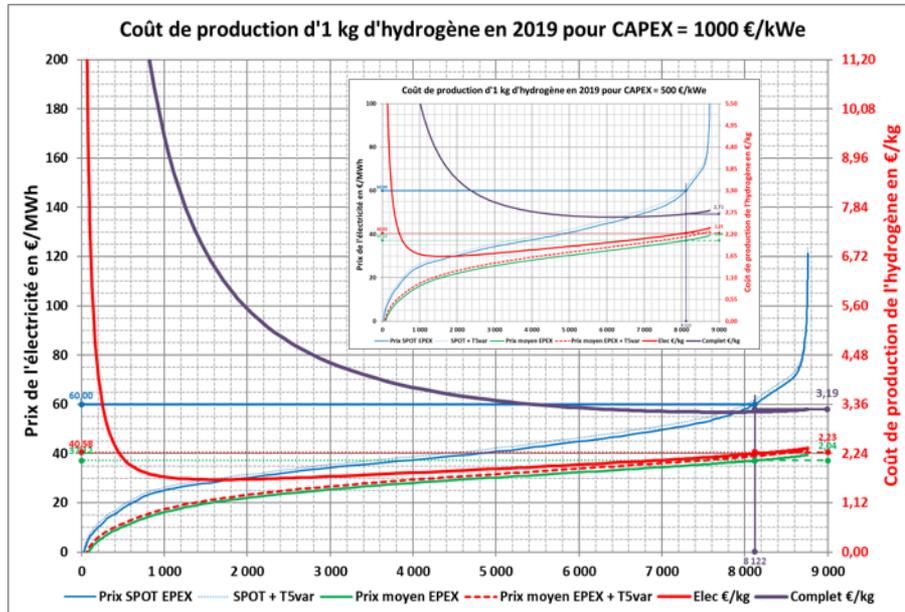
Acheter sur le Spot EPEX pour produire de l'H2 : détermination du prix d'exercice optimal sur le marché

- On observe une forte évolutivité au cours des 20 années écoulées des prix « peak » (m80sup et m90sup) mais également une grande stabilité des prix « off peak » (m10inf et m20inf)
- L'évolution du prix moyen a principalement été façonné par l'évolution des prix « peak »
- **La seule courbe qui intéresse les producteurs d'H2 par électrolyse de l'eau est la courbe m80inf (prix moyen sur les 7000 heures les moins chères) car lorsque les prix sont trop élevés (1760 heures), ils s'effaceront du marché**
- On observe que la courbe m80inf a rarement dépassé les 40 €/MWh et que la tendance générale depuis 2008 de ce segment de prix est à la baisse



Acheter sur le Spot EPEX pour produire de l'H2 : détermination du prix d'exercice optimal sur le marché

Le Prix d'exercice optimal est déterminé tel que le coût marginal de production calculé pour ce prix, en incluant la part proportionnelle du TURPE, est égal au coût complet de production pour le nombre d'heures de fonctionnement qui en découle



- Sur la base de CAPEX de 1000 €/kW et dans l'hypothèse d'achat d'électricité sur le marché des heures à moins de 60 €/MWh (prix moyen résultant = 40,60 €/MWh TURPE inclus), le coût complet de production de l'H2 aurait été de 3,20 €/kg en 2019
- Pour des CAPEX de 500 €/kW (après efforts des fournisseurs et aides d'état), le coût complet descend à 2,71 €/kg et devient insensible au temps de fonctionnement au delà de 5 000 heures
- **L'achat d'électricité baseload à 100 €/MWh conduirait à un coût de complet de production supérieur à 6,0 €/kg** 
- Coût de transport par route : 1,5 à 2€/kg
- Coût de distribution finale : de 2 à 3€ / kg

Les prix de l'électricité sur le marché Spot le 29 mars 2020...

Price



MCV Volume

Compétitivité de l'électrique-hydrogène par rapport au diesel

Rappel de données moyennes de comparaison pour un calcul comparé de coût d'énergie à la roue

- Rendement max théorique d'un moteur diesel : 42% (en régime stabilisé et à charge optimale sur banc test)
- Rendement réel à la roue : de 0% (à l'arrêt) jusqu'à maximum 35%, du fait notamment de pertes sur la montée en température, sollicitations à faibles charges, transmissions mécaniques... : pertes en combustion sur mélange riche (0,95), pertes en thermodynamique théorique (0,6), les pertes de rendement de forme (0,83) et enfin les pertes de rendement mécaniques (0,8)
 - En ville, le rendement d'un moteur se dégrade et n'atteint que 15% (source : IFP EN, <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/transports/les-vehicules-essence-et-diesel#rendement>). À titre d'exemple un Kangoo Diesel de La Poste à Paris consomme 10 litres au 100 km (source Direction Technique Nationale de La Poste) au lieu de 4,6 litres en cycle mixte selon fiche constructeur
 - **Pour la comparaison, nous retiendrons un rendement moyen de 25% pour un véhicule diesel type (segment C/D)**
- Rendement théorique d'un moteur électrique : 90%
- Un véhicule électrique du même segment de comparaison a une consommation moyenne à la roue de 15 kWh/100 km
- Rendement net (déduction faite des auxiliaires) d'une pile à hydrogène : de 45 à 55%, soit un rendement moyen complet à la roue pour $33 \text{ kWh/kg H}_2 \times 50\% \times 90\% = 14,85 \text{ kWh/100 km}$, ce qui correspond aux consommations réelles constatées d'en moyenne de 1 kg/H₂ pour 100 km (Toyota Mirai, Hyundai Nexa)

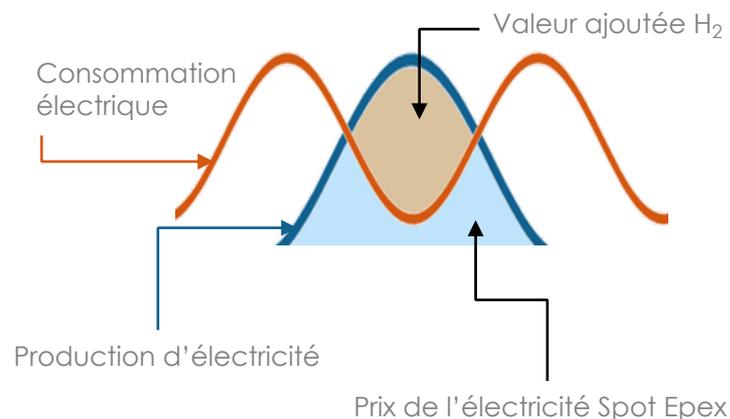
Peut-on produire un hydrogène vert compétitif pour la mobilité ?

- 80% de « l'hydrogène gris » est vendu entre 5€ et 25€/kg : l'hydrogène vert peut être compétitif dans l'hydrogène marchand, selon plusieurs variables clefs (coût transport si transport, autres variables Opex)
- Dans le marché des transports... selon le prix du diesel !
 - L'hydrogène vert présente l'avantage de pouvoir garantir une grande stabilité du prix de l'énergie
 - Son prix final dépendra du modèle économique de la production, transport et distribution

	PCI	Rendement à la roue	Qté	Prix à la pompe	kWh	Prix du plein
Diesel	11 kWh/l	25%	55,0 litres	1,50 €/litre	151,25	82,50 €
H2	33 kWh/kg	45%	10,19 kg H2	8,10 €/kg	151,25	82,50 €

	PCI	Rendement à la roue	Qté	Prix à la pompe	kWh	Prix du plein
Diesel	11 kWh/l	25%	55,0 litres	1,40 €/litre	151,25	77,00 €
H2	33 kWh/kg	45%	10,19 kg H2	7,56 €/kg	151,25	77,00 €

	PCI	Rendement à la roue	Qté	Prix à la pompe	kWh	Prix du plein
Diesel	11 kWh/l	25%	55,0 litres	1,30 €/litre	151,25	71,50 €
H2	33 kWh/kg	45%	10,19 kg H2	7,02 €/kg	151,25	71,50 €



Agenda

Ce sera tout pour aujourd'hui !

Merci de votre attention 😊

