

HYDROGÈNE EN ÎLE-DE-FRANCE

RÉSEAU DES ALEC - **ACTIFS** - WEBINAIRE

24 mars 2022

Thomas Hemmerdinger, chargé de projet transition énergétique, AREC ÎdF
coordinateur du Club Hydrogène Île-de-France



Programme

- ❑ **Actualités régionales**
- ❑ **Introduction sur l'hydrogène : caractéristiques, moyens de production, usages actuels et envisagés**
Thomas Hemmerdinger, chargé de projet transition énergétique, coordinateur du Club Hydrogène Île-de-France, AREC ÎdF
- ❑ **La place de l'hydrogène dans la transition énergétique : place de l'hydrogène dans les scénarios Transition(s) 2050 et Analyse de cycle de vie hydrogène**
Jérémy Almosni, directeur régional, ADEME DR Île-de-France
- ❑ **L'hydrogène dans les écosystèmes territoriaux : définition des écosystèmes territoriaux hydrogène, retour sur l'AAP de l'ADEME**
Thomas Bertheau, chargé de mission hydrogène, ADEME DR Île-de-France
- ❑ **La stratégie hydrogène de l'Île-de-France : priorités régionales, dispositifs de soutien, actualités**
Un représentant de la Région IDF
- ❑ **Panorama régional des initiatives**
AREC, avec l'appui de la Région et l'ADEME

L'hydrogène ?

— Mais que trouvera-t-on? demanda Pencroff. L'imaginez-vous, monsieur Cyrus?

— A peu près, mon ami.

— Et qu'est-ce qu'on brûlera à la place du charbon?

— L'eau, répondit Cyrus Smith.

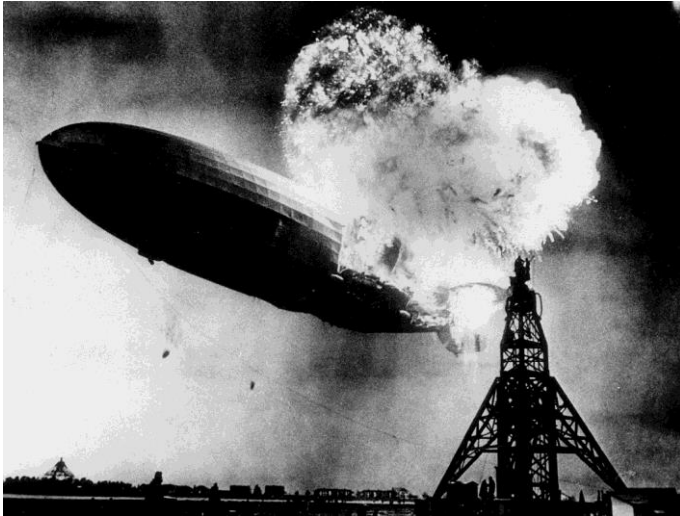
— L'eau, s'écria Pencroff, l'eau pour chauffer les bateaux à vapeur et les locomotives, l'eau pour chauffer l'eau!

— Oui, mais l'eau décomposée en ses éléments constitutifs, répondit Cyrus Smith, et décomposée, sans doute, par l'électricité, qui sera devenue alors une force puissante et maniable, car toutes les grandes découvertes, par une loi inexplicable, semblent concorder et se compléter au même moment. Oui, mes amis, je crois que l'eau sera un jour employée comme combustible, que l'hydrogène et l'oxygène, qui la constituent, utilisés isolément ou simultanément, fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisables et d'une intensité que la houille ne saurait avoir. Un jour, les soutes des steamers et les tenders des locomotives, au lieu de charbon, seront chargés de ces deux gaz comprimés, qui brûleront dans les foyers avec une énorme puissance calorifique. Ainsi donc, rien à craindre. Tant que cette terre sera habitée, elle fournira aux besoins de ses habitants, et ils ne manqueront jamais ni de lumière ni de chaleur, pas plus qu'ils ne manqueront des productions des règnes végétal, minéral ou animal. Je crois donc que lorsque les gisements de houille seront épuisés, on chauffera et on se chauffera avec de l'eau. L'eau est le charbon de l'avenir.

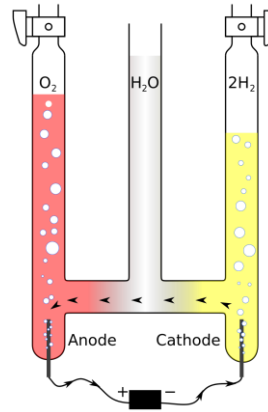
— Je voudrais voir cela, dit le marin.

— Tu t'es levé trop tôt, Pencroff, » répondit Nab, qui n'intervint que par ces mots dans la discussion.

L'hydrogène dans l'imaginaire et les souvenirs



Incendie du Hindenburg



Electrolyse de l'eau



Ballon-sonde météo (Trappes)



Association d'hydrogène liquide (28T) et d'oxygène liquide (162T) pour lancer la fusée Ariane 5



Bombe H (à hydrogène) : bombe nucléaire avec fission au plutonium puis fusion d'isotopes de l'hydrogène

Une société de l'hydrogène depuis longtemps promue...

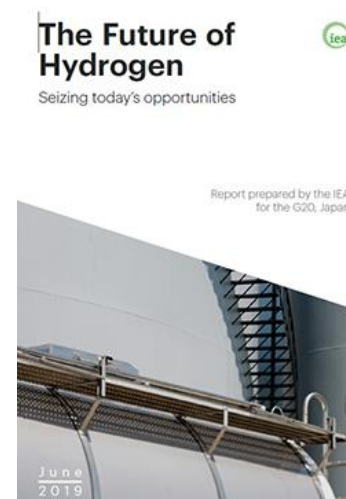
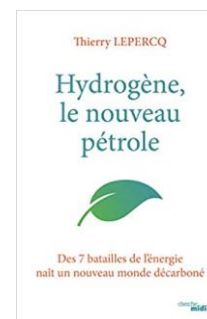
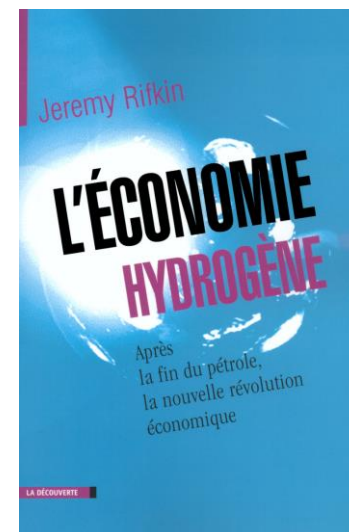
1923 : « Science and the Future » par John Burdon Sanderson Haldane

1970: La naissance de “l'économie hydrogène”
attribué à l'électrochimiste John O'Mara Bockris
“[Toward a liquid hydrogen fuel economy](#)”, Lawrence W. Jones, Université du Michigan, 1970

2002 : « L'économie hydrogène » par Jeremy Rifkin

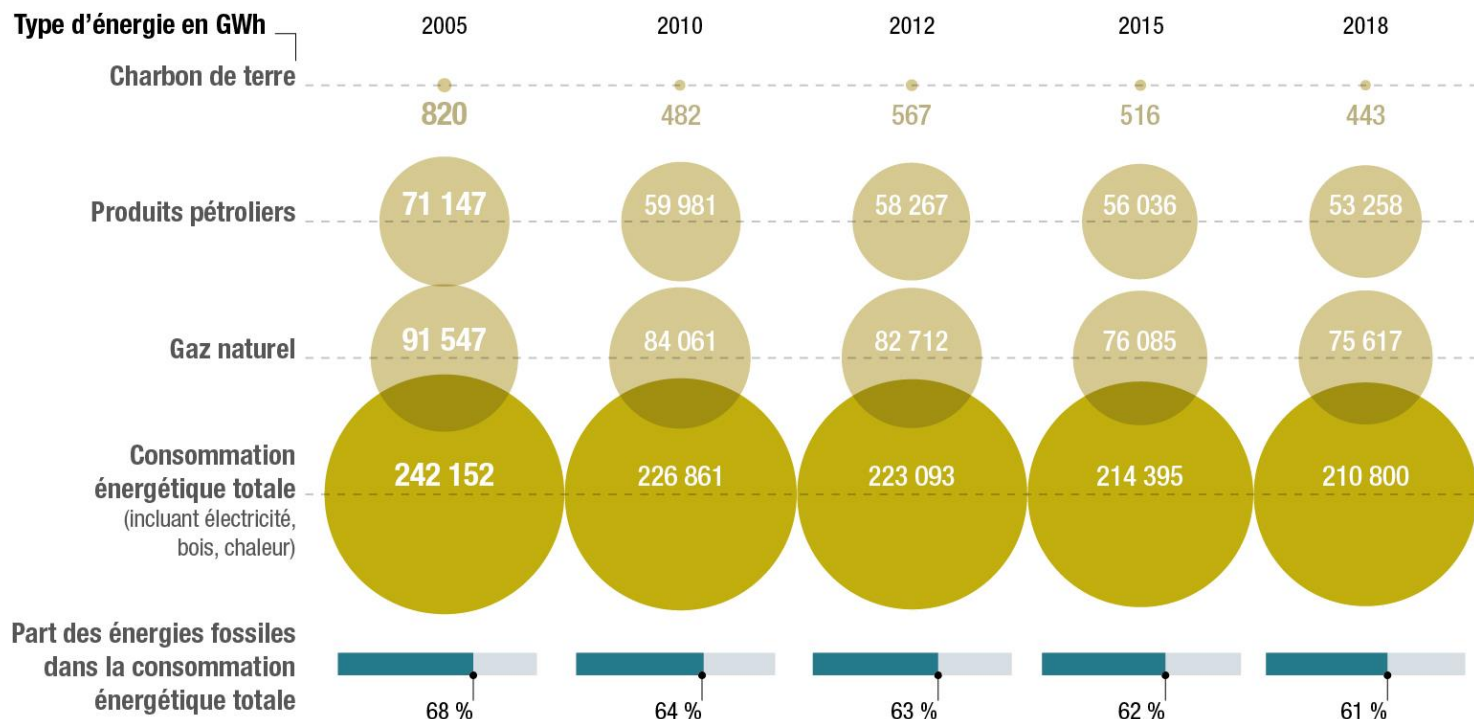
2019 : « Hydrogène, le nouveau pétrole » par Thierry Lepercq

2019 : The Future of Hydrogen par L'Agence Internationale de l'Energie



Le premier enjeu : sortir de la dépendance des énergies fossiles

ÉVOLUTION DE LA **CONSOMMATION DES ÉNERGIES FOSSILES** en Île-de-France (« climat normal » 2005-2018)



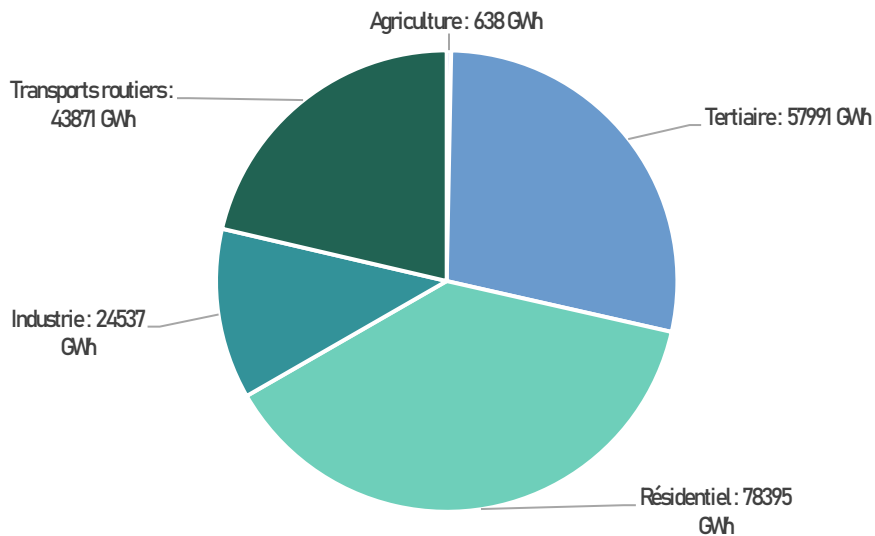
*une consommation des énergies fossiles en baisse continue,
mais toujours majoritaire dans le mix énergétique*

© L'INSTITUT PARIS REGION 2021
Source : Airparif pour le ROSE ÎdF, 2021



Quelques chiffres pour comprendre nos dépendances

Consommations énergétiques finales par secteur d'activités IDF en 2018

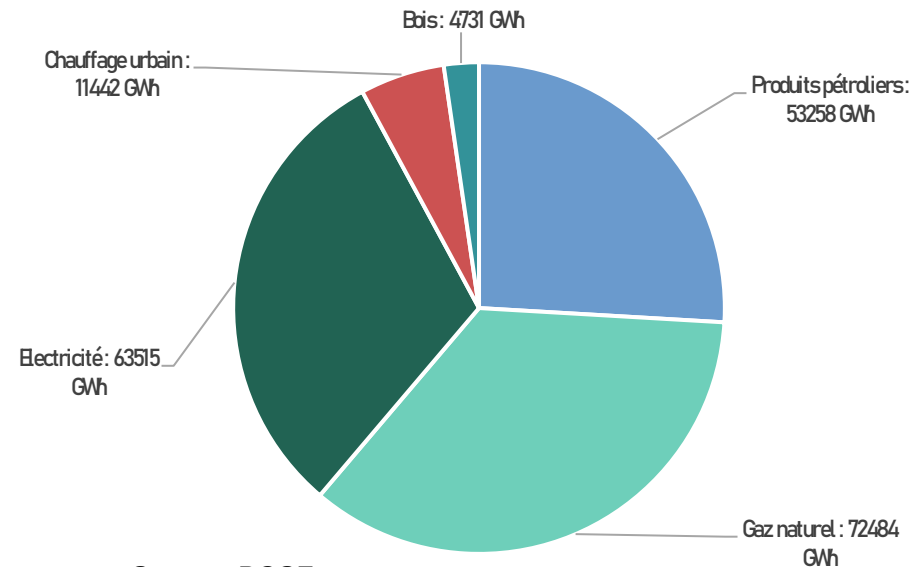


Source : ROSE

Majoritairement tertiaire, l'Ile-de-France, possède une filière industrielle consommatrice d'énergies finales.

L'infrastructure logistique, au cœur de la stabilité de nos formes urbaines et périurbaines, nécessite un apport énergétique important.

Consommations énergétiques finales par type d'énergie en IDF en 2018



Source : ROSE

Importatrice d'énergie, le développement d'une filière hydrogène en Ile-de-France soulève des questions de dépendance avec d'autres régions voire d'autres pays.

L'autre enjeu territorial : la qualité de l'air dans les métropoles

Projet de calendrier progressif
des vignettes Crit'Air

Juillet
2019

Juin
2021

2023

Janvier
2024

2030
objectif

non
classé +



+ 4



+ 3



+ 2



100%
de véhicules
propres

Réduire les émissions de polluants et de particules des transports routiers, de l'industrie et du secteur de l'énergie

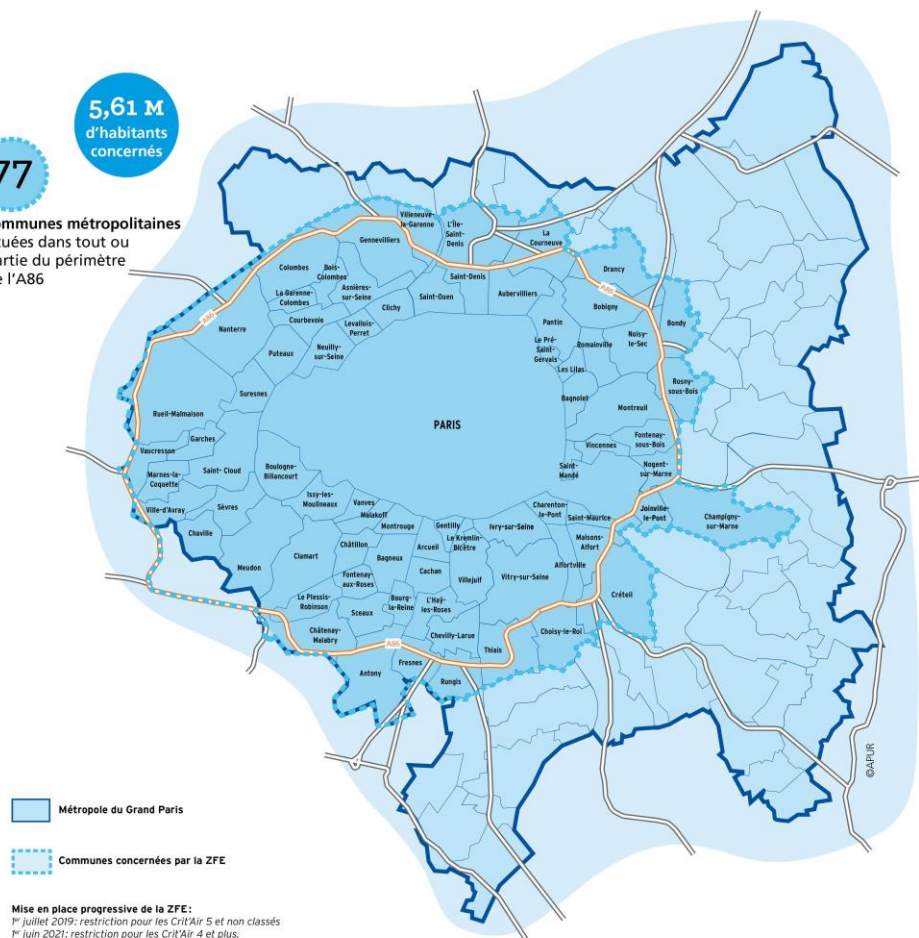
- Oxydes d'azote
- Particules PM10, PM2,5
- Dioxyde de soufre
- Gaz à effet de serre...

De nombreux véhicules particuliers et professionnels d'ores-et-déjà interdits de circuler et encore plus en 2023 et 2024

77

communes métropolitaines
situées dans tout ou
partie du périmètre
de l'A86

5,61 M
d'habitants
concernés



Mise en place progressive de la ZFE:
1^{er} juillet 2019: restriction pour les Crit'Air 5 et non classés
1^{er} juin 2021: restriction pour les Crit'Air 4 et plus.
Objectif 100 % de véhicules propres en 2030

L'hydrogène, les bases



- Le plus simple des atomes : un noyau avec un proton et un électron périphérique
- Le plus abondant des éléments chimiques sur terre,
- Rare à l'état naturel sous forme moléculaire H_2
- Combiné à d'autres atomes (eau, hydrocarbures, biomasse...)
- 75% de la masse de l'Univers
- Avec ses isotopes deutérium et tritium, au cœur des mécanismes de fusion (soleil, ITER...)

On parle de la **molécule dihydrogène H_2** constitué de deux atomes d'hydrogène.

Par esprit de simplification, on confond **hydrogène** et **dihydrogène**.

Tableau périodique des éléments chimiques

1 2 13 14 15 16 17 18

1 H 1,00794

2 He 4,002602

3 Li 6,941 4 Be 9,0121831

5 B 10,81 6 C 12,0106 7 N 14,00643 8 O 15,999 9 F 18,9984032 10 Ne 20,1797

11 Na 22,98976928 12 Mg 24,304 13 Al 26,9815386 14 Si 28,0855 15 P 30,973762 16 S 32,06 17 Cl 35,45 18 Ar 39,948

19 K 39,0983 20 Ca 40,078 21 Sc 44,955908 22 Ti 47,867 23 V 50,9415 24 Cr 51,9961 25 Mn 54,938044 26 Fe 55,845 27 Co 58,933194 28 Ni 58,6934 29 Cu 63,546 30 Zn 65,38 31 Ga 69,723 32 Ge 72,630 33 As 74,921595 34 Se 78,9718 35 Br 79,904 36 Kr 83,798

37 Rb 85,4678 38 Sr 87,62 39 Y 88,90584 40 Zr 91,224 41 Nb 92,90637 42 Mo 95,94 43 Tc [98] 44 Ru 101,07 45 Rh 102,90550 46 Pd 106,42 47 Ag 107,8682 48 Cd 112,414 49 In 114,818 50 Sn 118,710 51 Sb 121,760 52 Te 127,60 53 I 126,90447 54 Xe 131,29

55 Cs 132,90545 56 Ba 137,327 57-71 Lanthanides 58 La 138,9047 59 Ce 140,116 60 Pr 140,90766 61 Nd 144,242 62 Sm 150,36 63 Eu 151,964 64 Gd 157,25 65 Tb 158,92535 66 Dy 162,500 67 Ho 164,93033 68 Er 167,259 69 Tm 168,93422 70 Yb 173,045 71 Lu 174,967

72 Hf 178,49 73 Ta 180,94788 74 W 183,84 75 Re 186,207 76 Os 190,23 77 Ir 192,222 78 Pt 195,084 79 Au 196,966569 80 Hg 200,592 81 Tl 204,3833 82 Pb 207,2 83 Bi 208,98040 84 Po [209] 85 At [210] 86 Rn [222]

73 Fr [223] 74 Ra [226] 89-103 Actinides 89 Ac [227] 90 Th 232,0377 91 Pa 231,03688 92 U 238,02891 93 Np [237] 94 Pu [244] 95 Am [243] 96 Cm [247] 97 Bk [247] 98 Cf [251] 99 Es [252] 100 Fm [257] 101 Md [258] 102 No [259] 103 Lr [260]

Métaux : Alcalins, Alcalino-terreux, Lanthanides, Actinides, Métaux de transition, Métaux pauvres, Métalloïdes, Autres non-métaux, Halogènes, Gaz nobles, Non classés

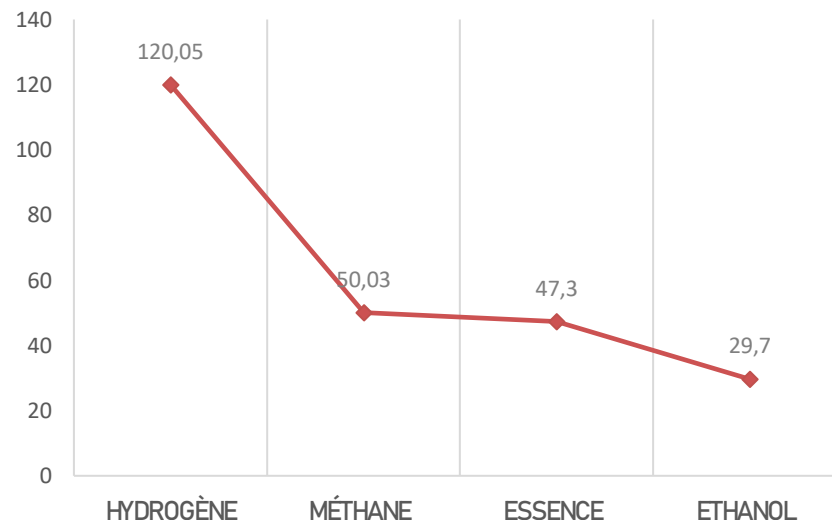
primordial, synthétique, d'origine naturelle

Caractéristiques intéressantes	Caractéristiques problématiques
Plus léger que l'air (ballons, dirigeables...)	Limites larges d'inflammabilité dans l'air
Diffuse rapidement dans l'air en milieu ouvert	Faible énergie minimale d'inflammation
Forte densité énergétique (3x plus que l'essence ou gazole)	Faible densité volumique (contrainte du stockage)
Non toxique	Molécule la plus petite, tendance à fuir
Inodore	Fragilisation des matériaux (aciers)
Combustible non carboné	Rare à l'état naturel, nécessite d'être extrait
Flamme peu radiative	Flamme peu visible

L'hydrogène, les bases

Caractéristiques intéressantes	Caractéristiques problématiques
Plus léger que l'air (ballons, dirigeables...)	Limites larges d'inflammabilité dans l'air
Diffuse rapidement dans l'air en milieu ouvert	Faible énergie minimale d'inflammation
Forte densité énergétique (3x plus que l'essence ou gazole)	Faible densité volumique (contrainte du stockage)
Non toxique	Molécule la plus petite, tendance à fuir
Inodore	Fragilisation des matériaux (aciers)
Combustible non carboné	Rare à l'état naturel, nécessite d'être extrait
Flamme peu radiative	Flamme peu visible

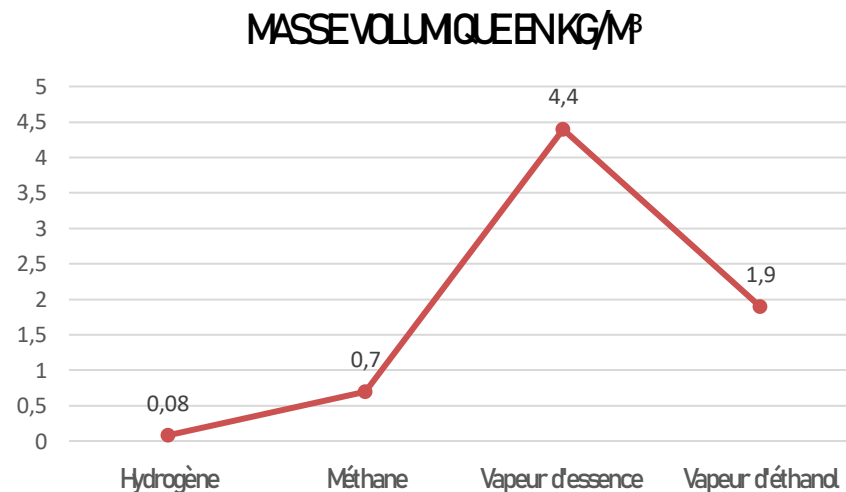
POUVOIR CALORIFIQUE INFÉRIEUR EN MJ/KG



L'hydrogène est un vecteur énergétique à fort pouvoir calorifique. C'est l'une des raisons de l'engouement autour de cette molécule.

L'hydrogène, les bases

Caractéristiques intéressantes	Caractéristiques problématiques
Plus léger que l'air (ballons, dirigeables...)	Limites larges d'inflammabilité dans l'air
Diffuse rapidement dans l'air en milieu ouvert	Faible énergie minimale d'inflammation
Forte densité énergétique (3x plus que l'essence ou gazole)	Faible densité volumique (contrainte du stockage)
Non toxique	Molécule la plus petite, tendance à fuir
Inodore	Fragilisation des matériaux (aciers)
Combustible non carboné	Rare à l'état naturel, nécessite d'être extrait
Flamme peu radiative	Flamme peu visible



La masse volumique de la molécule de l'hydrogène est très faible. Cela entraîne des problématiques de distribution et de stockage.

L'hydrogène, les bases

Caractéristiques intéressantes	Caractéristiques problématiques
Plus léger que l'air (ballons, dirigeables...)	Limites larges d'inflammabilité dans l'air
Diffuse rapidement dans l'air en milieu ouvert	Faible énergie minimale d'inflammation
Forte densité énergétique (3x plus que l'essence ou gazole)	Faible densité volumique (contrainte du stockage)
Non toxique	Molécule la plus petite, tendance à fuir
Inodore	Fragilisation des matériaux (aciers)
Combustible non carboné	Rare à l'état naturel, nécessite d'être extrait
Flamme peu radiative	Flamme peu visible

Le conditionnement de l'hydrogène peut s'effectuer par :

- compression,
- liquéfaction,
- adsorption réversible de l'hydrogène par des corps solides plus facilement manipulables.

À pression égale, un même volume d'hydrogène contient trois fois moins d'énergie que le gaz naturel.

Le mode de transport dépend de la quantité d'hydrogène à transporter, de la distance à parcourir et de la situation géographique de ce parcours, terrestre ou maritime

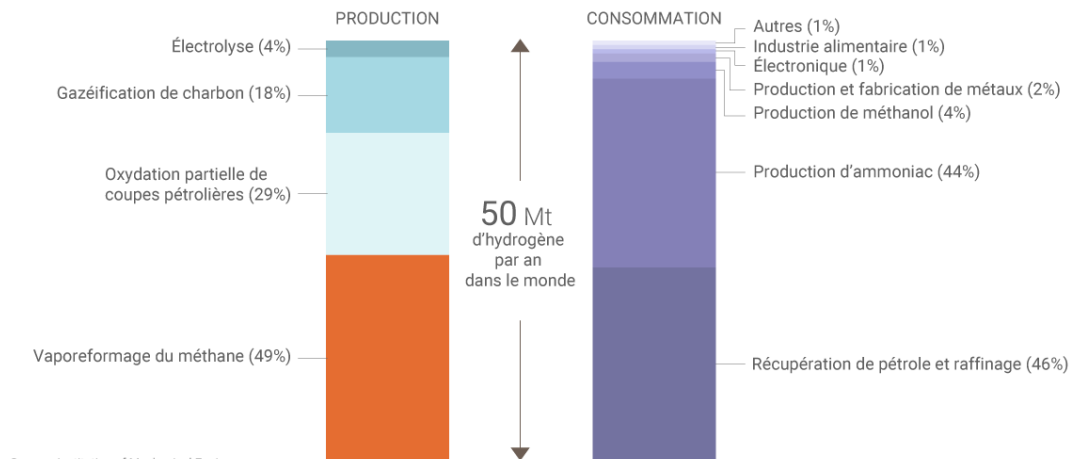
L'ammoniac comme porteur d'hydrogène : production, transport, stockage. Plus facile à utiliser que l'hydrogène, l'ammoniac peut constituer un vecteur d'énergie en substitution à celui-ci.

L'hydrogène aujourd'hui, à quoi ça sert ?

L'hydrogène sous forme gazeuse est une **matière utilisée dans l'industrie**. Sa consommation en **énergie** est encore très peu développée.

- Réactif pour les procédés de **raffinage** : élimination du soufre naturellement contenu dans le pétrole (45% plus autoproduction via les process)
- Matière de base pour la production **d'engrais** : fabrication d'ammoniac (NH_3) à partir de l'azote de l'air N_2 (réaction Haber Bosch)
- Production de **méthanol**, de **biocarburants**
- Lancement des **fusées** sous forme d'hydrogène liquide
- Utilisation plus diffus et faibles en volumes : **textile, verre, électronique** / semi conducteurs, **céramique, métallurgie, agroalimentaire, mécanique** des moteurs (décalaminage de moteurs thermiques), **santé** ...

Hydrogène Production et consommation dans le monde



Quelques chiffres actualisés

- **74 millions de tonnes** utilisés dans le monde en 2018
- France : **780 000 tonnes en 2019** (avant 1 MT, varie en fonction des besoins en produits pétroliers notamment)

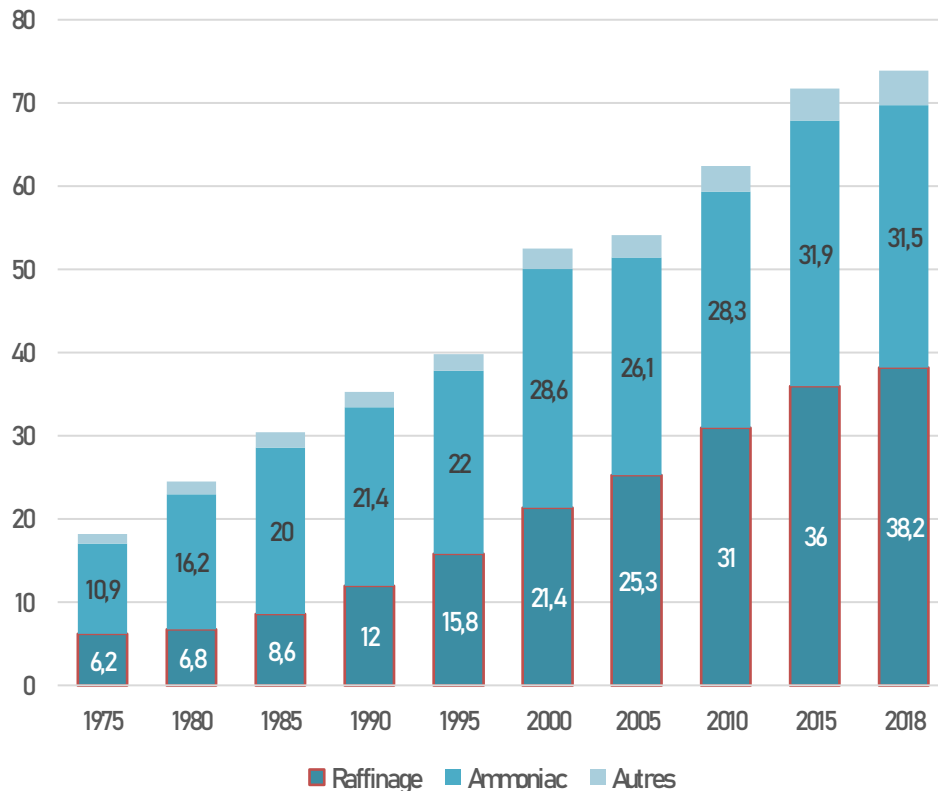
L'hydrogène était difficilement transportable en masse, la **production est actuellement centralisée** sur des plateformes industrielles pétro-chimiques avec **approvisionnement direct (hydrogénoducs)** de gros consommateurs + conditionnement / logistique (**camions**) vers des petits sites



Remarque d'hydrogène comprimé
© Air Products

L'hydrogène aujourd'hui, à quoi ça sert ? raffinage

Evolution de la demande d'hydrogène pur dans le monde (en Mt)



Source : IEA (2019) The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities

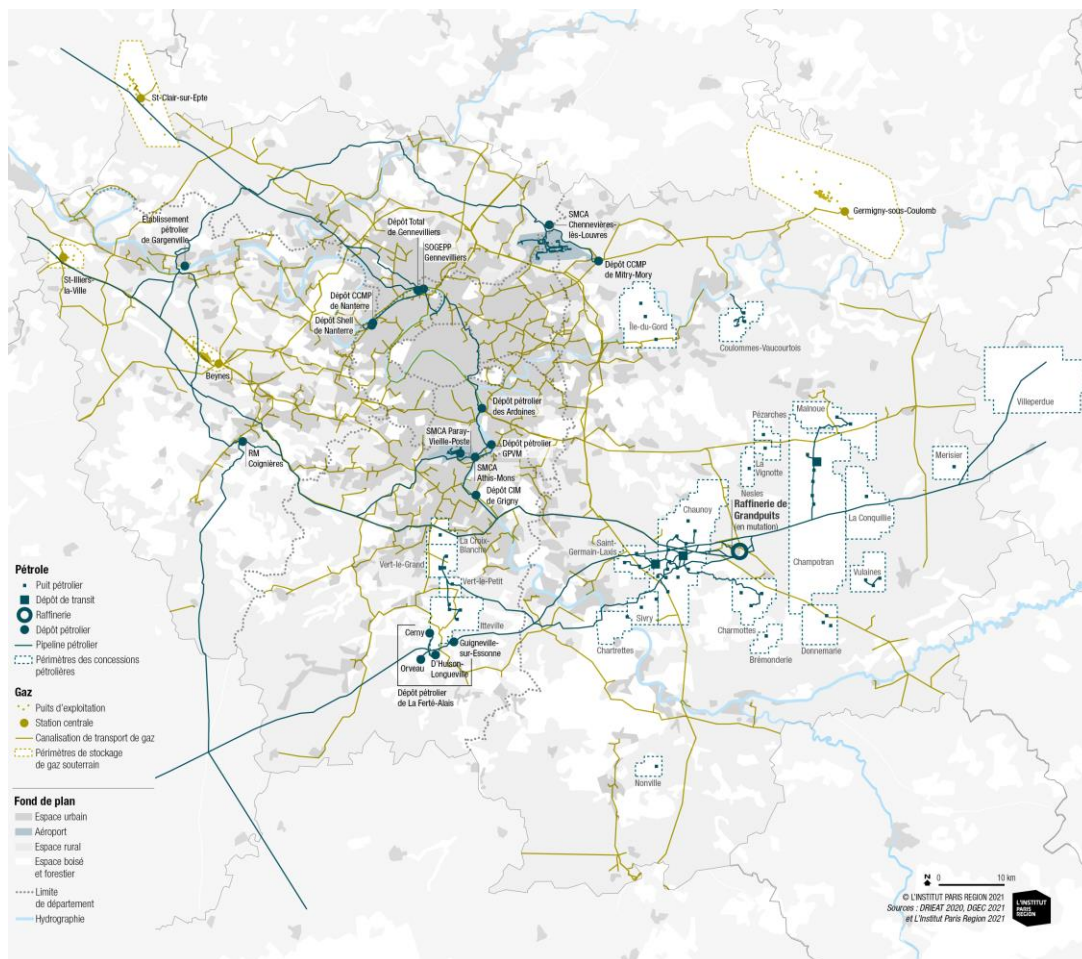
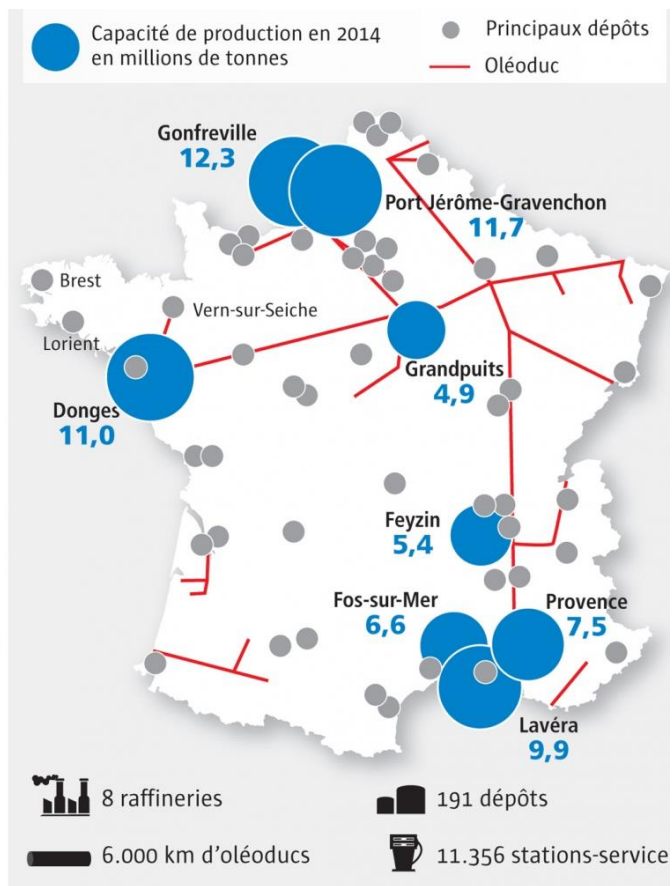
L'hydrogène est principalement utilisé pour désulfurer les produits issus de la distillation.

L'hydrogénation permet d'enlever les thiols des gaz obtenus. Ces thiols sont responsables des odeurs caractéristiques des produits pétroliers et de leur corrosivité.

La réduction du soufre dans les produits pétroliers permet de diminuer les émissions de dioxyde de soufre à la sortie de votre véhicule.

Depuis le protocole d'Helsinki en 1985, six documents ont visé le SO₂.

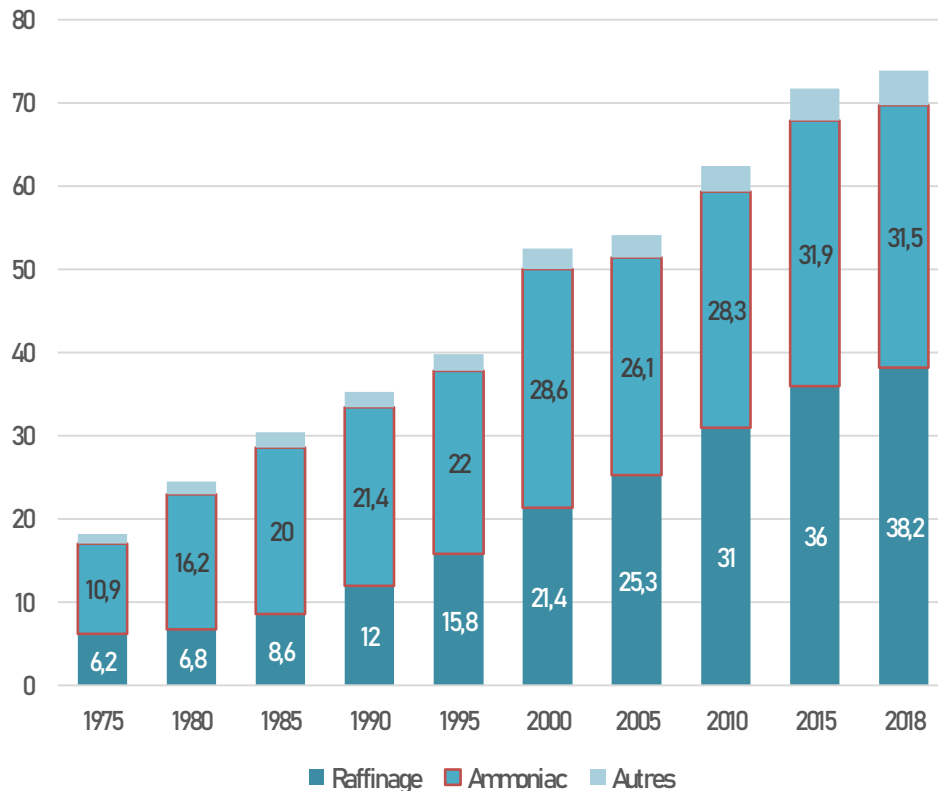
Localisation en France



L'hydrogène aujourd'hui, à quoi ça sert ?

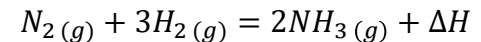
Engrais

Evolution de la demande d'hydrogène pur dans le monde (en Mt)



Source : IEA (2019) The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities

Réaction Haber-Bosch



L'ammoniac est utilisé principalement en agriculture :

- Fertilisation des sols
- Alimentation animale

La fertilisation des sols se pratique par injection du gaz liquéfié à une profondeur de 12 à 15 cm.

L'ammoniac est lui aussi un vecteur énergétique.

Localisation en France Engrais (Borealis)



Source : L'élémentarium

	Capacité, en kt/an	Nombre d'usines	Production, en kt		Capacité, en kt/an	Nombre d'usines	Production, en kt
Allemagne	3 438	5	2 833	Bulgarie	1 118	3	*
Pologne	3 210	5	2 643	Belgique	1 020	2	*
Pays Bas	2 717	2	*	Espagne	609	3	437
Roumanie	2 176	6	850	Slovaquie	429	1	355
France	1 495	4	1 000	Croatie			452
Lituanie	1 118	1	1 024	Hongrie		2	436

Sources : Eurostat et Centre for European Policy Studies

Grandpuits est situé en Seine-et-Marne.

Pour effectuer sa production annuelle, Borealis utilise approximativement 40 kt/an d'H₂.

C'est l'équivalent de 5% de la consommation annuelle française.

Comment le produit-on ?



Plateforme industrielle (énergies, chimie) de Port-Jérôme sur Seine
Au premier plan, dépôt pétrolier et raffinerie d'ExxonMobil
Au second plan à droite, unité SMR d'Air Liquide (avec installation CCUS CryocapTM – 100 000 T CO₂ / an)

Mode de production dominant :
vaporeformage du gaz naturel
(*steam methane reforming SMR*)
deux étapes à haute température
(700-1000°C) en présence de
vapeur d'eau

- Fortes émissions de CO₂ (10 à 11 kg CO₂/ kg H₂, estimées à **3 % des émissions de GES de la France**)
- Coût de production 1,5 € / kg H₂, **le plus économique** (hors compression, conditionnement, transport, **prix du gaz naturel** et **prix du CO₂**)



L'arc-en-ciel de l'hydrogène

L'arc-en-ciel de l'hydrogène : ses différentes voies de production, son empreinte carbone et sa terminologie

	Couleur	Technologie	Source d'énergie ou d'électricité	Empreinte carbone ¹	Terminologie ²
Production via biomasse	Hydrogène vert	Thermolyse	Biomasse	Basse (< 3 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène renouvelable
	Hydrogène vert	Vaporeformage	Biométhane	Basse (< 3 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène renouvelable
Production via l'électricité	Hydrogène vert	Electrolyse de l'eau	Solaire, éolienne, hydroélectricité	Minimale (< 2 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène renouvelable
	Hydrogène rose		Nucléaire	Minimale (< 2 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène bas-carbone
	Hydrogène jaune		Réseau électrique (FR)	Basse (< 3 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène bas-carbone
Production via les énergies fossiles	Hydrogène bleu	Vaporeformage Gazéification	Gas naturel ¹ Charbon + CCUS	Basse (< 3 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène bas-carbone
	Hydrogène turquoise	Pyrolyse	Gaz naturel	Noir de carbone (co-produit)	/
	Hydrogène gris	Vaporeformage		Elevée (~ 11 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène carboné
	Hydrogène marron	Gazéification	Lignite	Très élevée (> 20 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène carboné
	Hydrogène noir		Charbon bitumineux	Très élevée (> 20 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène carboné

Biomasse « n'entrant pas en conflit avec d'autres usages permettant leur valorisation directe »

Valeur négative ?

- 2,13 (SMR biométhane)
- 1,59 (mix EnR)
- 2,58 (source PV)
- 0,70 (source éolien)
- 0,45 (source hydraulique)

- 2,77 (réseau France)
- 19,8 (réseau Europe)

Vrai valeur ?

Quid de l'hydrogène blanc (naturel) ?

¹ Méthode d'évaluation des émissions de GES en périmètre well-to-gate incluant le scope 1, le scope 2 et le scope 3 « amont ».

² En reprenant la terminologie légale introduite à l'article L811-1 du code de l'énergie.

L'impact d'une compression à 200 bars utilisant le réseau électrique Français est de 0,1 kgCO₂/kgH₂.

L'impact du transport routier d'hydrogène à 200 bars, la norme actuelle, est de 1,12 kgCO₂/kgH₂/100km

À 500 bars, estimé à 0,35 kgCO₂/kgH₂/100km

Les différents types d'électrolyseurs

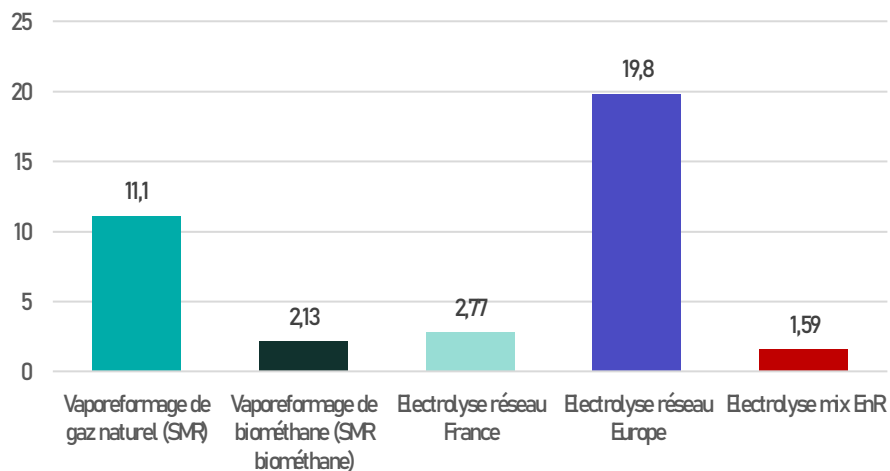
	TRL	Efficacité électrique (%)	Espérance de vie (heures)	Empreinte foncière (m²/kWe)	CAPEX (USD/kWe)
<i>Alcaline</i>	9	67	75 000	0,095	950
<i>PEM</i>	9	55	60 000	0,048	1450
<i>SOEC (haute température)</i>	7	77	20 000	n.c	5600

Source : Global Hydrogen Review

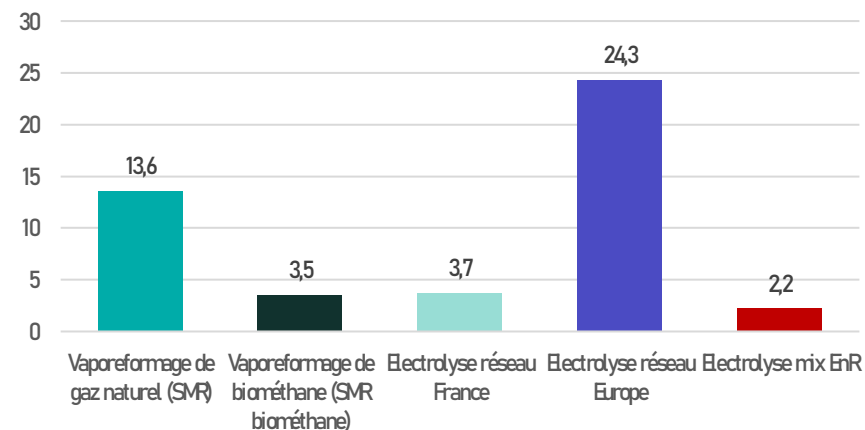
En moyenne via les technologies PEM et Alcaline, la production d'un kg d'H₂ consomme 55 kWh d'électricité et 20 kg d'eau

Enjeu : le produire au plus près des besoins et décarboné

Emissions de CO₂ liées à la production d'hydrogène
(kg CO₂ / kg H₂)



Emissions de CO₂ liées à la production et la distribution d'hydrogène (kg CO₂ / kg H₂)

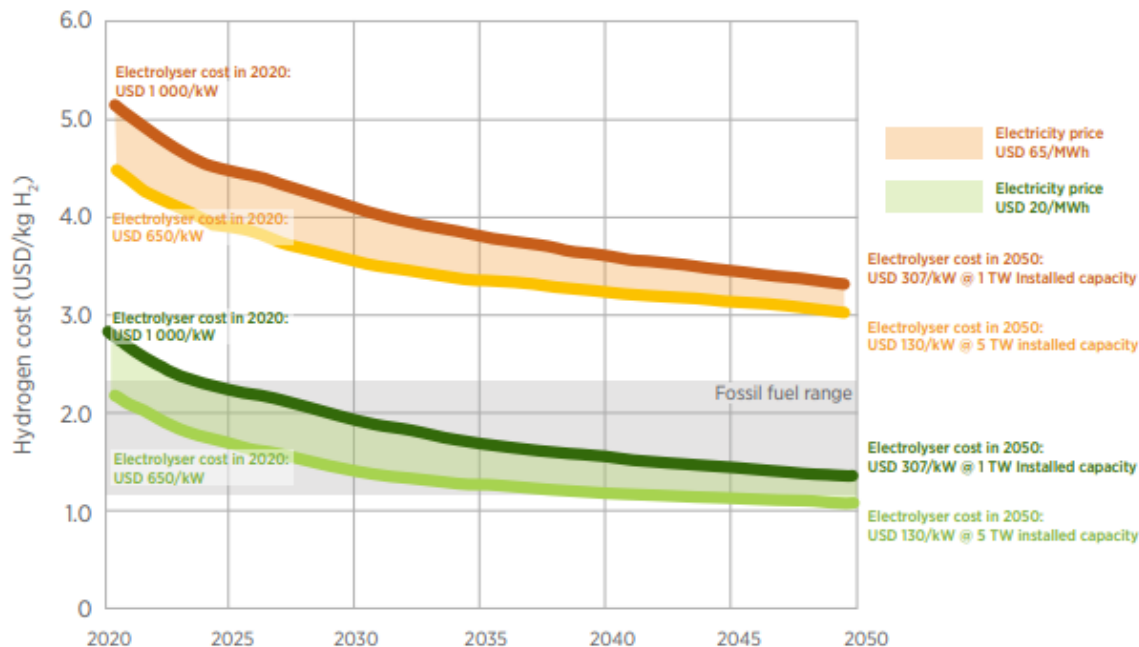


Source : ADEME

La taxonomie européenne, entrée en vigueur le 1^{er} janvier 2022, a imposé un seuil de 3 kg CO₂ eq/kg H₂ d'émissions de GES au cours du cycle de vie pour que l'hydrogène soit considéré comme « durable ».

Cela n'inclut pas le transport de l'hydrogène vers son lieu d'utilisation !

Le coût financier et quelques évolutions



Source : IRENA

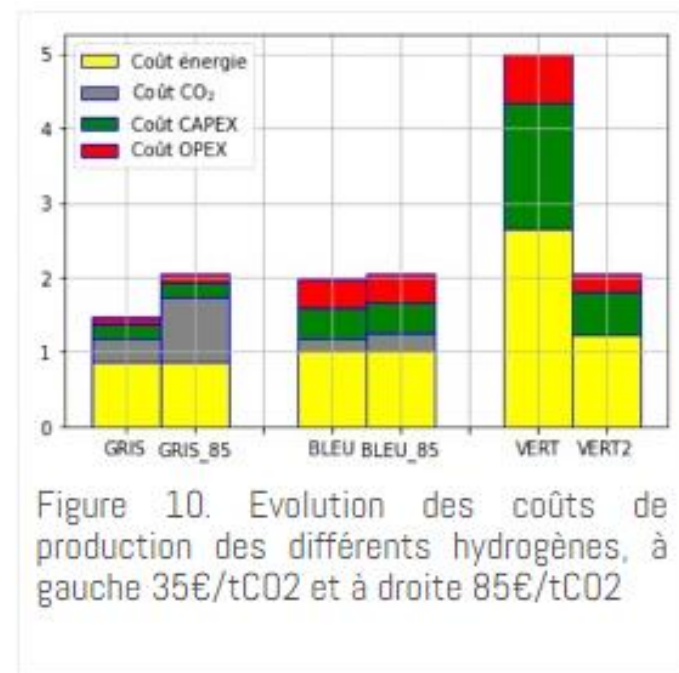


Figure 10. Evolution des coûts de production des différents hydrogènes, à gauche 35€/tCO₂ et à droite 85€/tCO₂

Source : Hydrogen Council

Le CAPEX des électrolyseurs devrait baisser régulièrement si massification de la production par électrolyse

L'OPEX varie en fonction du coût de l'énergie et de la taxe carbone.

Les variations du prix du gaz et de la taxe carbone sont actuellement très importantes.

Focus sur la stratégie hydrogène française

Plan Hydrogène en 2018 – 100 M€

- le Programme d'investissements d'avenir (PIA) a mobilisé plus de 100 M€ en soutenant la mise en œuvre de démonstrateurs et la prise de participation dans des entreprises à fort potentiel ;
- L'Agence nationale de la recherche (ANR) a soutenu la recherche publique en mobilisant plus de 110 M€ sur les 10 dernières années ;
- Bpifrance a accompagné de nombreuses startup ou PME dans leurs projets d'innovation et de développement technologiques ;
- L'Ademe a soutenu le déploiement de la mobilité hydrogène en apportant 80 M€ ;
- La Banque des Territoires s'est également positionnée en soutenant des projets de déploiements portés par des collectivités.

Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France (SNDHD) en 2020 : 7,2 Mds € d'ici 2030

- Installer suffisamment d'électrolyseurs pour apporter une contribution significative à la décarbonation de l'économie ;
- Développer les mobilités propres en particulier pour les véhicules lourds ;
- Construire en France une filière industrielle créatrice d'emplois et garante de notre maîtrise technologique.

Plan France 2030

- 1,9 milliards supplémentaires pour l'hydrogène renouvelable et bas-carbone
- Fonds pour décarboner des grandes zones industrielles (électrification, hydrogène, capture CO2...)

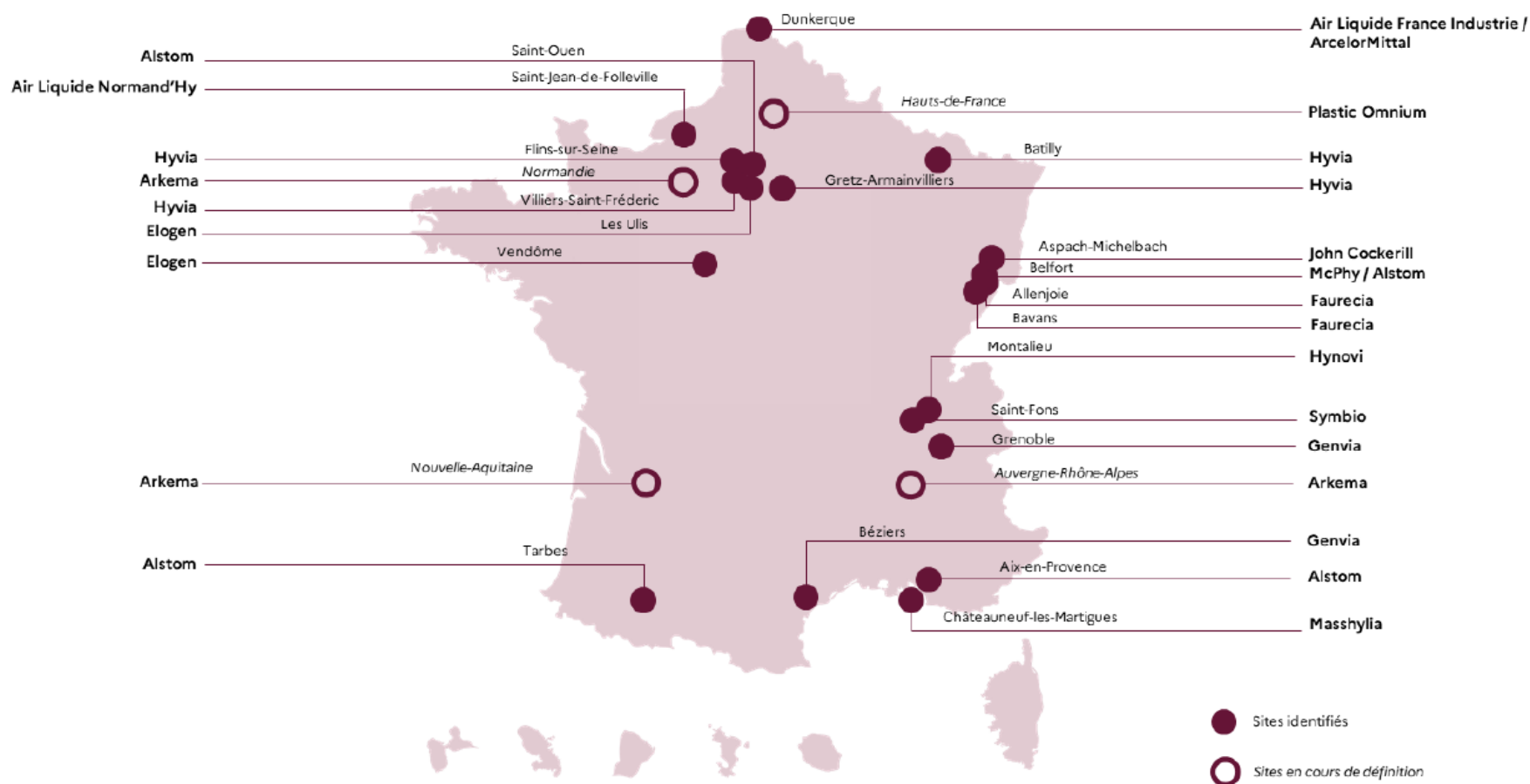
Focus sur la stratégie hydrogène française

Les dispositifs de soutien de la stratégie française

- 2020-2023- AAP Ecosystèmes territoriaux hydrogène - 275 M€
- 2020-2023- AAP Briques technologiques et démonstrateurs – 350 M€
- 2021 – 2025 - Construction d'un projet important d'intérêt européen commun (PIIEC/IPCEI) pour des *gigafactories* hydrogène (industrie, équipements, production), à l'instar du projet européen sur les batteries.
1,5 Md€+ fonds européens
- 2021 - AMI programme prioritaire de recherche – 65 M€
- 2022 -20xx - Appel d'offres pour le mécanisme de soutien à la production d'hydrogène bas carbone

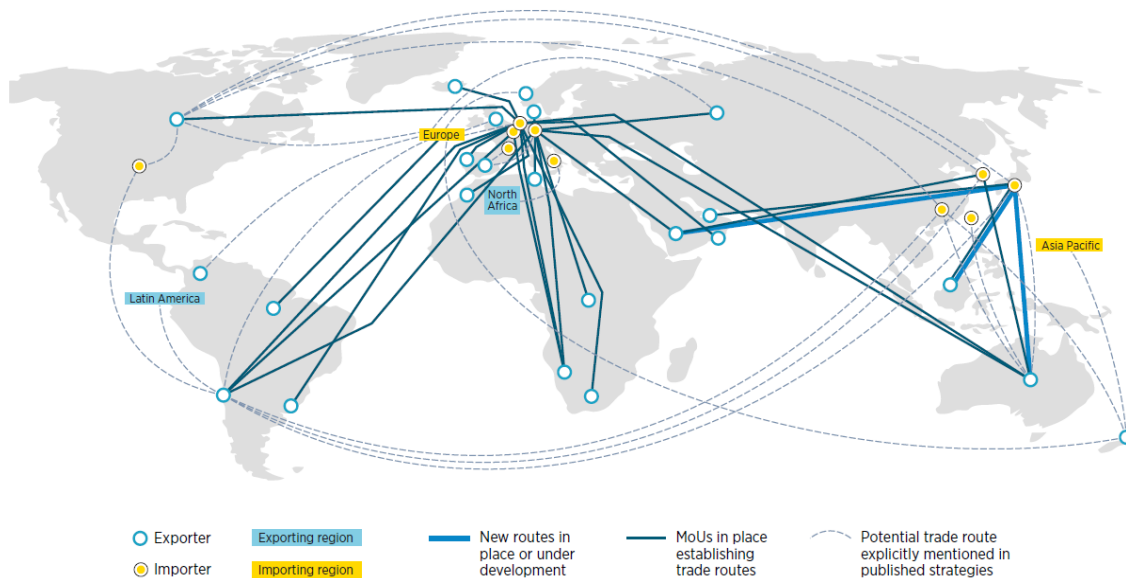
Focus sur la stratégie hydrogène française

Projets prénotifiés par la France à la Commission européenne dans le cadre du PIIEC sur l'hydrogène



Vers une géopolitique de l'hydrogène ?

Figure 2.9 An expanding network of hydrogen trade routes, plans and agreements

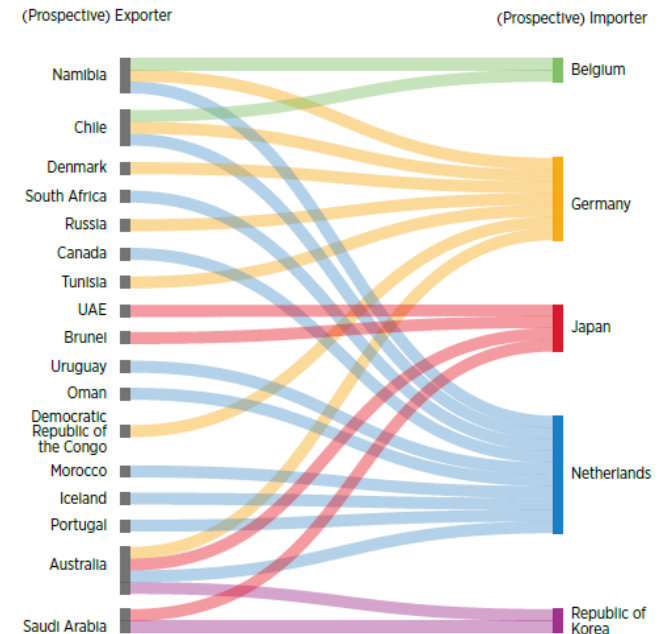


Map source: Natural Earth, 2021

Notes: Information on this figure is based on the information contained in government documents at the time of writing.

Disclaimer: This map is provided for illustration purposes only. Boundaries and names shown on this map do not imply any endorsement or acceptance by IRENA.

Figure 4.5 Selected country bilateral trade agreements and MOUs, announced as of November 2021



Positionnements de la Russie ? Ukraine ? Arabie Saoudite ?

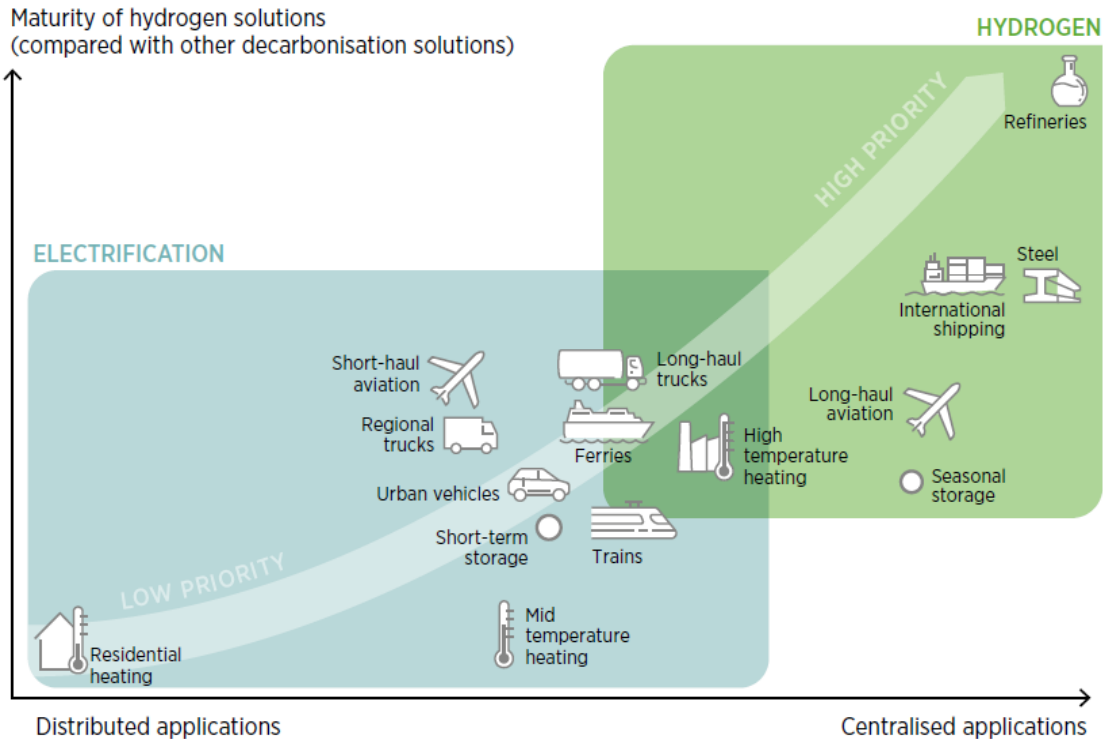
La France affiche une volonté de production domestique à partir de son électricité renouvelable et bas-carbone.



Suiso Frontier, premier bateau transportant de l'hydrogène liquide (Australie -> Japon)
Crédit : Masahiro Sugimoto/AP

L'hydrogène pour quels usages ?

Maturity of hydrogen solutions
(compared with other decarbonisation solutions)



Sources: IRENA (forthcoming-b).



L'hydrogène et les différents types de transports

	TRL	Estimation des besoins en 2050 pour l'Europe*	Coût du matériel	Utilité
<i>Aviation</i>	3	68 TWh	Non estimé	Décarboner les usages Tourisme Moyens courriers E-fuels
<i>Ferroviaire</i>	8	Non estimé	8 millions d'euros de plus **	Lignes non électrifiées Lignes nécessitant de la puissance Fret
<i>Fluvial et maritime</i>	7	Non estimé	Entre 200 000 et 400 000 euros de plus	ZFE et fleuves Péniches, pousseurs Tourisme Transport passagers Carburants dérivés (NH3, LOHC, LH2)
<i>Routier</i>	8 / 9	217 TWh	Entre 300 000 et 500 000 euros de plus	Long trajet Contraintes de charge Charge utile / puissance Flottes captives

Hub /
Liens avec
les SAE

* Source : Guidehouse 2021 European Backbone (lobby pro-hydrogène) **Source : Comparaison de deux contrats passés entre un organisme public et Alstom

Principe de l'hydrogène dans les transports

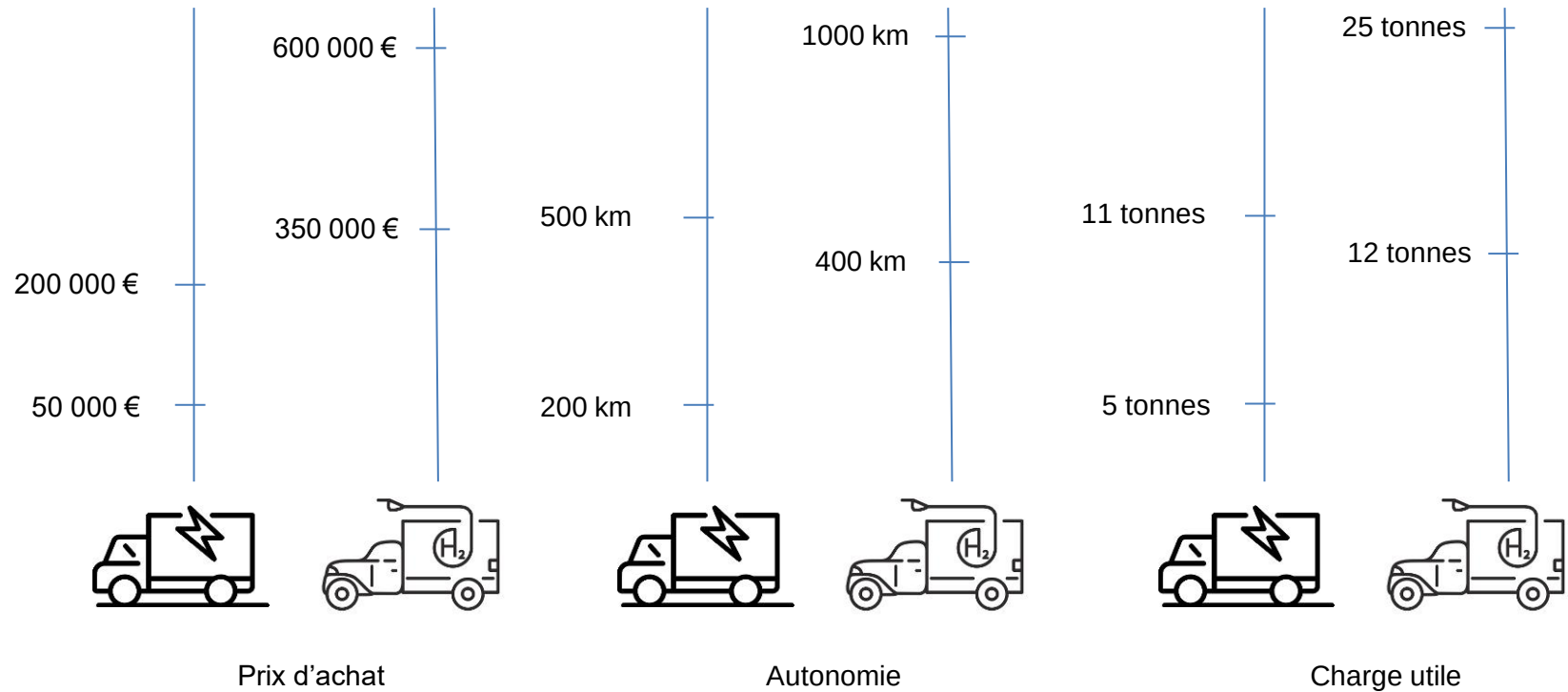
Véhicule électrique avec réservoir H2 et pile à combustible

- 100 % H2
- Hybride H2 / batterie
- Batterie + Range extender H2 (prolongateur d'autonomie)

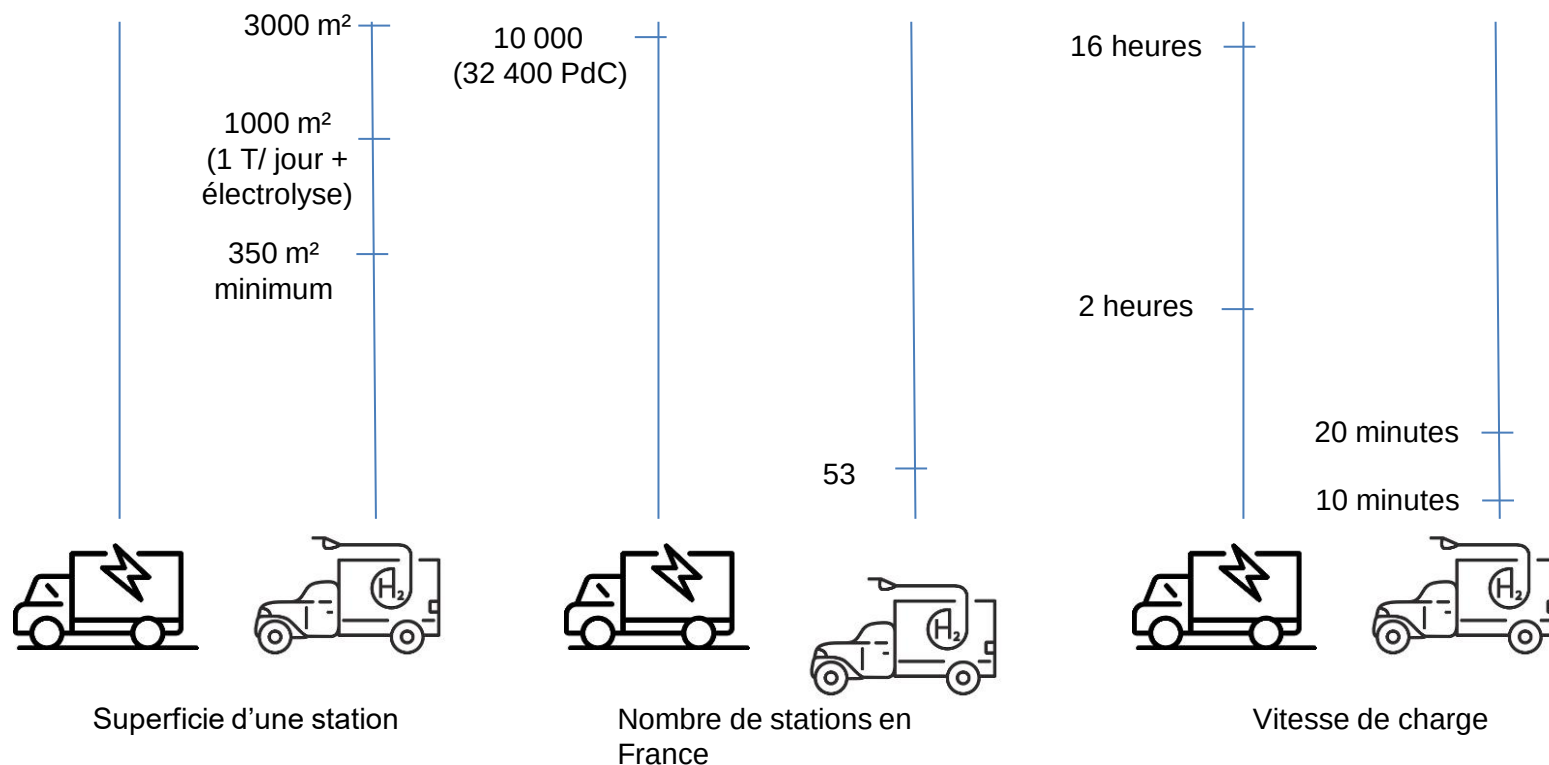
ICE H2 (moteur à combustion interne)

- Nécessite changements de pièce, réglage injection, combustion, filtres...
- IFPen et Bosch en IDF, Toyota, Renault positionnés sur ce créneau
- Attention, bruit + émissions de polluants (NOx plus faibles mais pas nulles)

Coût, autonomie et charge utile



Stations : superficie, occurrence et vitesse de recharge



Avantages et inconvénients du véhicule hydrogène

Avantages	Inconvénients
<i>0 émission à la roue</i>	<i>Coût du carburant</i>
<i>Pas de perte de puissance</i>	<i>Coût de l'infrastructure</i>
<i>Charge utile assez importante</i>	<i>Charge utile inférieure aux camions classiques</i>
<i>Autonomie équivalente à celle des camions actuels</i>	<i>Freins réglementaires</i>
<i>Vitesse de recharge rapide</i>	<i>Encombrement des réservoirs H2</i>
<i>Valorisation de la PAC pour la chaleur de l'habitat</i>	

Usages énergétiques

Approvisionnement électrique hors réseau :

- Couplage Electrolyse / PAC avec PV / batteries pour créer un smart grid renouvelable
- Fourniture d'H₂ pour un groupe électrogène à hydrogène (pile à combustible) pour les chantiers, l'évènementiel, le cinéma, les data centers...
- Stockage massive H₂ de l'électricité renouvelable
 - Power-to-gas-to-Power PGP (rendement faible),
 - injection réseau gaz
 - combustion turbine à gaz (cf. rapport RTE)



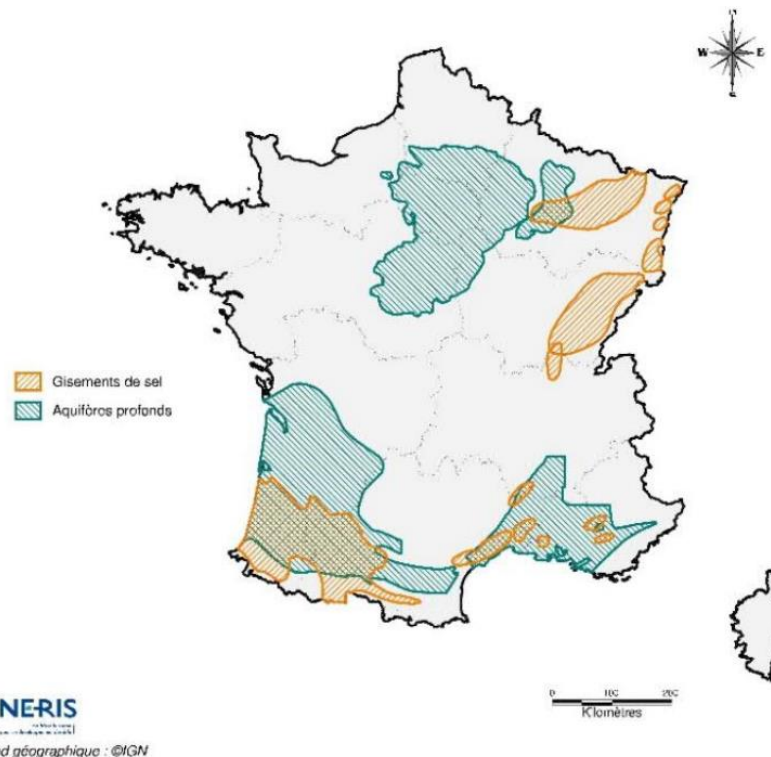
Stockage de l'hydrogène

Modes de stockage

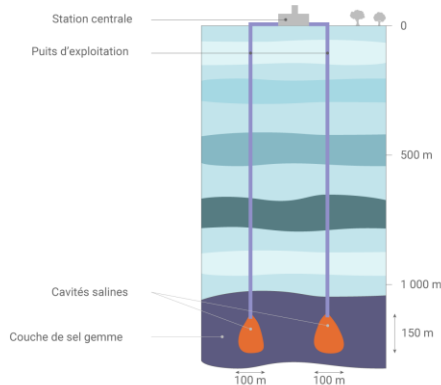
Cavités souterraines

Compression

Composés chimiques
(LOHC, Ammoniac,
hydrures métalliques,
sel de bore...)



Hydrogène Illustration d'un stockage
en cavité saline



Connaissance des Énergies - Tribune d'Isabelle Moretti

L'hydrogène, une des voies de stockage massif de l'électricité

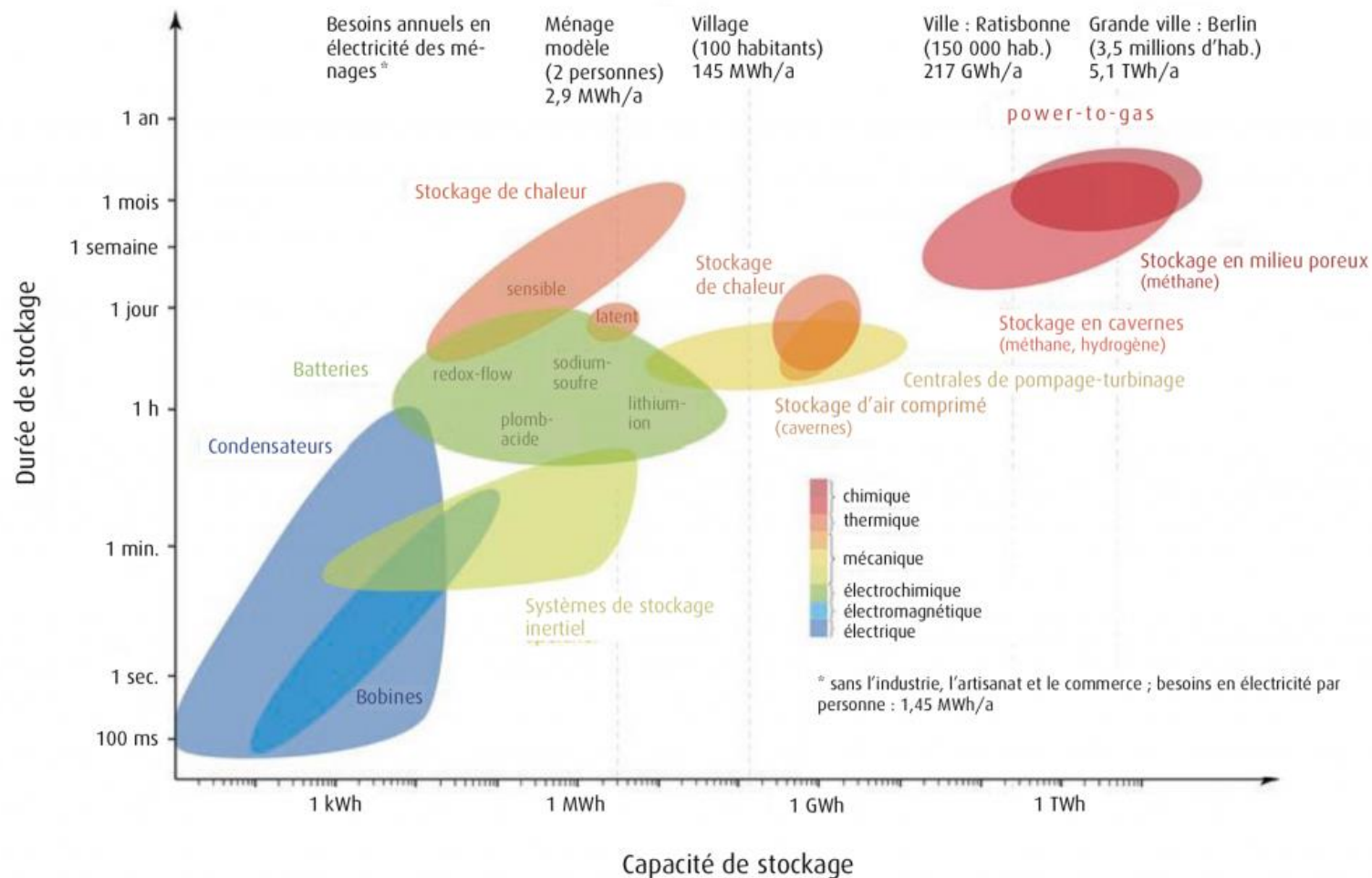


Figure 1 - Comparaison de différentes technologies de stockage, avec phase de décharge en fonction de la capacité de stockage
Source : FENES, Université technique de Ratisbonne²

Transport et distribution



Source : GRTGaz et Terrega, Le rôle des infrastructures de transport et de stockage d'hydrogène : un enjeu de compétitivité industrielle.



Usages de l'hydrogène demain

Usage en matière / réactif pour l'industrie :

- réduction directe du fer (sidérurgie) en substitution du charbon (désoxyder le fer) cf. Arcelor Mittal Dunkerque
- Chimie du méthanol
- Évolution de la production d'engrais ?

Usage en matière / réactif pour les carburants :

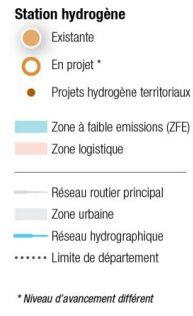
- hydrogénation des huiles (biocarburants),
- *Power-to-liquid* : réaction avec le CO₂ (méthane de synthèse par la méthanation et carburants de synthèse / e-fuels / SAF pour l'aviation)

Usages énergétiques : applications nombreuses mais pas toutes pertinentes, à regarder au cas par cas

- - Transports routiers, ferroviaires, fluviaux, maritimes, aériens
- - *Power-to-gas* : stockage d'hydrogène des EnRi (énergies renouvelables intermittentes)
- approvisionnement électrique hors réseau via des piles à combustibles / groupes électrogènes à hydrogène,
- Chaleur : combustion d'hydrogène pour production électrique thermique, chaleur industrie, chaleur habitat et tertiaire (non prioritaire en France)

PANORAMA DES PROJETS HYDROGÈNE EN ÎLE-DE-FRANCE

Cette carte, non exhaustive, illustre la diversité des projets et le maillage du territoire. Elle met en avant les usages en mobilité (et stations associées) ainsi que les projets de R&D et d'industrialisation en région. Certains des projets sont des expérimentations, d'autres du déploiement de solutions. L'hydrogène étant un secteur particulièrement mouvant, nous invitons les lecteurs à consulter **Vig'Hy, Observatoire national de l'hydrogène**, coordonné par France Hydrogène et à rejoindre le **Club Hydrogène Île-de-France**.



Les projets hydrogène territoriaux

- 1 • H2 Créteil / SIPPÉREC, SIpEnR, Suez (Créteil, 94)**
Production d'hydrogène par électrolyse à partir d'électricité de récupération de l'unité de valorisation énergétique de Créteil et installation d'une station de distribution.
Usages pour des bennes à ordures ménagères, bus ou autres véhicules utilitaires du territoire.
- 2 • Last Mhyle IDF / Akuo Energy, Engie, SIGEIF Mobilités (Île-de-France)**
Déploiement de 17 stations hydrogène (dont certaines avec électrolyseurs) et de flottes de véhicules utilitaires hydrogène sur des zones logistiques en Île-de-France.
- 3 • HySetCo / HYPE, Air Liquide, Toyota, TotalEnergies (Île-de-France)**
Expérimentation puis déploiement d'une centaine de taxis hydrogène avec des premières stations à l'occasion de la COP21. Objectif à court terme de 700 taxis et stations associées de plusieurs centaines de kilos par jour, dont certaines avec production d'hydrogène par électrolyse.
- 4 • FenHYx / GRTgaz (Alfortville, 94)**
Développement d'une plateforme de recherche et d'essai FenHYx sur l'injection d'hydrogène dans le réseau de transport de gaz, opéré par le centre de recherche et d'innovation RICE de GRTgaz.
- 5 • PP6 / NCS Pyrotechnie et technologies (Survilliers, 95)**
Développement et industrialisation d'un nouveau système pyrotechnique de sécurité pour pile à combustible sur le site de Survilliers, soutenu par le Fonds de modernisation automobile et aéronautique.
- 6 • Électrolyseur PEM / Elogen H2 (Les Ulis, 91)**
Industrialisation d'une ligne de fabrication d'électrolyseurs PEM (membrane échangeuse de proton) pour l'industrie et la mobilité, recherche et développement sur la performance énergétique et les matériaux.
- 7 • Expérimentation de bus hydrogène / Île-de-France Mobilités, 3Emotion, CA Versailles Grand Parc, SAVAC, BE Green, Air Liquide (Versailles, Les Loges-en-Josas, 78)**
Expérimentation de 7 bus hydrogène en milieu urbain et périurbain dans le cadre du projet européen 3Emotion par Île-de-France Mobilités avec la Communauté d'agglomération de Versailles Grand Parc et deux transporteurs, Savac et BE Green. Avitaillement en hydrogène sur la station d'Air Liquide aux Loges-en-Josas.

- 8 • AMI H2 Hub Airport / Région IDF, Choise Paris Region, Groupe ADP, Air France, Airbus (Roissy et Orly)**
Lancement en 2021 d'un appel à manifestation d'intérêt international (AMI) par la Région, Choise Paris Region, le Groupe ADP, Air France-KLM et Airbus pour explorer les opportunités offertes par l'hydrogène sur les aéroports franciliens (logistique au sol et perspectives de l'avion hydrogène). Onze lauréats ont été retenus.
- 9 • GEH2 / EODev, Eneria CAT, Loxam Rental (Montlhéry, 91)**
Création sur le site industriel d'Eneria à Montlhéry d'une ligne de production de GEH2, groupes électrogènes à hydrogène d'EODev avec une pile à combustible Toyota. Partenariat avec LOXAM Rental, intégrant le GEH2 dans son offre de location pour les chantiers et l'événementiel en Île-de-France et ailleurs.
- 10 • HyVia / Renault, Plug Power, PVI (groupe Renault) (Flins, Villiers Saint-Frédéric, 78 • Gretz-Armainvilliers, 77)**
Co-entreprise entre le Groupe Renault et Plug Power visant à commercialiser une gamme de véhicules utilitaires hydrogène (Master) et la fourniture de stations et d'hydrogène renouvelable ou bas carbone. Assemblage des équipements dans l'usine Re-Factory de Flins, siège et R&D à Villiers-Saint-Frédéric et savoir-faire d'intégration avec la filiale PVI à Gretz-Armainvilliers.

Non localisable

- FillnDrive (Paris 12^e)**
Développement d'une gamme de produits logiciels répondant aux besoins de l'écosystème hydrogène : supervision des infrastructures de production et de distribution, interopérabilité du service d'identification ou de paiement, supervision de flottes de véhicules.
- H2Ships / EDF, Syctom, CEMEX, HAROPA Port (Paris, Île-de-France, bassin de la Seine)**
Projet européen visant à démontrer la faisabilité technico-économique de l'hydrogène pour la propulsion pour la navigation fluviale, avec expérimentation de bateaux hydrogène sur l'axe Seine et schéma d'avitaillement dans les infrastructures portuaires.
- Soutien de la Région Île-de-France via différents dispositifs (AAP Innovation et structuration de la filière hydrogène, AAP Electricité renouvelable et production d'hydrogène, Aides véhicules propres...) ou l'action d'Île-de-France Mobilités**
- Soutien de l'ADEME via l'AAP écosystèmes de mobilité hydrogène (2019), écosystèmes territoriaux hydrogène (2020, 2021), dispositif Entreprise engagé pour la transition écologique**

PANORAMA DES PROJETS HYDROGÈNE EN ÎLE-DE-FRANCE

Cette carte, non exhaustive, illustre la diversité des projets et le maillage du territoire. Elle met en avant les usages en mobilité (et stations associées) ainsi que les projets de R&D et d'industrialisation en région. Certains des projets sont des expérimentations, d'autres du déploiement de solutions. L'hydrogène étant un secteur particulièrement mouvant, nous invitons les lecteurs à consulter **Vig'Hy, Observatoire national de l'hydrogène**, coordonné par France Hydrogène et à rejoindre le **Club Hydrogène Île-de-France**.

territoires
missions (ZFE)
principal
phique
ment
érent

hydrogène territoriaux

Créteil / SIPPAREC, SUEZ (Créteil, 94)
d'hydrogène par électrolyse à partir
de récupération de l'unité de valorisation
de Créteil et installation d'une station
tion.
ur des bennes à ordures ménagères, bus ou autres
utilitaires du territoire.

Hydrogène IDF / Akuo Energy, Engie, Mobilités (Île-de-France)
nt de 17 stations hydrogène (dont certaines avec électrolyseurs)
s de véhicules utilitaires hydrogène sur des zones logistiques
rance.

Hydrogène Co / HYPE, Air Liquide, Toyota, TotalEnergies
(ce)

station puis déploiement d'une centaine de taxis hydrogène avec
res stations à l'occasion de la COP21. Objectif à court terme
is et stations associées de plusieurs centaines de kilos par jour,
nes avec production d'hydrogène par électrolyse.

Hydrogène Yx / GRTgaz (Alfortville, 94)
ment d'une plateforme de recherche et d'essai FenHYx
on d'hydrogène dans le réseau de transport de gaz, opéré
re de recherche et d'innovation RICE de GRTgaz.



8 • AMI H2 Hub Airport / Région IDF, Choose Paris Region, Groupe ADP, Air France, Airbus (Roissy et Orly)
Lancement en 2021 d'un appel à manifestation d'intérêt international (AMI) par la Région, Choose Paris



Non localisable

FillnDrive (Paris 12^e)
Développement d'une gamme de produits logiciels répondant

0 20 km

© L'INSTITUT PARIS REGION 2021
Source : AREC IdF, France Hydrogène, Région Île-de-France, ADEME Île-de-France



Ecosystème des acteurs des stations

HySetCo

Hype, Air Liquide, Toyota, TotalEnergies, Kouros, Slota

Déploiement de 700 taxis et VTC avec **3 stations** fonctionnels et **dizaine** en projet et véhicules





Last Mhyle

Akuo Energy, Engie, Ataway, SEM SIGEIF Mobilités

Déploiement de flottes de véhicules hydrogène avec **16 stations** et production d'H2 renouvelable







AAP Station H2 Ville d'Issy-les-Moulineaux

Exploitation d'**1 station** de production et distribution d'H2, plateforme de logistique dernier km + usages hydrogène domestique





AMI Vallée Sud Mobilités EPT Vallée Sud Grand Paris, SEM Vallée Sud Mobilités

2 stations H2 en projet
Châtenay-Malabry et Bagneux







Station hydrogène Ville de Paris / IDEX / McPhy

1 station hydrogène pour véhicules utilitaires des services techniques de la Ville de Paris

AMI H2 Hub airport

Groupe ADP, Air France KLM, Airbus, Région IDF, Choose Paris Region
Stockage, transport distribution hydrogène (gaz et liquide, diversification usages H2)











HYVIA Renault Group, Plug Power

Proposition d'écosystèmes clés en main avec le véhicule utilitaire Renault Master et des **stations** de production et distribution d'hydrogène









Développement des infrastructures hydrogène dans les aéroports

Groupe ADP, Airbus, Air Liquide

Approvisionnement en hydrogène liquide (infrastructures, dimensionnement, implantation, sécurité)

Scénarios pour **Roissy CDG** et **Paris Orly**







AAP Stations de distribution d'hydrogène HAROPA Ports

développer une offre énergétique décarbonée et maillée pour mobilité terrestre et fluviale,
5 stations avec emprises foncières : Gennevilliers, Bonneuil-sur-Marne, Limay, Bruyères-sur-Oise, Montereau









AviCAFE (VNF, HAROPA Ports, GRT Gaz, Banque des Territoires)

Convention de partenariat pour faire émerger une offre d'avitaillement en carburants alternatifs dans la Vallée de Seine (gaz naturel, hydrogène, électricité, carburants de synthèse)

H2 Créteil

SIPPEREC, SIPENR, SUEZ, PowiDian

Production d'H2 à partir d'électricité de récupération sur l'UVE de Créteil,
1 station de distribution, usages BOM, bus, logistique







Olympic Energy / Station multi énergies Réau SEM SIGEIF Mobilités, EPA Marne, GnVert

1 station GNV / BioGNV, à terme hydrogène







Station multi énergies Rungis Engie / GnVert

1 station hydrogène + flotte véhicules utilitaires



Expérimentation de 7 bus hydrogène à Versailles (78) dans le cadre du projet européen 3Emotion par IDF Mobilités, BE Green, SAVAC, CA Versailles Grand Parc
© Île-de-France Mobilités



Déploiement de 50 Kangoo ZE H2 et station hydrogène sur le MIN de Rungis par Engie Cofely et GnVert (filiale d'Engie)
© Marthe Lemelle/Marché International de Rungis



H2 Créteil, écosystème territorial hydrogène avec production d'hydrogène (500 kg – 1 T par jour), station et usages bus et BOM
© Jérôme Baudoin/ SUEZ



Station hydrogène Hysetco sur le dépôt taxi de Slota à Porte de la Chapelle
© Hysetco



Inauguration du site industriel d'Hyvia sur Re-Factory Renault à Flins (78), assemblage de piles à combustibles et stations H2 pour véhicules utilitaires Master H2

© Hyvia



Ligne de production de stack d'électrolyseur PEM aux Ulis (91) – 160 MW / year

© Elogen



Expérimentation du groupe électrogène GEH2 pour un chantier CPCU et Ville de Paris

© EODev



Plateforme de recherche FenHYx, sur l'injection d'hydrogène dans les réseaux gaz à Alfortville (94)

© RICE GRTgaz / DP-JE



Chantier de la plus grosse station de production / distribution d'hydrogène (1 tonne / jour) à Porte de St-Cloud (Paris, 75)

© L'Institut Paris Region



Expérimentation prochaine de deux poids lourds : tracteur 44 tonnes et porteur 26 tonnes avec son plateau grue, fourniture d'hydrogène « supergreen » d'Hyliko (procédé Haffner Energies via thermolyse de biomasse)

© Point P & Hyliko



Test de la berline haut de gamme Hopium sur le centre d'essai de Montlhéry (centre R&D de la société)

© Hopium



Mise à l'eau de la future barge à hydrogène commandée par CFT (Sogestran) dans le cadre du projet européen Flagships H2020

© Pirou



Démonstration de vélos triporteur à hydrogène à Issy-les-Moulineaux dans le cadre du projet européen FCCP Fuel Cell Cargo Pedelects (bientôt sur la ZAE de Courtaboeuf aux Ulis)

© Thomas Hemmerdinger

Quel développement industriel de la filière en IDF ?



HYVIA

Développement de VUL hybride H2
Piles à combustibles
Stations
Electrolyseurs PEM
Flins (Re-Factory)/ Villiers St Frédéric / Gretz
Armainvilliers

De nombreuses start-up et
PME-PMI :

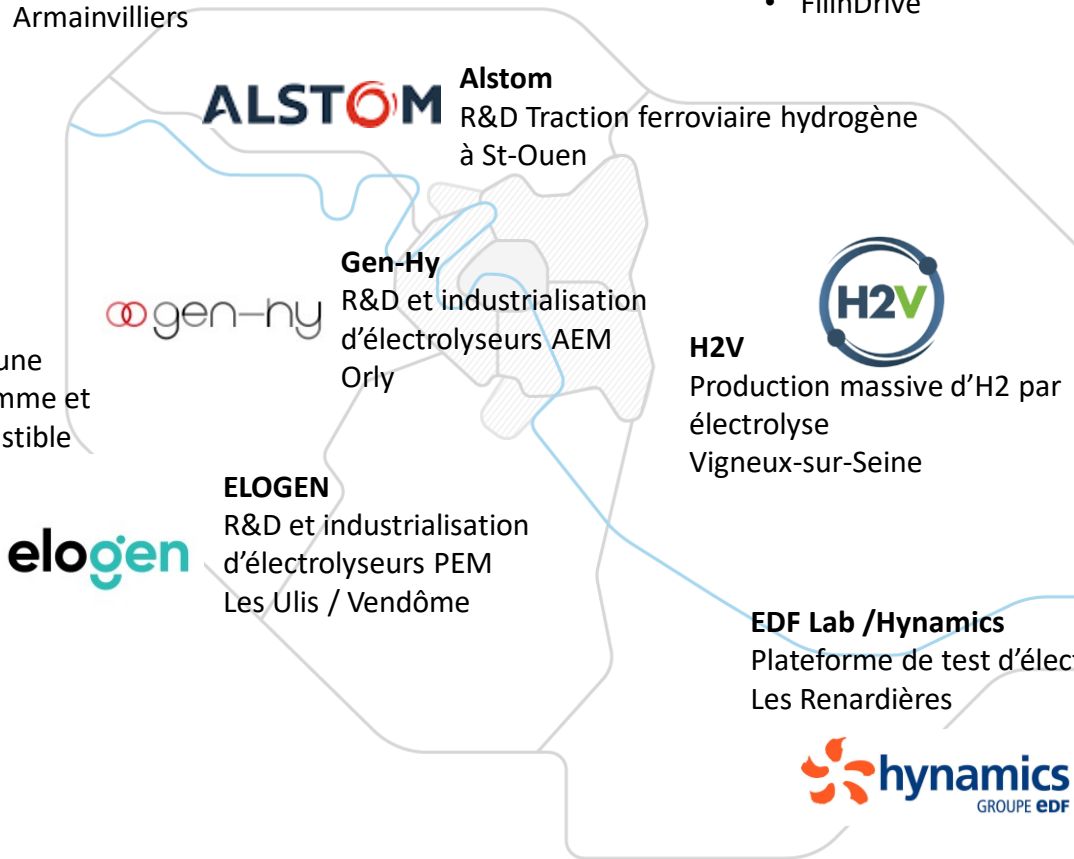
- TinHy
- GreenHy
- Arhyze
- ZenT
- FillnDrive

- Bluespirit Aero
- Eneralys
- EODev
- GH2
- GreenGT
- Hysetco
- Verso Energie



Hopium

Développement d'une
berline haut de gamme et
d'une pile à combustible
Paris /Montlhéry





AREC
AGENCE RÉGIONALE
ÉNERGIE-CLIMAT



À initiative de la Région Île-de-France (délibération Île-de-France territoire hydrogène du 22 novembre 2019) dans le cadre de la stratégie régionale énergie climat et de la stratégie nationale hydrogène du Plan de relance. Le Club Hydrogène Île-de-France regroupe la Région Île-de-France, l'ADEME Île-de-France, la DRIAT Île-de-France et France Hydrogène (ex. Afhypac) et l'AREC ÎdF qui le coordonne.

Le Club a été lancé le 6 juillet 2020.



Fédérer

favoriser l'émergence d'une filière régionale en mettant en lien l'ensemble des acteurs économiques, institutionnels et les collectivités



Accélérer

accélérer le déploiement de projets hydrogène sur le territoire



Sensibiliser

acculturer les collectivités territoriales et les acteurs franciliens en partageant les enjeux et solutions

Que faisons-nous ?

Relation avec
les structures
d'appui

Conférences
et ateliers

Visites de
site
(un jour...)

Visibilité des
projets

Retours
d'expérience

Plateforme
collaborative

Communica
tion

Thématiques



Mobilités terrestres

#Taxis / VTC
#BOM
#Bus
#logistique



Mobilités fluviales

#logistique
#tourisme
#ports
#retrofit



Stations H₂

#Maillage
#Interopérabilité
#Accès au public
#Approvisionnement



Production d'hydrogène renouvelable

#technologies
#Gisements EnRR
#traçabilité



Ecosystèmes territoriaux

#coopération
#acceptabilité
#mutualisation
#partenariats

Club Hydrogène Île-de-France

Agenda 2022



Réseau ACTIFS



17/02 : [Techmeeting « Accelerating Hydrogen »](#) / Choose Paris Region

18/02 : [Master class « Les perspectives de la mobilité hydrogène en Île-de-France »](#)

24/03 : [Déploiement de l'hydrogène en Île-de-France : le point sur les financements et la réglementation](#)

24/03 : atelier hydrogène du réseau ACTIFS (agences locales de l'énergie et du climat)

11 et 12/05 : [Salon HyVolution 2022](#) – stand Île-de-France

x/06 : atelier sur les écosystèmes territoriaux H₂

x/09 : atelier sur la logistique fluviale H₂

4/10 : Formation [« Sensibiliser aux enjeux de l'hydrogène en Île-de-France »](#)

18/10 : Séminaire hydrogène avec la Communauté départementale de la transition énergétique de Seine-et-Marne

x/11 : atelier sur les applications énergétiques locales (groupes électrogènes, smart grid...)

MERCI



**Thomas
Hemmerdinger**

Thomas.hemmerdinger
@institutparisregion.fr

[La page du Club Hydrogène Île-de-France](#) sur le site de l'AREC ÎdF

[La page LinkedIn du Club](#) (1360 abonnés)

[La communauté teams du Club](#) (170 membres)