

FRANCE-HYDROGENE, QUELLE STRATEGIE ?

Comment la France peut-elle mener une stratégie efficace de développement de l'hydrogène ?

Charlotte PILLARD POUGET

Charles-Henri CHEVREAU

Cédric VENEAU-MONTCHANIN

Adrien BELLENGER

MSIE41 de l'EGE

Table des matières

AVANT-PROPOS	2
I. SCENARIO DE CRISE « FICTIF ».....	3
II. ETAT DES LIEUX DU SECTEUR ENERGETIQUE EN FRANCE.....	6
1. Composition de la consommation française en énergie.....	6
2. L'Hydrogène	9
a) Les procédés de production de dihydrogène.....	9
b) Quelques chiffres clefs au sujet de l'hydrogène dans le monde et en France.....	10
c) Utilisations de l'hydrogène	12
III. LA FRANCE A-T-ELLE UNE STRATEGIE HYDROGENE PERTINENTE ?	15
1. Stratégie française sur l'Hydrogène.....	15
a) Stratégie affichée par le gouvernement	15
b) Au croisement des transitions énergétique et industrielle se trouve l'Hydrogène	17
c) La stratégie française de valoriser l'hydrogène bas-carbone	19
2. Stratégies des autres pays sur l'hydrogène	21
3. Anticipation et vision critique	24
a) Œil critique sur stratégie française affichée	24
b) L'hydrogène : attention au greenwashing	26
c) L'efficacité énergétique et la sobriété énergétique dans le secteur industriel.....	29
CONCLUSION	30
EXECUTIVE SUMMARY	32
ANNEXES.....	33
1. Principaux polymères dérivés du pétrole	33



I. SCENARIO DE CRISE « FICTIF »

Un Scénario de crise globale qui frappe une France seule au premier rang de l'UE

Janvier 2030, Une « méga crise » globale est déclenchée. Conjugaison du découplément de l'Economie mondiale (à l'arrivée généralisée de la 5G en 2023 et de l'opposition commerciale délétère Chine/Etats-Unis qui s'en est suivie), de l'enchaînement de pandémies COVID (variants résilients sur toute la décennie 2020) et d'épisodes climatiques critiques (sécheresses majeures en Afrique et Moyen-Orient et vagues de froid extrême dans l'hémisphère Nord), cette crise est d'un ordre nouveau.

En France, la période de tension sociale inédite de la rentrée 2029 s'est révélée annonciatrice de l'impasse du pays à faire face à un bouleversement global. Les fragilités énergétiques régulières depuis le début des années 2020 n'avaient finalement que préparé le terrain pour une crise d'ampleur mondiale. Les Etats doivent y faire face sur fond de reconstruction d'une Europe de l'Est ravagée par 10 années de guerre russo-ukrainienne. En ce début d'hiver 2029, les prix du pétrole sont multipliés par 10, ceux du gaz par 15 et les stocks stratégiques n'ont plus été reconstitués en France depuis 2025. Le pays est à l'arrêt. Les actifs énergétiques présents sur le territoire sont réquisitionnés pour les Armées, l'Intérieur et la Santé.

Une crise d'un genre nouveau

C'est ainsi sous l'effet de ces facteurs concomitants et en particulier l'enchaînement de pandémies de manière ininterrompue depuis la crise du COVID 19 en 2020 que l'économie mondiale fait face à un choc d'une telle ampleur.

Une bombe dépressionnaire comparable à la méga tempête de 2022 au Nord des Etats-Unis fait rage dans l'hémisphère Nord. Les stations météorologiques enregistrent des températures allant jusqu'à -50°C à Washington, -43°C à Pékin et Tokyo et -26°C à Paris. Les prix du pétrole et du gaz atteignent logiquement un niveau record. Les stocks stratégiques américains, chinois et européens sont largement entamés. Les marchés assistent à une véritable ruée vers les matières premières fossiles, malheureusement seules encore capables d'apporter une réponse efficace au besoin énergétiques primaires des populations (chauffage, transport).

Mécanisme comparable au premières proto-crisis des années 2020 (on se souvient de la crise de l'énergie de l'hiver 2022), cette flambée mondiale des prix de l'énergie force la quasi-totalité des entreprises (PME mais aussi grands Groupes internationaux) et leurs usines de production à l'interruption de toute activité. L'économie monde, encore portée par ses trois marchés dominants : façade maritime Asiatique, Amérique du Nord et Europe de l'Ouest est gelée.

D'autres facteurs secondaires viennent saper davantage la situation stratégique des Etats. Des organisations transnationales (revendiquées de la *Hack-Nation*) spécialisées dans la cyberpiraterie et apparues en 2025, se structurent depuis le milieu de la décennie. Ces acteurs motivés par des idéologies écologistes libertaires jouent une partition indépendante des nations. Ces collectifs radicaux n'hésitent pas à capter par rançonnement et attaques sur le champ immatériel des valeurs financières très importantes et viennent apporter la preuve de la fragilité profonde des structures étatiques.

Une défaite du modèle libéral européen face à la résilience protectionniste américaine

En ce début d'année 2030 et alors que le pays est plongé par intermittence dans des coupures énergétiques de délestage des réseaux, le *global collapse* est observable dans tous les champs de conflictualité économique et en particulier les secteurs clés de la Finance et de l'Energie. Les vieilles nations d'Europe de l'Ouest sont en proie à une récession économique intimement liée à une incapacité des pouvoirs publics à investir et à sécuriser les approvisionnements énergétiques et stratégiques de ses Organismes d'Intérêt Vital (matières radioactives et métaux rares). Les Etats anglo-saxons, quant à eux, et symboliquement un Royaume-Uni renaissant de la crise du BREXIT des années 2020, s'organisent, sous l'aile américaine, pour capter à prix d'or les derniers flux énergétiques et stratégiques issus d'Asie et d'Afrique (essentiellement les énergies fossiles du Moyen Orient et des côtes africaines). La quasi-totalité des flux maritimes énergétiques de surface (tankers) sont ainsi détournés vers l'Amérique du Nord. On assiste à la même prédation concernant les flux terrestres et sous-marins (oléoduc et gazoduc).

Analyse sommaire d'une crise

Cette crise énergétique globale demeure bien différente du choc pétrolier de 1970 en cela qu'elle concerne non seulement le pétrole mais bien toutes les énergies fossiles et en particulier le gaz dont nos marchés sont devenus bien plus dépendants au tournant des années 2000. Les leçons de 2022-2023 et 2027 n'auront ainsi pas été retenues.

Alors que la réponse anglo-saxonne à cette crise s'organise autour d'un pragmatisme protectionniste et d'un axe Etats-Unis/Royaume-Uni/Australie, la Russie se tourne résolument vers l'Est et une Chine devenue leader économique mondial. Dans cette logique de réouverture des Routes de la Soie, l'Union Européenne (avec laquelle la Chine a coupé ses relations économiques en 2028 suite à des sanctions de l'UE face à des violations des Droits de l'Homme dans plusieurs provinces chinoises) ne peut compter que sur elle-même.

Ce scénario est une fiction, et nous n'avons pas la prétention de faire des projections dans le futur. Néanmoins, notre société a dès aujourd'hui de bonnes raisons d'essayer si ce n'est d'aspirer à la réduction de la consommation d'énergies fossiles, limitées par des facteurs physiques, économiques, géopolitiques et écologiques.

Le rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) invite l'ensemble des pays à abaisser les émissions globales de 45% dès 2030 par rapport à 2010, et à atteindre la neutralité carbone en 2050... Les risques liés au réchauffement et dérèglement climatiques sont extrêmes : canicules, sécheresses et pluies torrentielles, montée du niveau de la mer, perte de biodiversité... avec des conséquences prévisibles de flux migratoires, famines, guerres...

Les Etats membres de l'Union Européennes ont tous ratifié les accords de Paris de la COP21, et s'engagent à maintenir le réchauffement climatique en dessous des 2 degré Celsius en plus du niveau préindustriel et à poursuivre leurs efforts pour limiter à +1.5 degré. La commission européenne a ratifié un paquet de 12 propositions législatives, actions concrètes appelées « Fit for 55 » pour accélérer la lutte contre le changement climatique, atteindre la neutralité climatique en 2050 et tenir l'objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre de 55% au moins en 2030 par rapport à 1990.

Cette transition énergétique va transformer la manière dont nous consommons, distribuons et stockons l'énergie. Cela nécessite l'augmentation de l'efficacité énergétique, des efforts de sobriété, et la décarbonisation des transports, de l'industrie et du secteur du bâtiment.

L'hydrogène pourrait-il faire partie de la solution ? Ce nouveau vecteur de l'énergie fait-il partie de la stratégie française ? Quelles sont les stratégies des autres pays ? Et enfin, quels écueils faut-il éviter ?

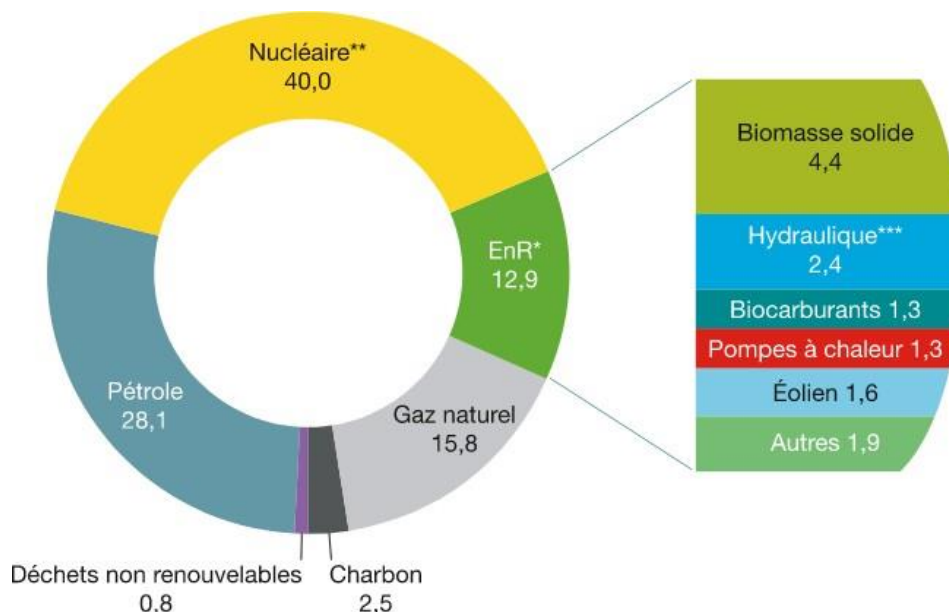
II. ETAT DES LIEUX DU SECTEUR ENERGETIQUE EN FRANCE

Pour mieux cerner le sujet de l'énergie, penchons-nous sur la composition de la consommation Française en énergie primaire.

Ensuite, nous pourrions aborder les atouts de la molécule de dihydrogène, et les stratégies qui lui tournent autour.

1. Composition de la consommation française en énergie

Selon les chiffres clefs du Ministère de la transition écologique, en 2020, la consommation globale d'énergie primaire en France était de 2 571 TWh. Ce montant est brut, avant déductions des pertes liées à la transformation, le transport et la distribution.



Le nucléaire et les énergies renouvelables, représentent respectivement 40% et 12.9% de la consommation totale alors que les énergies fossiles constituent près de 44 % (28.1% pour le pétrole et 15.8% pour la gaz).

L'énergie nucléaire est la première énergie bas-carbone en France. Elle a de nombreux atouts, donc celui d'être pilotable, c'est-à-dire de pouvoir être produite quand on veut. C'est également une énergie extrêmement concentrée puisque 7g d'uranium enrichi contient autant d'énergie qu'une tonne de charbon. Par ailleurs, l'uranium est un métal relativement abondant. Son prix compte peu dans le coût de l'électricité nucléaire. Il représente environ 5% du prix du mégawattheure d'énergie nucléaire. En outre, il est possible de constituer des stocks stratégiques importants d'uranium sur le territoire. En France, nos stocks stratégiques d'uranium pourraient assurer plus d'une dizaine d'années d'utilisation.

L'énergie nucléaire est incontestablement une partie de notre solution, permettant à la fois l'indépendance énergétique de la France, et constituant une énergie bas-carbone. La France doit entretenir ses compétences dans ce domaine, et former les techniciens et ingénieurs de demain dans ce secteur.

La France n'est pas un pays producteur ni de pétrole, ni de gaz : nous importons la quasi-totalité de ces 2 énergies fossiles consommées sur le territoire.

Quant au charbon, la Russie et l'Australie fournissent à elles seules presque 60% des importations annuelles de charbon de la France (avec une fourniture annuelle d'environ 4 Mt provenant de chaque pays). Les principaux autres pays d'origine du charbon importé en France sont les États-Unis (1,9 Mt en 2018), la Colombie (1,5 Mt), l'Afrique du Sud (0,8 Mt) et l'Allemagne (0,25 Mt).

Tableau récapitulatif situation 2020 (gauche et centre) et situation sans hydrocarbure (droite).

consommation globale d'énergie en TWh en France	énergie primaire (2020)		consommation 2020 finale après pertes et usages internes du système énergétique		% disponibles sans hydrocarbure (vs 2020) / TWH disponibles consommation finale	
	%		%			
consommation d'énergie en France	100%	2 571	100%	1 633	38%	622
Nucléaire	40%	1 028	21%	343	100%	343
EnR (biomasse solide, hydraulique, biocarburants, pompe à chaleur, éolien, autres)	13%	332	13%	211	100%	211
pétrole	28%	722	42%	680	0%	-
gaz naturel	16%	406	20%	325	0%	-
charbon	3%	64	1%	12	50%	6
déchets non renouvelables	1%	21	1%	21	100%	21
chaleur commercialisée			3%	41	100%	41

Notons ici que ce tableau montre la consommation primaire à gauche. Or, une partie est perdue lors de la transformation, du transport, des usages internes du système énergétique.

Le montant nucléaire de 1028 TWh est comptabilisé pour la chaleur produite par la réaction, chaleur dont les deux tiers sont perdus lors de la conversion en énergie électrique. Au final, seul 1/3 soit 343 TWh sont disponibles pour le consommateur final en 2020. Les 2/3 de pertes calorifiques sont perdues dans la configuration actuelle, mais représentent un potentiel de chauffage en remplacement du gaz par exemple.

Les colonnes centrales montrent la consommation finale, c'est-à-dire les TWh consommées en 2020 en France. 62% proviennent du pétrole et du gaz. Réduire notre consommation en énergies fossiles revient à un sevrage drastique puisqu'il nous reste à disposition 38% (622TWh) sans elles.

Pour information, lors des scénarios de modélisation publiée fin 2021, RTE retient la référence d'un niveau de consommation toutes énergies confondues abaissée à 1100 TWh en 2050 soit -30% par rapport à 2019, année de référence RTE, et de consommation d'électricité de 645 TWh au même horizon de temps, soit une hausse de quelque 35% par rapport à l'époque actuelle (consommation intérieure française de 475 TWh en 2019). Cela suppose une électrification "progressive" des usages et une ambition forte sur l'efficacité énergétique et la sobriété.

Avant d'analyser le potentiel de l'hydrogène en remplacement des énergies fossiles, regardons de plus près les usages des hydrocarbures en France.

Selon l'INSEE (Institut national de la statistique et des études économiques), en 2021, la consommation intérieure de la France en produit pétrolier s'élève à 67,2 millions de tonnes.

Le pétrole est utilisé en majorité pour le transport (voitures, camions, avions, bus, car).

Le pétrole est aussi une matière première pour l'industrie de la pétrochimie pour un grand nombre de produits de la vie quotidienne : matières plastiques, peintures, colorants, cosmétiques, etc (voir liste des polymères, produits dérivés du pétrole, en annexe). L'hydrogène semble être la solution quasi idéale pour remplacer les hydrocarbures dans l'industrie.

Le gaz (fioul domestique) est encore souvent utilisé en France au niveau domestique pour le chauffage et la cuisson.

Source :

www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energie-2021/6-bilan-energetique-de-la-france

2. L'Hydrogène

a) Les procédés de production de dihydrogène

L'hydrogène, ou plutôt le dihydrogène, n'est pas une source primaire d'énergie car elle doit être produite par un procédé industriel.

L'hydrogène est un élément chimique associé dans la nature à d'autres éléments :

- Associé à du carbone dans le méthane (CH₄)
- Associé à de l'oxygène dans l'eau (H₂O).

Pour obtenir de l'hydrogène ou plus exactement la molécule de dihydrogène (H₂), il convient donc de le séparer des éléments chimiques auxquels il est lié.

Petit récapitulatif des différents procédés de production du dihydrogène (H₂) :

Type H2	méthode	intrants	extrants coproduits avec le H2	émission de gaz à effet de serre
GRIS	vaporeformage du méthane. En présence de vapeur d'eau et de chaleur, les atomes carbonés (C) du méthane (CH ₄) se dissocient. Après deux réactions successives, ils se reforment séparément pour obtenir, d'un côté, du dihydrogène (H ₂) et, de l'autre, du dioxyde de carbone (CO ₂)	méthane CH ₄	CO ₂ dioxyde de carbone	oui
variante de GRIS	Oxydation partielle du pétrole assez similaire au vaporéformage de méthane mais avec utilisation d'oxygène ou d'air à la place de l'eau. La réaction est : 2 CH ₄ + O ₂ => 2 CO + 4 H ₂	CH ₄ et O ₂	CO monoxyde de carbone	oui
BRUN ou NOIR	hydrogène brun, produit par gazéification de lignite. Ce traitement thermique sous pression crée un gaz de synthèse (syngas), qui est un mélange de monoxyde de carbone, d'hydrogène, de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone. Par vaporéformage, ou vapocraquage, on extrait du dihydrogène de ce syngas. L'hydrogène noir est produit à partir de charbon. De ce procédé sort d'une part du dihydrogène (H ₂) et, de l'autre, du monoxyde de carbone (CO).	méthane CH ₄	CO monoxyde de carbone	oui
BLEU	produit par vaporéformage du méthane, comme pour le gris, mais avec en plus du captage et un stockage du CO ₂ .	méthane CH ₄	CO ₂ capté ensuite	non car CO ₂ capté
TURQUOISE	produit à partir de méthane fossile comme le gris mais par pyrolyse et avec un système de captage de CO ₂ solide.	méthane CH ₄	CO ₂ capté ensuite	non car CO ₂ capté
JAUNE/ROSE	produit par électrolyse de l'eau à partir d'électricité d'origine nucléaire	H ₂ O eau	O ₂ oxygène	non car nucléaire est une énergie décarbonnée
VERT	produit par un procédé d'électrolyse de l'eau à partir d'énergies renouvelables	H ₂ O eau	O ₂ oxygène	non

Code couleur pour les intrants : énergies fossiles

Code couleur pour les émissions de gaz à effet de serre : pas d'émission de gaz à effet de serre

L'hydrogène gris, brun ou noir sont produits à partir d'énergie fossile et émettent des gaz à effet de serre.

Le bleu ou turquoise sont également produits à partir de méthane mais avec captage de CO2 en fin de procédé pour réduire l'impact sur l'environnement.

Le jaune et le vert sont les hydrogènes produits par hydrolyse de l'eau par énergies nucléaire ou renouvelables donc sans recours aux énergies fossiles, ce qui constitue pour la France, le double avantage de ne pas accroître sa dépendance aux fournisseurs étrangers d'hydrocarbure d'une part, et de contribuer à la transition écologique du pays. Le développement par l'investissement de cette filière jaune/verte représente également l'atout de développer les emplois en France, dans un secteur en pleine croissance.

b) Quelques chiffres clefs au sujet de l'hydrogène dans le monde et en France

Dans le monde, 99 % est produit à partir d'énergies fossiles avec émission de gaz à effet de serre (gris, brun, noir). Cette proportion est d'environ 94% en France, avec l'émission de 11,5 Mt de CO2, soit environ 3 % des émissions nationales.

On estime le marché mondial à 80 millions de tonnes annuelles environ. C'est entre 1 à 2% de la consommation globale d'énergie. Selon l'agence internationale pour l'énergie AIE, cette part devrait s'élever jusqu'à 13% en 2050 soit une production 10 fois supérieure par rapport à aujourd'hui.

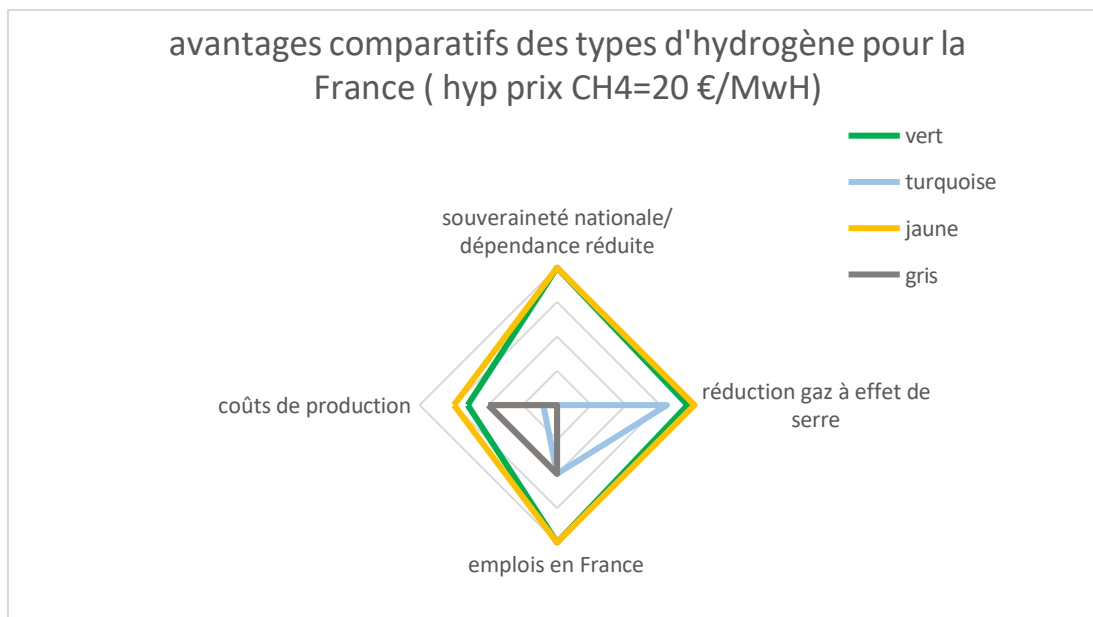
Selon le Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique, la France consomme environ un million de tonnes de dihydrogène, pour une production industrielle de 900 000 tonnes.

La France a donc multiples raisons d'investir dans ce secteur :

- Développer les emplois industriels en France
- Accroître sa souveraineté et amoindrir sa dépendance
- Bénéficier d'une balance commerciale positive dans ce secteur

Pour aller plus loin, comparons maintenant, de manière assez simplifiée les types d'hydrogène gris (à partir d'hydrocarbures), jaune (électrolyse avec énergie nucléaire) et vert (électrolyse avec énergies renouvelables) sur les 4 axes principaux suivants primordiaux pour la France :

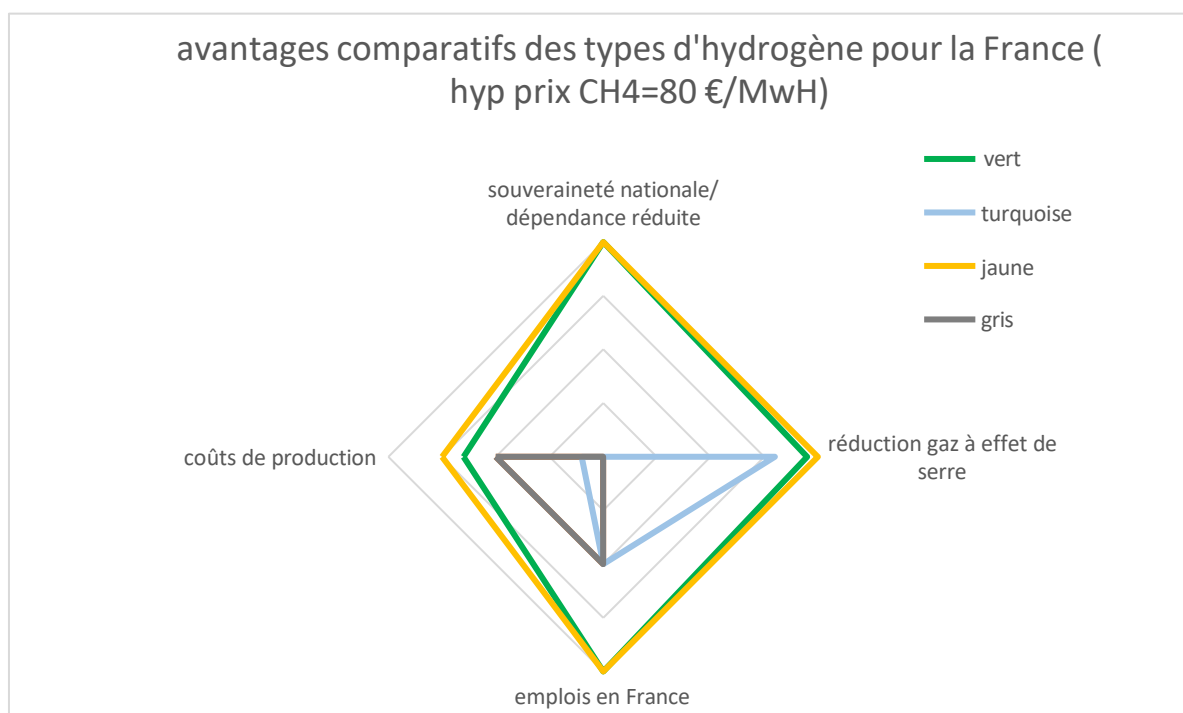
- Souveraineté nationale : dépendance réduite lorsque le point est placé loin du centre du graphique
- Gaz à effet de serre : réduction maximisée lorsque le point est placé loin du centre du graphique
- Emplois en France : création d'emplois sur le sol français lorsque le point est placé loin du centre du graphique
- Coûts de production : coûts plus faibles et donc rentabilité plus forte lorsque le point est placé loin du centre du graphique



L'hydrogène gris est le plus rentable (environ 1.75€/kg de H2 avec l'hypothèse du prix de méthane à 20€/MwH) mais est relativement moins intéressant sur tous les autres axes.

A contrario, l'hydrogène vert (coûts de production estimé aujourd'hui à 4.6 €/kg) et l'hydrogène jaune (coûts de production estimé aujourd'hui à 4.6 €/kg) marquent des points sur les axes de souveraineté, emplois et décarbonation de l'économie, avec un effort de rentabilité à construire.

Mais, avec un coût du méthane en forte augmentation, l'avantage comparatif du coût de l'hydrogène gris, n'est plus. A 80€/MwH de méthane, le coût de production de l'hydrogène gris augmente de 1.75€/kg à 4.75€/kg en moyenne, soit légèrement plus que l'hydrogène vert ou jaune. Ce qui modifie notre analyse comparative pour montrer des hydrogènes vert et jaune plus compétitifs sur tous les axes :



Dans le contexte français de dépendance quasi-totale aux importations en énergies fossiles (la France ne produit que 1% de sa consommation en hydrocarbure), il est certainement stratégique pour la France de développer la filière hydrogène par électrolyse, qu'elle soit jaune avec le nucléaire ou verte avec l'éolien, le solaire ou l'hydraulique.

Source :

Coûts de production analysés par François Henimann pour technica magazine,

État des lieux et enjeux de l'hydrogène bas-carbone en France (technica-magazine.fr)

c) Utilisations de l'hydrogène

Aujourd'hui, dans l'Hexagone, l'hydrogène a trois utilisations principales : la désulfuration de carburants pétroliers pour 60 %, la synthèse d'ammoniac (engrais) et la chimie. Par ailleurs, depuis quelques années, le secteur sidérurgique étudie l'opportunité de remplacer le coke par de l'hydrogène, pour réduire ses émissions de gaz à effet de serre.

- Désulfuration de carburants pétroliers :

L'hydrogène sert à réduire la teneur en soufre des hydrocarbures. Cela permet de réduire les émissions d'oxyde de soufre sortant du moteur brûlant le carburant d'origine fossile. Ces émissions d'oxyde de soufre sont responsables des pluies acides.

Nous ne nous étendrons pas sur cette utilisation de l'hydrogène dans le cadre de notre scénario de crise de pénurie d'hydrocarbure. En effet, dans le cas de la désulfuration, l'hydrogène n'est pas un substitue aux hydrocarbures mais un intrant additionnel aux hydrocarbures. En cas d'arrêt d'importation d'hydrocarbure, il est fort probable que l'activité de désulfuration sera très vite arrêtée.

- Synthèse d'ammoniac pour les engrais.

La synthèse d'ammoniac est la production d'ammoniac à partir de la combinaison d'hydrogène et d'azote gazeux (procédé Haber Bosch). La stratégie de base pour fabriquer de l'ammoniac, NH_3 , consiste à combiner de l'hydrogène gazeux, H_2 , avec de l'azote gazeux, N_2 , à haute température et sous haute pression. Pour accompagner cette réaction chimique, le catalyseur le plus utilisé est généralement le fer.

Deux sources principales pour obtenir l'intrant H_2 nécessaire :

- Vaporefermage du méthane CH_4 , ce qui donne de l'hydrogène gris.

- Electrolyse de l'eau, avec l'énergie nucléaire (hydrogène jaune) ou avec les EnR (Hydrogène vert). C'est cette deuxième solution qui est aujourd'hui encouragée, pour décarboner notre économie et augmenter notre souveraineté.

- Chimie

Certains secteurs industriels utilisent l'ammoniac dans la composition de plastiques.

- La sidérurgie- nouvelle application de l'hydrogène qui devrait voir le jour en 2027-28 en France

La sidérurgie pourrait ainsi utiliser de l'hydrogène à la place de la coke (produit à partir du charbon) pour produire de l'acier. En France, des projets très avancés sont en cours chez [ArcelorMittal](#).

La production d'acier est une industrie en plein essor : selon la world steel association (2020), la production mondiale d'acier est passé de 1435 millions de tonnes en 2010 à 1875 en 2019 (+30%).

Par ailleurs, la sidérurgie représente environ 8% des émissions mondiales de gaz à effets de serre.

L'introduction de l'hydrogène à la place du charbon dans la sidérurgie permettrait de ne plus être dépendant de l'importation de charbon et de réduire drastiquement nos émissions de CO₂.

Aujourd'hui, les deux principales façons de produire l'acier sont en partant de minerai de fer pour 1/3 de la production européenne ou d'acier recyclé pour les 2/3 de la production en Europe.

Pour la première méthode partant du minerai de fer, nous distinguons 2 techniques différentes de production.

- Les hauts fourneaux (*Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace*, BF-BOF)

Le minerai de fer à l'état naturel est sous forme d'oxyde de fer (hématite), dont il faut extraire l'oxygène : ce qu'on appelle la « réduction » (c'est l'inverse de l'oxydation).

Initialement, on utilisait du charbon de bois comme réducteur. Depuis le début du XVIIIe siècle, les hauts fourneaux sont approvisionnés en dérivé de la houille : le coke. Le coke sert de combustible et de matière première à la fois. Sa combustion ($C + O_2 \rightarrow CO_2$) est très exothermique (401,67 kJ/mol). C'est son carbone qui va réduire l'oxyde de fer pour produire de la fonte. Ensuite, on injecte de l'oxygène, qui va oxyder le carbone et repartir sous forme de gaz (CO₂).

- La réduction directe (*Direct Reduced Iron – Electric Arc Furnace*, DRI-EAF)

Il s'agit cette fois de réduire le minerai à l'aide de gaz naturel, de charbon et/ou d'hydrogène. Les procédés au charbon fonctionnent par gazéification : ils libèrent un syngaz (principalement CO et H₂). Le procédé Midrex utilise du méthane pour faire une sorte de vaporéformage, produisant deux gaz fortement réducteurs : le CO et l'H₂.

On aboutit à un minerai pré-réduit (DRI, *Direct Reduced Iron*), qui est ensuite fondu dans un four à arc électrique.

L'introduction de l'hydrogène à la place d'énergie fossile dans la production d'acier par la méthode de réduction directe est la technique envisagée et pressentie pour l'avenir de la sidérurgie française.

L'hydrogène est un gaz réducteur : il se combine avec l'oxygène pour former de l'eau (H₂ + O = H₂O). La réduction du minerai de fer par l'hydrogène à la place du coke n'émet que de l'eau (H₂O) et non du dioxyde de carbone (CO₂).

Sources :

[Production d'hydrogène — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#)

[900 000 tonnes d'hydrogène produites en France chaque année \(monquotidienautrement.com\)](#)

[Tout savoir sur l'hydrogène | IFPEN \(ifpenergiesnouvelles.fr\)](#)

[L'hydrogène pour décarboner la production d'acier \(discoverthegreentech.com\)](#)

[Fabriquer l'hydrogène : fabrication et production | Planète Énergies \(planete-energies.com\)](#)

<https://www.cairn.info/revue-realites-industrielles-2022-4-page-77.htm>

III. LA FRANCE A-T-ELLE UNE STRATEGIE HYDROGENE PERTINENTE ?

1. Stratégie française sur l'Hydrogène

a) Stratégie affichée par le gouvernement

La France est l'un des premiers pays industrialisés à s'être doté d'un plan hydrogène dès 2018 puis d'une stratégie nationale en 2020, réaffirmée par la Première ministre dans le cadre de France 2030, avec des investissements massifs dans la structuration de la filière. Selon le gouvernement, la France se donne les moyens, à hauteur de neuf milliards d'euros de créer une filière compétitive d'hydrogène renouvelable et bas carbone, et de devenir un des leaders mondiaux de l'hydrogène décarboné par électrolyse.

Dans le dossier de presse du 8 septembre 2020, le gouvernement français, alors représenté par Barbara Pompili, ministre de la Transition écologique et Bruno Le Maire, ministre de l'Economie, des Finances et de la Relance, annonçait déjà haut et fort que l'hydrogène décarboné était une priorité pour la souveraineté énergétique et industrielle de la France.

La stratégie pour le développement de l'hydrogène décarboné constitue un axe prioritaire d'investissement pour la France, compte tenu des enjeux environnementaux, économiques et enjeux de souveraineté énergétique : réduire notre dépendance vis-à-vis des importations d'hydrocarbures et regagner notre indépendance technologique en valorisant les atouts dont dispose la France.

En 2023, le gouvernement français est fier de présenter une part de l'hydrogène vert dans sa production globale plus forte que la moyenne mondiale : 6% en France contre 1% dans le monde.

La France serait dans le trio de tête de l'hydrogène au niveau mondial, en termes de brevets, de R&D et d'équipementiers.

La stratégie nationale se fixe trois objectifs :

- ✚ installer suffisamment d'électrolyseurs pour apporter une contribution significative à la décarbonation de l'économie (Aujourd'hui, l'industrie est en France de loin le premier consommateur d'hydrogène, avec 900 000 tonnes consommées annuellement).
- ✚ développer les mobilités propres, en particulier pour les véhicules lourds et longue distance.
- ✚ construire en France une filière industrielle créatrice d'emplois et garante de notre maîtrise technologique, notamment en créant 50 000 à 150 000 emplois sur le territoire.

Utilisations clefs de l'hydrogène selon stratégie française

La France souhaite décarboner son industrie en utilisant de l'hydrogène vert dans :

- la sidérurgie pour produire de l'acier bas carbone,
- la chimie comme réactif pour la production d'engrais décarboné ou de nylon bas carbone,
- le raffinage, essentiellement pour désulfurer les carburants,
- la production de carburants synthétiques en combinant hydrogène et dioxyde de carbone pour former un carburant dont les émissions de gaz à effet de serre sont nulles.

Par ailleurs, la France a l'ambition de développer une mobilité lourde à l'hydrogène décarboné, en particulier les poids lourds (fret), bus, bennes à ordures ménagères, trains régionaux ou inter-régionaux en zone non électrifiée.

Concernant l'aviation, deux utilisations principales de l'hydrogène sont identifiées :

- l'utilisation directe de l'hydrogène pour la propulsion à l'hydrogène,
- l'utilisation de l'hydrogène pour produire des carburants synthétiques (SAF), qui seront eux-mêmes utilisés dans des moteurs actuels.

Objectifs en chiffre :

La France se fixe ainsi l'ambition de pouvoir compter sur son sol au moins 4 giga-usines d'électrolyseurs d'ici 2030 soit environ 6.5 GW d'électrolyseurs et l'ensemble des technologies nécessaires à l'utilisation de l'hydrogène.

Cette ambition de 6.5 GW en 2030 d'électrolyseurs correspond à environ 1 M de tonnes d'hydrogène décarbonée (à partir de renouvelable ou nucléaire), ce qui est aujourd'hui la production totale française d'hydrogène.

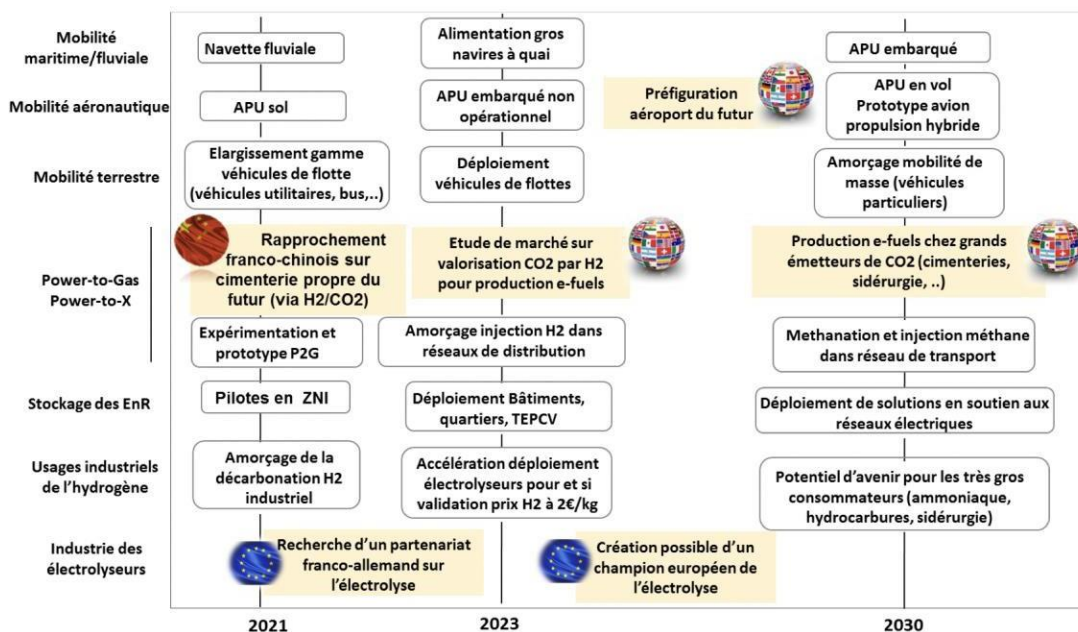
b) Au croisement des transitions énergétique et industrielle se trouve l'Hydrogène

Le plan de déploiement de l'hydrogène décrit par le Ministère de l'Ecologie et de la transition énergétique souligne la nécessité de l'utilisation de l'Hydrogène pour le succès de cette politique d'innovation et de transition énergétique. L'idée est bien d'utiliser l'hydrogène comme le fondement d'un cercle énergétique et industriel vertueux.

Le premier pilier de cette stratégie française de l'Hydrogène demeure ainsi le soutien à l'innovation et aux premiers déploiements industriels décarbonés afin d'amorcer ces effets de leviers industriels.

Le conflit russo-ukrainien et la crise énergétique majeure que traverse notre pays forcent les dirigeants politiques à penser l'avenir et à mettre en œuvre des politiques neuves sur les plans de la réindustrialisation et de la souveraineté énergétique. La reconquête industrielle apparaît comme une nécessité absolue pour le pays, sur fond de sortie progressive des énergies fossiles « La décennie 2020 sera celle de la réindustrialisation » souligne Mme E. Borne dans son discours pour la « Stratégie Hydrogène 2030 » à l'Hôtel de Matignon le 28.09.2022. En ce sens, la stratégie pour le déploiement de l'hydrogène revêt une importance précieuse.

Ce pivot stratégique et cette crise (un avant et un après, une modification profonde des rapports stratégiques) nous invitent ainsi à dresser un bilan à horizon 5 ans de cette stratégie nationale de déploiement de l'Hydrogène présenté en 2018. Au-delà des trois objectifs annoncés d'emploi, de souveraineté et de neutralité carbone, quelles sont les réelles avancées de cette politique énergétique « affichée »? Comment analyser le niveau de soutien réel de l'Etat aux entreprises de la filière ? Est-ce suffisant ? Quelle comparaison dresser avec nos amis (et concurrents ?) Européens et occidentaux ?



La France souhaite développer la production d'hydrogène par électrolyse pour servir l'industrie (chimie, raffinerie, sidérurgie ...) ainsi que la mobilité lourde et professionnelle

(transport ferroviaire routier et aérien). L'intention logique est d'éviter toute importation d'hydrogène et réduire l'empreinte carbone de la filière.

9 milliards seront-ils suffisants pour atteindre ces objectifs ambitieux et globaux autour de l'hydrogène? Il convient d'emblée de rappeler la dépendance de cette politique (et concrètement des partenariats public-privé décrits plus haut), comme de toute politique d'aide publique, à plusieurs facteurs économiques et financiers dont notamment la réalité des coûts de productivité encore inconnus pour la filière, des avancées technologiques rapides (et non encore maîtrisées) et de la réglementation qui sera en vigueur à horizon 2030.

Alors que d'autres pays occidentaux se lancent dans le soutien à la filière Hydrogène à des horizons similaires, quelle est l'avance et la position comparative française ? L'Allemagne a également annoncé un plan à horizon 2030 et un investissement global comparable chiffré à 9 milliards d'euros, l'ambition affichée est la production d'hydrogène à prix compétitif à cette échéance.

Le meilleur allié et avantage comparatif français demeure certainement son important parc nucléaire représentant un véritable atout pour la capacité de production nationale d'électricité renouvelable (même si l'Union européenne et ses lobbies d'Europe du Nord classent cette puissance énergétique hors ENR dans le mix énergétique)

La réelle diversité du secteur énergétique français est également un bel avantage pour réussir dans le domaine : un tissu d'entreprises innovantes est déjà en place et assure une vraie cohérence dans la mise en place d'une filière complète (chaîne complète de la formation des professionnels à la production)

Aujourd'hui, les investissements français (public/privé) dans l'Hydrogène représentent un quart des investissements et des projets soutenus par l'Union européenne dans le secteur.

Sources :

https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Plan_deploiement_hydrogene.pdf

Plan de déploiement de l'hydrogène dans la transition énergétique.
Ministère de l'Ecologie et de la transition énergétique, 2017-2018

<https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Rapport%20H2%20MTES%20CEA%200106.pdf>

Rapport et lettre de mission sur l'Hydrogène 2017

https://www.yele.fr/wp-content/uploads/2020/12/Hydrogen-strategies-and-roadmaps-analysis_Yele-Consulting_2020.pdf

Stratégie comparée H2 19 pays dont France Allemagne

<https://www.gouvernement.fr/upload/media/content/0001/04/f03137534894074f72e826a839245f671e16ffaf.pdf>

Discours Elisabeth Borne Stratégie Hydrogène 2022

c) La stratégie française de valoriser l'hydrogène bas-carbone

La stratégie française concernant l'hydrogène vert visait à faire reconnaître à ses alliés européens le caractère bas carbone de son mix énergétique grâce à une forte composante nucléaire et renouvelables, à savoir, en 2019 :

- 70% de la production française d'électricité est à base de nucléaire (contre 10% au niveau mondial)
- 11% par l'hydroélectricité et 6% éolien (moyenne mondiale de 16% et 5% respectivement)
- 7% gaz naturel (moyenne de 23% dans le monde) et autres (charbon, pétrole, ...) pour 6% restants (moyenne mondiale de 37% pour le charbon et 3% pour le pétrole)

Or, selon la base carbone de l'ADEME, les émissions par kWh produit en France sont, du plus émetteur au moins émetteur :

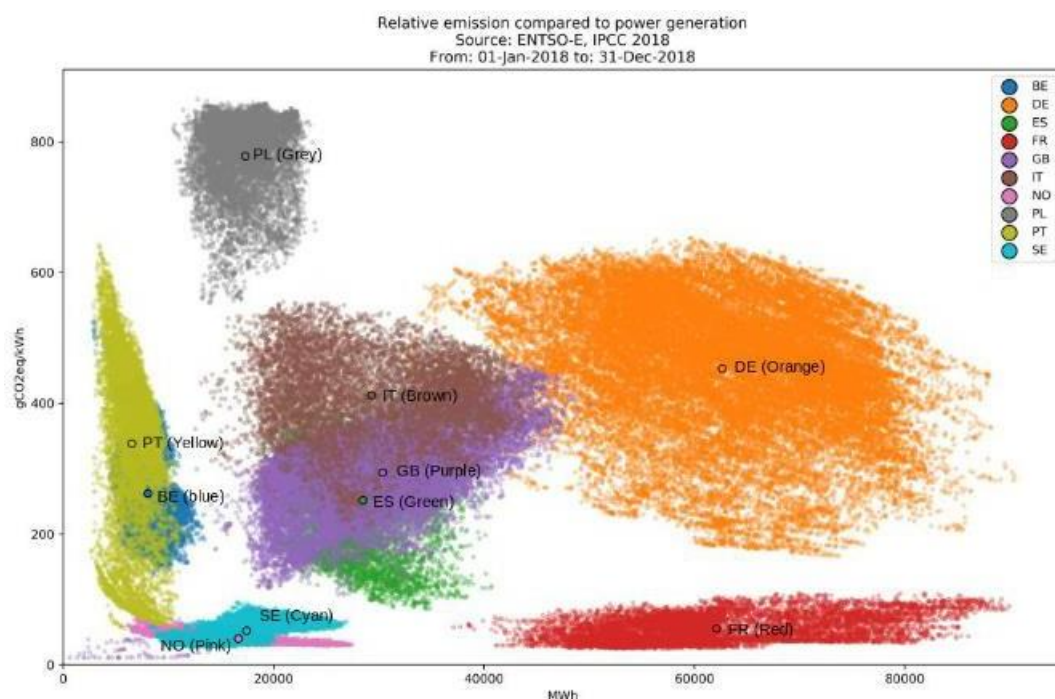
- 1060 g/kWh avec du charbon
- 730 g/kWh avec le fioul
- 418 g/kWh avec le gaz
- 14 g pour l'éolien terrestre, 15 g pour l'éolien en mer
- Seulement 6 g par kWh pour le nucléaire ou l'hydraulique.

source	émission par source en g/kWh	% de la source en France	% de la source moyenne mondiale	% de la source en Allemagne
charbon	1060	0%	37%	38%
fioul	730	1%	3%	0%
gaz	418	7%	23%	7%
éolien	14,5	6%	5%	20%
nucléaire	6	70%	10%	13%
hydraulique	6	11%	16%	3%
autres (biomasse, solaire)	20	5%	6%	18%
	Moyenne pondérée en g/kWh	43	514	441

Le calcul de la moyenne g/KWH des émissions de carbone du mix énergétique français est ainsi de 43 g/kWH , à comparer avec la moyenne mondiale à plus de 500 g/kWH, et à celle allemande 10 fois plus importante que la française.

La France a poussé pour que l'électricité du réseau, avec son faible taux d'émissions de gaz à effet de serre, soit acceptée pour la production d'hydrogène VERT.

En Europe, la Suède a également un mix énergétique relativement faible en carbone, comme le montre cette carte. Plus le nuage de point est bas, moins importantes sont les émissions en CO2.



Le résultat de la négociation est à lire dans le New Delegated Act, à savoir que l'hydrogène vert produit en France doit respecter les mêmes règles en terme de « certificate of origin » d'énergies renouvelables et règles de temporalité (énergies renouvelables générées simultanément et dans la même région géographique à la production d'hydrogène), mais la France et la Suède, du fait de leur mix énergétique faible en carbone, sont exemptées du critère d' « additionalité ». Tous les autres pays doivent respecter ce critère d'additionalité, qui se traduit par la nécessité pour chaque usine d'hydrogène de prouver qu'elle est alimentée par une capacité supplémentaire d'électricité renouvelable installée moins de 36 mois avant l'électrolyseur d'hydrogène. Cette condition sera indispensable à l'obtention du label d'hydrogène « VERT ». Cela permet de dissuader la compensation de besoins supplémentaires en électricité pour la production d'hydrogène vert par de nouvelles capacités de production d'électricité à fort taux d'émission, ce qui serait contreproductif en terme de bilan carbone.

Sources :

https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_23_595

Maxence Cordiez « Energies, fake or not »

2. Stratégies des autres pays sur l'hydrogène

L'hydrogène est considéré comme une solution énergétique importante pour répondre aux défis du changement climatique, de la pollution de l'air et de l'épuisement des combustibles fossiles. La stratégie hydrogène dans le monde est en train de prendre forme et plusieurs pays ont élaboré des plans pour développer leur industrie de l'hydrogène.

Quelques exemples de stratégies « hydrogène » dans le monde :

Europe : La Commission européenne a publié une stratégie pour l'hydrogène en juillet 2020. L'objectif est de développer une industrie de l'hydrogène compétitive et durable en Europe pour atteindre la neutralité climatique d'ici 2050. La stratégie prévoit des investissements importants pour la production, le transport et l'utilisation de l'hydrogène. En effet, l'Union Européenne prévoit la création d'une « Banque Européenne de l'Hydrogène » d'ici fin d'année 2023, dans laquelle une mise en place « d'enchères pilotées » avec une allocation de 800 Millions d'€ versée dans cette banque, permettant de subventionner les différents projets et initiatives.

Japon : Le Japon est l'un des leaders mondiaux dans le domaine de l'hydrogène. Le pays a lancé une stratégie en 2017 pour promouvoir la distribution et l'utilisation de l'hydrogène dans les secteurs de l'énergie, de la mobilité et de l'industrie. Le Japon a une stratégie tournée vers l'importation d'Hydrogène. Pour cela, le Japon est prêt à investir dans des Pays tiers dans ce volet spécifique de la production.

Chine : La Chine est un autre pays qui s'investit fortement dans l'hydrogène. Le gouvernement chinois a annoncé en novembre 2020 un plan quinquennal pour le développement de l'hydrogène. Le pays vise à atteindre une capacité de production d'hydrogène de 1 million de tonnes d'ici 2025, ainsi qu'à encourager l'utilisation de l'hydrogène dans les secteurs de l'énergie, de la mobilité et de l'industrie.

États-Unis : L'administration Biden a annoncé en mars 2021 un plan pour accélérer le développement de l'hydrogène aux États-Unis. Le plan prévoit des investissements importants dans la recherche, la production et l'utilisation de l'hydrogène, ainsi que des incitations fiscales pour encourager l'adoption de technologies liées à l'hydrogène.

Australie : L'Australie dispose de vastes ressources en énergies renouvelables, ce qui en fait un candidat naturel pour le développement de l'hydrogène. Le gouvernement

australien a annoncé en novembre 2019 une stratégie nationale pour l'hydrogène, avec l'objectif de développer une industrie de l'hydrogène compétitive et durable. Le pays dispose déjà d'un important projet d'exportation d'hydrogène vert vers l'Asie.

En somme, les stratégies hydrogène dans le monde se concentrent sur la production, la distribution et l'utilisation de l'hydrogène, en mettant l'accent sur la durabilité et la compétitivité. Les investissements massifs dans l'hydrogène devraient ouvrir la voie à une économie plus propre et plus verte.

Actuellement, plus de 30 pays dans le monde ont élaboré des stratégies nationales pour le développement de l'hydrogène. Ces pays comprennent des économies avancées comme le Japon, la Corée du Sud, l'Allemagne, la France, les États-Unis, le Canada, l'Australie, ainsi que des pays émergents comme la Chine, l'Inde, le Brésil et l'Arabie saoudite. Le nombre de pays avec une stratégie hydrogène est en constante évolution car de plus en plus de gouvernements reconnaissent l'importance de l'hydrogène comme solution énergétique pour atteindre la neutralité carbone et réduire les émissions de gaz à effet de serre.

La page suivante décrit de manière synthétique (sous forme de tableau), les stratégies d'une petite vingtaine de Pays autour du globe. Cette approche permet d'identifier des spécificités par Pays, en ayant une stratégie globale, commune et partagée par l'ensemble des Pays.

En effet, certains pays souhaitent développer l'ensemble de l'écosystème lié l'hydrogène, à savoir : la production, le transport, le stockage jusqu'à l'utilisateur final (industrie, entreprise, particulier, véhicules...). D'autres pays axent leur stratégie plus dans le domaine de production, car la localisation et/ou leurs infrastructures existantes y sont propices. D'autres encore privilégieront l'importation, et axeront leur stratégie sur le stockage et l'utilisateur final.

Nous observons aussi un jeu d'alliances qui se met en place. Quelques pays sortent du lot, l'Allemagne, les Pays-Bas, le Japon, ces derniers passant des accords avec des Pays tiers par leur soutien financier, et ainsi, investir dans des infrastructures de production (principalement) pour contrôler in fine, le coût d'achat du kg d'Hydrogène.

3. Anticipation et vision critique

a) Œil critique sur stratégie française affichée

ci-dessous un tableau reconstitué, pour la **France**, à partir d'information en source ouverte.

REEL					2030 AMBITIONS					
en millions de tonnes (MT)					en millions de tonnes (MT) et Giga Watt (GW)					
production réelle 2020 (MT)	dont production 2020 hydrogène décarbonnée	% hydrogène /production globale	Consommation d'hydrogène 2020 (industrie principalement)	% conso/production	production hydrogène 2030 (MT)	dont hydrogène décarbonnée	capacité électrolyseurs en GW	% hydrogène décarbonnée/p roduction globale	Consommation hydrogène 2030	% conso/production
1	0,06	6%	0,9	90%	2	1	6,5	50%	1	55%

⇒ L'ambition nationale est d'installer 4 giga-usines d'électrolyseurs (6,5 GW d'électrolyseurs) pour 2030. Aujourd'hui, encore aucune giga usine n'est sortie de terre. Il faut au moins 6 ans pour effectuer les études, la validation des autorités publiques, et construire une usine.

La France sera-t-elle au rendez-vous en 2030 ?

⇒ Aujourd'hui, seuls 6% (60 KTonnes) de l'hydrogène français est produit par électrolyse. L'objectif est de produire 1 Million de tonnes d'hydrogène par électrolyse en 2030. La pente est raide pour atteindre les objectifs. **Est-ce une stratégie réaliste ou un vœu pieux ?**

⇒ Notons également que la France a l'ambition de produire 50% d'hydrogène décarbonnée soit 1M T d'hydrogène par électrolyseurs en 2030 et donc, par déduction, un autre million de tonnes d'hydrogène gris. L'estimation de la consommation française en 2030 est de 1MT, soit légèrement plus que la consommation 2020), ce qui signifie que la France serait autosuffisante en hydrogène et pourrait même exporter 1 MT d'hydrogène, ce qui participerait à redresser le déficit commercial.

La France se donne-t-elle les moyens de ses ambitions ?

⇒ Concernant les usages en France de l'hydrogène, à échéance 2030, le secteur la mobilité ambitionne d'enclencher un début de sevrage aux hydrocarbures par l'électrification des usages d'une part (véhicules particuliers, courtes distances), et grâce à l'hydrogène d'autre part (en particulier dans la mobilité lourde).

Les infrastructures et habitudes évoluent-elles à un rythme suffisant ?

⇒ La sidérurgie prévoit le remplacement du coke par l'hydrogène, pour 2027. [ArcelorMittal](#) projette d'utiliser la méthode de réduction directe du minerai de fer à l'hydrogène vert en substitution à la réduction-fusion au carbone dans les hauts fourneaux. Selon un article du [Monde de février 2022](#), l'Etat va aider ArcelorMittal à décarboner son acier en France, pour les usines de Dunkerque (Nord) et Fos-sur-Mer

(Bouches-du-Rhône). Notons que ces deux sites représentent à eux seuls 25 % des émissions industrielles de gaz à effet de serre en France.

2027, c'est demain. La production in situ, à Dunkerque et Fos-sur-Mer, d'hydrogène par électrolyse, sera-t-elle prête à temps et dans les volumes nécessaires pour pouvoir aux besoins de la sidérurgie ? L'Etat français a-t-il un droit de regard sur le pilotage des décisions du groupe ArcelorMittal ? Comment s'assure-t-il du non report ou retard de ce projet essentiel pour la décarbonation de notre industrie et l'atteinte de notre double objectif de réduction des gaz à effet de serre et renforcement de notre souveraineté ?

⇒ Pour devenir leader dans ce secteur prometteur et essentiel dans l'accompagnement de la transition énergétique, la France et l'Europe doivent adopter des normes et lois incitatives pour la réduction de l'utilisation des hydrocarbures, la modification des usages et techniques, tout en veillant à nos intérêts et à protéger et accompagner nos industries. Les pionniers bénéficieront d'un avantage concurrentiel certain. Il est important d'anticiper pour permettre à l'industrie française et européenne de s'adapter et devenir fournisseur mondial de solution hydrogène vert.

Avons-nous conscience de l'avantage que représente le premier marché de consommateurs de l'union européenne et sa force normative ?

⇒ L'hydrogène sera nécessaire pour décarboner certaines industries et certains segments de mobilité lourde (frets de marchandise par camions, aviation et peut-être maritime). Il restera cependant durablement limité en volume (du fait des quantités d'électricité bas carbone requises) et cher. Il ne doit donc pas être gaspillé dans des applications décarbonables autrement, notamment par électrification directe, ce qui est le cas de la mobilité routière. **Il est essentiel que les acteurs économiques et politiques comprennent ces subtilités, consultent nos ingénieurs et experts pour éviter de prendre des décisions hâtives et aberrantes.**

⇒ Pour remplacer les 400 000 tonnes d'hydrogène produites par vaporeformage de méthane en France par de l'hydrogène produit par électrolyse, comme prévu dans le plan stratégique pour 2030, il faut y dédier l'équivalent de 3 réacteurs nucléaires de 900 MW ou 3000 éoliennes terrestres de 3 MW... **C'est un challenge de taille en termes de production d'électricité et d'infrastructures. Les installations de production d'électricité (EDF), ainsi que le réseau de transport d'électricité français (RTE) sont-ils en adéquation avec ces objectifs ? Auront-ils les moyens financiers et humains pour monter en capacité ?**

Source : [France hydrogène](https://www.france-hydrogene.org/magazine/des-ambitions-revues-a-la-hausse-pour-2030)

<https://www.france-hydrogene.org/magazine/des-ambitions-revues-a-la-hausse-pour-2030>

https://www.lemonde.fr/planete/article/2022/02/04/emissions-de-co2-arcelormittal-va-remplacer-en-france-trois-de-ses-hauts-fourneaux-a-charbon-par-des-fours-electriques-et-a-hydrogene_6112249_3244.html

Maxence Cordiez, ingénieur français expert en énergie

b) L'hydrogène : attention au greenwashing

L'hydrogène, par hydrolyse de l'eau en particulier, est une technologie de rupture essentielle, mais pas toujours idéale.

L'hydrolyse de l'eau va permettre à la France de sortir de sa dépendance aux énergies fossiles. Cette technologie permettra de remplacer les hydrocarbures dans certaines industries comme la sidérurgie, ou la chimie (engrais), solution essentielle et indispensable à l'atteinte de nos objectifs de neutralité carbone en 2050.

Certains défis restent encore à relever, comme le risque d'inflammabilité de l'hydrogène, la nécessité de produire l'hydrogène localement par rapport à son utilisation ou le coût et perte de rendement dans son transport, et son coût encore relativement élevé par rapport à d'autres énergies fossiles...

Même l'hydrogène décarbonée, avec un empreinte carbone réduite, n'est pas exempte d'impact sur la nature. Sa production demande un apport en eau. Or, l'eau devient un bien rare dans certaines régions de globe, y compris en France, ce qui demande de faire des choix cornéliens d'usage.

Chaque usine d'électrolyseur représente une empreinte au sol, et le rejet d'eau réchauffée (22 degrés) dans les fleuves.

L'impact sur l'environnement de cet hydrogène « vert » ou « jaune » pourtant essentiel pour relever les défis climatiques et de respect de la biodiversité n'est donc pas nul.

Il faut donc éviter l'écueil premier de considérer l'hydrogène comme la « solution » nous autorisant à ne pas réfléchir plus profondément sur la surconsommation de masse. L'hydrogène ne remplacera pas une transformation profonde de notre mode de vie vers plus de sobriété. Nous développons ce concept dans la page suivante.

Par ailleurs, le mot « hydrogène » ne doit pas, à lui tout seul, de manière sournoise, permettre l'adhésion et l'acceptation de pratiques « schizophrènes » pour la planète. Certaines aberrations économiques et écologiques relèvent de l'incompétence politique ou du cynisme démagogique. Prenons un exemple pour illustrer notre propos...

En mars 2023 [\(1\)](#), l'Allemagne annonce la sortie de terre d'une nouvelle centrale "H2 ready », ce qui sous-entend que cette centrale électrique à base d'hydrocarbures, pourrait brûler de l'hydrogène à la place des hydrocarbures. Le mot H2 donne – de manière erronée- une connotation verte à l'annonce...

Mensonge et manipulation : si vraiment cette centrale utilise un jour l'hydrogène comme intrant, il sera probablement GRIS (produit à partir de méthane), parfois importé de pays lointains, avec un rendement qui rend le processus ultrapolluant.

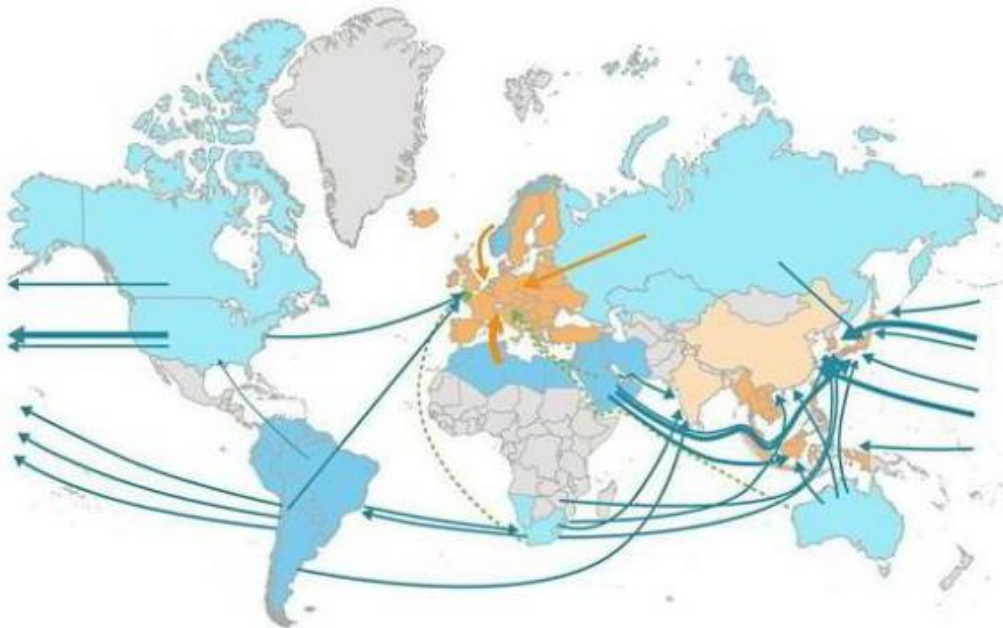
L'hérésie environnementale se résume ainsi :

- Rendement de 30% pour convertir de l'hydrogène en électricité
- Intrant principal de l'hydrogène gris : le méthane
- Transport de l'hydrogène de pays lointains probablement riches en hydrocarbures
- Importation : perte de souveraineté

Le mix énergétique bas carbone français, électricité pour consommation directe, ou pour la production d'hydrogène VERT par hydrolyse de l'eau, à base d'énergies renouvelables et de nucléaire, est une solution beaucoup moins polluante. Cet hydrogène vert sera à destination de l'industrie (pour décarboner l'acier par exemple), ou à destination du transport lourd longue distance, mais en aucun cas pour reconvertir massivement en électricité dans une centrale.

Un autre écueil à éviter, serait de convertir notre dépendance aux importations d'hydrocarbures, par une autre dépendance d'importations d'hydrogène. Cette « potentielle » vulnérabilité souffre du double inconvénient de ne pas permettre à la France de gagner en souveraineté, et de ne pas considérer l'empreinte totale de la production à la consommation, en incluant le transport et le stockage de l'hydrogène.

L'« hydrogène council » estime que les flux d'importation d'hydrogène et de ses dérivés suivront les chemins de la carte suivante en 2050 [\(2\)](#) :



Est-ce raisonnable pour la planète ? Le rendement est-il acceptable ? Est-ce seulement financièrement intéressant de transporter de l'hydrogène sur des longues distances ?

Selon les experts, il est très peu probable qu'un marché d'importation/exportation massif d'hydrogène se développe. L'hydrogène est bien plus complexe (coûteux en énergie et infrastructures) à transporter que le méthane (gaz naturel).

Or, certains pays envisagent de produire massivement de l'hydrogène vert et communiquent sur leur ambition de l'exporter (pays africains, Australie...). Ces pays présentent des contraintes de stress hydrique ou ont un bouquet très carboné (charbon pour l'Australie et le Maroc, gaz fossile pour l'Algérie...).

Le premier piège serait de croire que la production de cet hydrogène « vert » participe à la préservation de notre environnement, alors même qu'elle a une empreinte carbone ultra-élevée et prive ces pays des ressources vitales en eau et énergies renouvelables. Ces pays ne devraient-ils par en priorité utiliser leur production d'électricité renouvelable pour leurs propres usages avant de l'injecter dans les giga usines électrolyseurs d'hydrogène à destination de l'export ?

Soulignons ici que rendement du procédé électricité -> hydrogène -> électricité est très faible (30%). Par ailleurs, il nécessite des infrastructures onéreuses. La production locale, proche des industries et points de consommation, est donc l'option idéale.

Importer de l'hydrogène du Maroc nécessiterait des pipelines sous la mer, ce qui induit une déperdition de pression de gaz et donc une nécessité de compression très forte pour obtenir une pression en entrée de pipeline très forte avant de traverser la mer.

La compression représente environ 20% de besoin en énergie supplémentaire.

Ensuite, il faut que le « européen backbone » (pipeline européen de gaz) pour acheminer l'hydrogène dans toute l'Europe soit prêt.

Pour quelles raisons les pays européens choisiraient-ils d'investir dans les pipelines sous marins plutôt que dans des électrolyseurs en Europe ? Déraisons, manque d'anticipation ou absence de consultation de nos ingénieurs ?

Quid des risques liés à la pression de l'hydrogène dans les pipelines ?

Source :

<https://www.hydrogeninsight.com/power/germany-to-build-17-21gw-of-new-hydrogen-ready-gas-fired-power-plants-says-chancellor/2-1-1415040>

<https://www.hydrogeninsight.com/production/green-hydrogen-imported-to-europe-would-be-cost-competitive-with-locally-produced-h2-by-2030-analyst/2-1-1393655>

Maxence Cordiez, ingénieur et expert en énergie

c) L'efficacité énergétique et la sobriété énergétique dans le secteur industriel

La sobriété est la réduction de la consommation, qui vient en plus de l'efficacité énergétique qui est bien entendu un levier technologique à toujours rechercher et promouvoir.

La sobriété se joue en aval de l'industrie lourde (sidérurgie, ciment, chimie), c'est-à-dire dans les secteurs qui consomment l'acier, le ciment, les engrais, les médicaments, le plastique à savoir, la construction, et l'automobile pour l'acier, le ciment, le béton, et le secteur de l'agriculture pour les engrais.

- Construction : miser sur l'utilisation de matériaux biosourcés (bois, paille, chanvre) ou géosourcés (terre cuite) + optimiser la conception des bâtiments pour réduire la consommation de béton armé
- Automobile : réduire le poids des véhicules
- Pharmacie/parapharmacie : inciter et accompagner la réduction de la consommation de médicaments. Miser sur la prévention, une alimentation saine, un mode de vie moins sédentaire et plus équilibré.
- Polymères : limiter la consommation du plastique par des normes/lois strictes
- Agriculture : produire et consommer moins d'engrais en modifiant les techniques (microdosage, engrais organiques)

Sources :

<https://climate.selectra.com/fr/empreinte-carbone/energie>

<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/consommation-denergie-par-usage-du-tertiaire>

CONCLUSION

Force est de constater que l'énergie est, depuis le début de la période industrielle, un élément central dans le développement de nos sociétés contemporaines et un enjeu économique majeur. Posséder l'énergie est donc le reflet d'une certaine puissance voire de domination. Posséder l'énergie est l'élément clé de la souveraineté d'un pays. Encore faut-il que ce soit sa propre énergie qui soit la norme.

D'un point de vue environnemental, l'hydrogène reste dans l'inconscient collectif une énergie « verte ». Or, encore aujourd'hui, 99% de la production mondiale d'hydrogène est produite par vaporeformage de méthane (95% en France), donc à partir d'énergies fossiles dont la France n'est pas pourvue, et par ailleurs fortement émettrices de gaz à effet de serre.

L'hydrogène « bas carbone » dit « vert » est celui produit par électrolyse de l'eau, avec des énergies renouvelables ou possiblement avec l'électricité du secteur dans les pays bénéficiant d'un mix énergétique bas carbone grâce au nucléaire, comme c'est le cas en France. Soulignons ici l'atout français du parc nucléaire, dans la production d'hydrogène bas carbone. Notons également que l'hydrogène mérite son label de « vert » uniquement s'il est produit localement par rapport à sa consommation, pour éviter de perdre en rendement.

L'hydrogène gris est un dérivé d'énergie fossile. L'hydrogène vert est consommateur d'eau et d'électricité. Dans les deux cas, il serait donc dommage de le « gaspiller » pour tous les usages, tout en bénéficiant de son image de « pureté ». Certains usages seraient plus économes en énergie par l'électrification (véhicules particuliers). Pour d'autres usages, comme le transport poids lourds longue distance, et l'industrie, l'hydrogène est incontestablement la solution d'avenir. Dans tous les cas, la sobriété doit être recherchée.

La production et la consommation d'énergie doivent s'équilibrer à tout moment et en tout lieu (« pertes significatives » au stockage et en transport). De ce fait, des choix d'usage s'imposeront si la production d'énergie n'arrive pas à suivre la consommation.

Remplacer 400 000 tonnes d'hydrogène produites par vaporeformage de méthane par de l'hydrogène produit par électrolyse, comme prévu dans le plan stratégique pour 2030, nécessite l'équivalent de 3 réacteurs nucléaires de 900 MW ou 3000 éoliennes terrestres de 3 MW... C'est un challenge de taille en termes de production d'électricité, d'infrastructures, d'effort de sobriété et d'augmentation de l'efficacité énergétique, 4 défis à mener de front.

L'hydrogène a des atouts pour être cette énergie émancipatrice et à potentiel de décarbonation. La France possède la technologie et les moyens de mettre en place cette stratégie qui revêt un enjeu à la fois économique, environnemental mais aussi de souveraineté. La volonté politique apparaît cruciale et déterminante pour le succès de la filière.

L'Etat français, lorsqu'il subventionne certaines entreprises industrielles de la filière hydrogène, a-t-il un droit de regard sur les résultats, les marges, les délais ? Arrive-t-il à tenir le rôle de chef d'orchestre pour que chaque acteur « joue le jeu » et fasse de cette filière une réussite, en termes de délai et de prix de sortie de l'hydrogène vert ?

Pour atteindre les objectifs 2030 puis 2050 de sa stratégie hydrogène France, stratégie de réindustrialisation et stratégie de décarbonation, le gouvernement doit à la fois planifier et

piloter les différents acteurs, subventionner et contrôler des entreprises privées. Le but de cette mise en cadence est que la France atteigne ses objectifs de production d'hydrogène bas carbone à un prix compétitif. C'est un défi qui se joue aujourd'hui et dans les quelques années à venir. La France ne doit pas rater le coche et laisser filer ses industries très consommatrices en hydrogène comme par exemple la sidérurgie vers d'autres pays qui auraient réussi mieux que nous le challenge de production locale d'hydrogène par électrolyse.

EXECUTIVE SUMMARY

In a world that is accelerating and in which economic competition is growing more intense and fiercer, it is clear that we face a paradox. On one hand, we are every day more concerned about the impact of man on the environment and yet energy remains a key element that occupies an increasingly important place in the development of industries, companies but also in transport. With this preliminary observation (Man must reduce his environmental impact but also increase his energy production to remain competitive), Hydrogen is positioned as a relevant strategic asset that can provide the economic world and governments with medium-term solutions allowing us to meet the imperatives of decarbonization and national autonomy.

In addition to “potentially reducing the environmental impact” (depending on its production method, ad this is a point of attention that we need to highlight), hydrogen offers the advantage to be manufactured autonomously within the country. We underline here the importance for national sovereignty to be able to maintain autonomously the country's critical activity in times of crisis. Energy sovereignty allows industries, companies and transportation means to be independent from imports from other countries (outside European Union in particular) or foreign companies and thus disregard any outside pressure.

To achieve French hydrogen 2030 and then 2050 objectives, as well as our ambition for reindustrialisation and decarbonization, French government must both plan and steer the various actors, subsidize and control private companies. The goal is to be able to produce low-carbon hydrogen at a competitive price, in a few years from now. France must be up to this key “short/medium term challenge”, in order to reach “Fit for 55” goals without losing its hydrogen and energy intensive industries such as steel.

Energy autonomy, energy independence, energy sovereignty, regardless of the name given to it, must be put back at the heart of the national strategy. General de Gaulle had made nuclear energy a question of sovereignty in the 20th century... Hydrogen could well be the molecule of the 21st century.

ANNEXES

Principaux polymères dérivés du pétrole

Ci-dessous une liste non exhaustive des principaux polymères et leurs applications, tous produits dérivés du pétrole :

- PVC : polychlorure de vinyle, application tuyaux rigides, gaines électriques, huisseries.
- Polyéthylène basse densité : objets pour l'industrie automobile, sacs d'emballage de supermarché, films (travaux publics), tuyaux et profilés, sacs poubelles, articles injectés (ménagers et jouets), sacs congélation.
- Polyéthylène haute densité : bouteilles et corps creux, tuyaux, fibres, objets moulés par injection.
- Polytetrafluoroéthylène (PTFE) : revêtement des poêles Tefal, etc.
- Polypropylène : articles moulés par injection pour les industries automobile, électroménager, ameublement, jouet, électricité, alimentation boîtes et bouteilles diverses, fils, cordages, films, sacs d'emballage, boîtier de phare, etc.
- Polystyrène et copolymères associés (ABS) : emballages (barquettes blanches), bâtiment (isolation polystyrène expansé), électroménager, ameublement (bureau et jardin), jouets, bagages, emballages pour cosmétiques, médicaments et produits alimentaires, contrepertes de frigo.
- Poly-isobutène, encore appelé caoutchouc butyl : applications chambres à air.
- Polybutadiène (BR) : utilisé principalement pour la fabrication des pneus.
- Styrène butadiène (SBR) : rubber ou encore caoutchouc synthétique (latex par exemple), styrène + butadiène (élastomères). Applications pneus et joints, amortisseurs, tapis transporteurs, semelles, garnitures de pompes. Rentrent aussi dans la composition des bitumes pour rendre le revêtement plus souple.
- Acrylates et méthacrylates, poly(méthyle méthacrylate) PMMA. Applications en peintures, revêtement de surface, fibres, adhésifs, encres, verrières (vitrages caravanes, avions, bateaux), verres de lunettes, lavabos, baignoires cabines de douches.
- Polyamides : famille des nylons. Fibres d'habillement, pièces mécaniques de frottements, réservoir à essence, seringues.
- Fibres et résines polyesters : à partir de l'acide téréphtalique (ex paraxylène+ éthylèneglycol (fibre Tergal), polyéthylène téréphtalate (PET) pour bouteilles.