

L'hydrogène décarboné : une stratégie interministérielle et une gouvernance renouvelée

Par Hoang BUI

Secrétariat général pour l'investissement, sous l'autorité du Premier ministre

La France a construit une stratégie Hydrogène qui doit garantir son indépendance. Au travers de cette stratégie qu'elle a dotée de moyens financiers substantiels (8,9 Mds€), elle vise à produire son hydrogène par électrolyse et accélérer le déploiement de sa décarbonation, tout en portant une ambition industrielle d'envergure mondiale. Elle fait ainsi la course dans le peloton de tête.

À la sortie de la crise sanitaire, les services de l'État se sont mis en ordre de bataille et ont adopté une nouvelle gouvernance, où ils travaillent systématiquement en interministériel – un travail à la base des plans d'investissement France Relance, puis France 2030 – et en interaction permanente avec les acteurs privés, au travers notamment du Conseil national de l'hydrogène. La crise du gaz a renforcé encore plus la conviction collective qu'il faut sortir en urgence de notre dépendance aux hydrocarbures fossiles, et ce grâce à l'hydrogène et à nos énergies décarbonées.

Mais la route est encore longue et pavée d'embûches. L'hydrogène est-il toujours la meilleure solution ? Nous sommes-nous lancés trop tôt dans l'électrolyse ? S'agit-il d'un investissement sans regret ? Disposerons-nous d'assez d'électricité et d'équipements « Made in France » pour installer 6,5 GW de capacités d'électrolyse d'ici à 2030 ? Réussirons-nous, grâce à ce déploiement massif, à faire baisser le coût de l'hydrogène décarboné produit ? Pour ce faire, pouvons-nous compter sur l'innovation, l'augmentation de la puissance et des performances des électrolyseurs et la construction de *gigafactories* d'équipements grâce au soutien financier exceptionnel apporté dans le cadre du programme européen IPCEI, avec pour but d'accompagner le dynamisme de nos industriels ?

Quand nos voisins, l'Espagne ou l'Allemagne, nous pressent d'investir dans des infrastructures de transport d'hydrogène par *pipeline*, avons-nous raison de dire non en raison des coûts échoués, et ce même si de grands industriels nous le demandent ? Et si la vraie question, c'était plutôt : quand ? C'est-à-dire quand devrions-nous réexaminer la question des infrastructures qui pourraient être nécessaires pour le développement de nos propres bassins d'hydrogène ? L'Allemagne, qui doit importer massivement de l'hydrogène vert, va-t-elle déstabiliser la production européenne locale, et surtout française ? Quels seront le prix de cet hydrogène liquéfié (ou ammoniac) importé *via* les terminaux de l'Europe du Nord et le coût de sa distribution ? Comment retrouver nos repères économiques alors que le prix de l'électricité, qui représentait jusqu'à présent 70 % du coût de l'hydrogène décarboné produit, a été multiplié par presque 9 (en juillet 2022 par rapport à fin 2020) et que celui du gaz naturel a été multiplié par 6 ?

Et si le plus important, c'était l'équipage ? Notre capacité à nous écouter les uns les autres, à comprendre l'environnement qui nous entoure et les évolutions économiques et techniques pour réajuster en permanence, ensemble, notre route ? Mais aussi notre capacité à savoir changer de cap quand le chemin tracé nous mène à une impasse.

L'hydrogène joue un rôle important dans un grand nombre de secteurs clés

Une molécule que la France sait produire

La France consomme annuellement un peu moins de 900 000 tonnes d'hydrogène.

95 % de l'hydrogène sont produits à partir des combustibles fossiles⁽¹⁾. Pour 1 kg d'hydrogène produit, jusqu'à 10 kg de dioxyde de carbone sont émis dans l'atmosphère.

Seulement 5 % de l'hydrogène sont produits par électrolyse de l'eau, à partir d'une électricité réseau qui est très fortement décarbonée.

Un très large éventail d'usage de l'hydrogène décarboné

Les perspectives d'usage de l'hydrogène décarboné sont très nombreuses.

Il peut remplacer une grande partie⁽²⁾ de l'hydrogène carboné (gris) actuellement utilisé dans l'industrie (raffinage, engrais, industrie chimique).

Il peut être intégré dans certains procédés industriels, en substitution du charbon, pour réaliser la réduction des métaux (DRI). Il peut aussi être utilisé, en conjugaison avec le CCU⁽³⁾, pour produire des e-fuels⁽⁴⁾ ou des précurseurs chimiques (par exemple, le méthanol).

En tant que vecteur énergétique, l'hydrogène, utilisé en combustion, peut remplacer le gaz naturel quand des températures élevées sont requises (par exemple, dans la verrerie) et les fours électriques inadaptés pour atteindre de telles températures.

L'hydrogène permet aussi la décarbonation de la mobilité lourde et intensive (avions, navires, camions, cars, certains bus, voire des véhicules utilitaires en utilisation intensive).

L'hydrogène pourrait aussi faciliter le déploiement des énergies renouvelables dans les pays comptant une forte proportion d'EnR intermittentes dans leur mix électrique ou dans les zones non interconnectées (utilisation stationnaire, notamment en Outre-mer).

Enfin, l'hydrogène pourrait aussi venir en complément du biogaz pour la décarbonisation du gaz réseau, grâce à la production de méthane de synthèse à partir du CO₂ capté.

Une forte implication de l'ensemble des filières industrielles

Le Conseil national de l'hydrogène (CNH), qui réunit des acteurs privés, l'État et les régions, a été créé en janvier 2021, après l'annonce de la stratégie d'accélé-

ration de l'hydrogène décarboné. Le CNH est un lieu d'échanges à haut niveau entre l'État et les acteurs privés. Il s'assure de l'efficacité de la mise en œuvre de la stratégie nationale et contribue au bon développement de la filière.

La composition du CNH et la mobilisation des dirigeants de premier plan illustrent le caractère transverse, structurant et stratégique de l'hydrogène décarboné : outre l'association France Hydrogène qui fédère les acteurs de la filière française de l'hydrogène, on compte France Industrie, Syntec Ingénierie, le CEA, huit comités stratégiques de filière (Chimie et Matériaux, Mines et Métallurgie, Construction, Aéronautique, Industriels de la mer, Automobile, Ferroviaire et Nouveaux systèmes énergétiques), représentés par les dirigeants de grands groupes (Airbus, Alstom, Forvia, ArcelorMittal, KemOne...), ainsi que les grands énergéticiens (Total, Engie, EDF) et un des leaders de l'hydrogène (Air Liquide).

Le CNH contribue à l'émergence de projets collectifs pour structurer la chaîne de valeur sur notre territoire ou dans le cadre de coopérations européennes. Le CNH a, par exemple, élaboré une *roadmap* technologique qui va de la production d'hydrogène jusqu'aux différents usages de celui-ci. Cette cartographie identifie des briques indispensables mais faisant défaut à la filière française. Elle sert à l'État et à ses opérateurs à prioriser les projets de R&D déposés dans les guichets d'aide.

Une réponse technologique et industrielle au réchauffement climatique

L'hydrogène est une solution de décarbonation qui peut concilier les différentes attentes sociétales en matière de :

- protection de l'environnement et du climat : l'hydrogène est pourvoyeur de nombreuses solutions pour décarboner l'industrie et les transports, et il constitue un des leviers d'action de la SNBC (stratégie nationale bas-carbone) pour atteindre la neutralité carbone en 2050 ;
- développement économique : l'hydrogène offre l'opportunité de créer une filière et un écosystème d'industriels créateurs d'emplois ;
- souveraineté énergétique : l'électrolyse peut permettre de réduire notre dépendance vis-à-vis des importations d'hydrocarbures nécessaires pour produire de l'hydrogène gris (par vaporeformage du méthane⁽⁵⁾) ou des importations futures d'hydrogène sous forme liquéfiée, d'ammoniac ou encore de LOHC⁽⁶⁾ ;
- indépendance technologique : l'hydrogène permet de valoriser les savoir-faire des laboratoires publics, des *start-ups*, mais aussi de grandes entreprises françaises leaders dans les domaines de l'énergie ou des gaz.

⁽¹⁾ Procédés de vaporeformage de gaz naturel, d'oxydation des hydrocarbures et de gazéification du charbon.

⁽²⁾ Excepté l'hydrogène dit fatal, qui est un coproduit résultant de procédés dont l'objet ne vise pas à le produire.

⁽³⁾ *Carbon capture and utilization* ou captage et utilisation du carbone.

⁽⁴⁾ Carburants produits à partir de l'électricité décarbonée.

⁽⁵⁾ Encore appelé SMR (steam methane reforming).

⁽⁶⁾ Liquid Organic Hydrogen Carriers : ce sont des liquides organiques permettant de stocker, puis de déstocker de l'hydrogène et rendre son transport et sa manipulation plus sûrs.

L'action de l'État est nécessaire pour répondre à la course contre la montre pour réduire les effets du changement climatique

La course contre le réchauffement climatique

L'urgence climatique et les contraintes réglementaires à venir (paquet « Fit for 55 », directive RED III) incitent l'industrie et le secteur des transports à anticiper leurs investissements dans la décarbonation. Or, les électrolyseurs, les stations de recharge, les poids lourds et les autres équipements sont peu disponibles et présentent des surcoûts importants à l'acquisition⁽⁷⁾ et à l'usage⁽⁸⁾.

Du côté de l'offre, les entreprises tardent à lancer l'industrialisation de la production d'hydrogène tant qu'elles ne sont pas sûres du niveau de la demande. Côté demande, les clients attendent que les prix baissent pour commander des véhicules à hydrogène. C'est l'éternel problème de l'œuf et de la poule.

L'État doit soutenir l'offre pour rendre rapidement disponibles les technologies et les équipements incontournables et favoriser les économies d'échelle. Ce faisant, il doit aussi soutenir la demande lorsque ces solutions ne sont pas (encore) soutenables économiquement pour les entreprises ou les collectivités.

Un des rares effets positifs de la crise actuelle du gaz, c'est d'avoir stimulé la volonté des acteurs économiques d'investir rapidement dans la décarbonation de leurs activités, pour notamment éviter une rupture de leur approvisionnement en gaz cet hiver et limiter l'explosion de leur facture d'énergie.

La course entre les grandes puissances industrielles

Nous vivons tous sur la même planète ; nous sommes tous confrontés aux mêmes effets du réchauffement climatique et aux mêmes défis énergétiques. Ce nouveau monde en transition représente un Eldorado aussi bien pour les acteurs agiles que pour les grands

groupes et les investisseurs qui veulent occuper le terrain avant leurs concurrents.

Si l'on se réfère aux projets (environ 680 à la mi-2022) déjà annoncés publiquement, le marché mondial de l'hydrogène peut être évalué à 240 Mds\$ de dollars d'ici à 2030⁽⁹⁾, et l'Europe est de loin le premier marché (76 Mds\$). Certains pays seront exportateurs nets d'hydrogène, car ils disposent d'un important foncier et d'énergies renouvelables abondantes ; tandis que d'autres seront importateurs d'hydrogène pour alimenter leurs industries et leurs transports.

Les entreprises se positionnent et investissent massivement, avec le fort soutien des autorités de leur pays qui veulent sécuriser à la fois leurs approvisionnements en hydrogène et les débouchés à l'export pour leurs industries. Les grands énergéticiens et leaders mondiaux veulent être présents aux deux bouts de la chaîne (production d'EnR jusqu'à la distribution et l'usage de l'hydrogène). Les entreprises cherchent à éprouver leurs solutions par des tests, acquérir de l'expérience et amorcer des partenariats de long terme avec des pays exportateurs ou importateurs d'hydrogène dans le but de s'ouvrir de nouveaux marchés.

Dès lors, les grands pays industriels ont décidé d'investir massivement dans l'hydrogène, à l'instar du Japon (20 Mds\$), de l'Allemagne, de l'Espagne ou du Portugal (environ 10 Mds\$ pour chacun)⁽¹⁰⁾. Les acteurs privés américains investissent eux aussi rapidement pour être les premiers à intégrer et à contrôler toute la chaîne de valeur de l'hydrogène, tandis que la Chine peut s'appuyer sur son immense marché domestique et sa base industrielle à bas coûts (voir la Figure 1 ci-après et la Figure 2 de la page suivante).

Il y a urgence à soutenir l'innovation, l'industrialisation et le déploiement de l'hydrogène

La France pourrait laisser l'économie avancer à son rythme sans intervenir, car il existe déjà un signal-prix (le marché carbone), des directives et des paquets réglementaires plus ou moins contraignants pour les acteurs économiques ; des études montrant en outre la soutenabilité vers 2030 des solutions à hydrogène.

⁽⁷⁾ Par exemple, un bus à hydrogène peut coûter à l'achat jusqu'à 2 à 3 fois le prix d'un bus diesel.

⁽⁸⁾ La durée de vie et la fiabilité d'une pile à combustible sont inférieures à celles du moteur à combustion, même si des progrès importants sont à venir. Le coût de l'hydrogène décarboné reste beaucoup plus élevé que le prix du gaz naturel qu'il remplace.

⁽⁹⁾ Investissements nécessaires pour développer plus de 680 projets, qui viennent d'être annoncés et se concrétiseront d'ici à 2030, Étude 2022 de McKinsey & Company pour l'Hydrogen Council (en cours de publication et sera en libre accès sur Internet).

⁽¹⁰⁾ Étude McKinsey de janvier 2021, réalisée pour l'Hydrogen Council.



Figure 1 : Positionnement des différents pays sur la voie de l'hydrogène – Source : Hydrogen Council CEO Event.

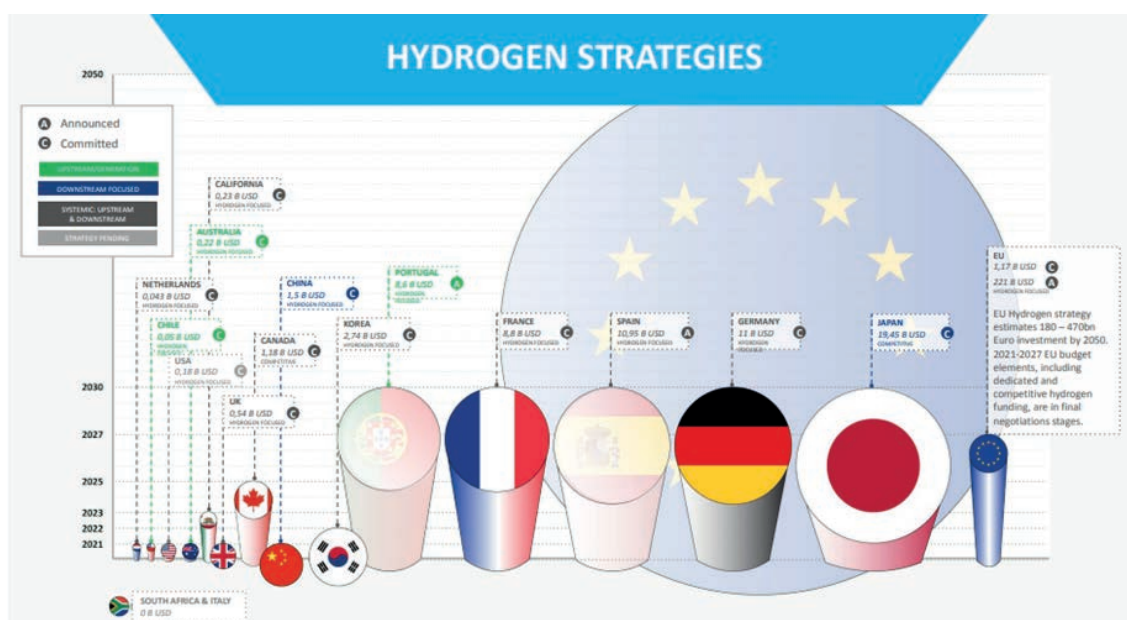


Figure 2 : Effort financier consacré par les différents pays au développement de l'hydrogène – Source : Hydrogen Council CEO Event.

Cependant, les équipements nécessaires pour la production ou l'utilisation de l'hydrogène sont à forte intensité technologique et nécessitent des développements longs et une industrialisation qui l'est tout autant. Sans ces équipements et sans le déploiement d'une filière de production d'hydrogène, de nombreux secteurs industriels et les transports ne pourraient pas se décarboner.

Attendre, c'est prendre le risque que nos entreprises soient devancées par nos concurrents, la France pourrait alors subir une nouvelle vague de désindustrialisation ou de délocalisation, car les mutations liées au changement climatique n'auraient pas été prises en compte suffisamment tôt.

Soutenir l'hydrogène, c'est profiter des externalités positives offertes par la décarbonation imposée à notre économie et préserver notre croissance, malgré notre sortie des hydrocarbures fossiles.

Il y a donc urgence à une intervention de l'État pour que celui-ci partage avec les acteurs privés les risques liés à l'innovation, à l'industrialisation et au déploiement de l'hydrogène, car de nombreux projets de décarbonation, dans l'industrie ou les transports, ne peuvent trouver aujourd'hui leur équilibre économique sans un soutien public notamment pour compenser les "funding gap". La France peut compter pour ce faire sur une recherche de premier plan et sur des leaders industriels dans le domaine de l'hydrogène.

C'est en soutenant à la fois l'offre et l'usage, que la France peut espérer être au rendez-vous de ces défis climatiques mais aussi économiques, en partant à la conquête du marché mondial.

Le cadre des stratégies d'accélération de France 2030

Ces stratégies d'accélération s'inscrivent dans la logique dite « dirigée » du quatrième programme d'investissements d'avenir (le PIA4 devenu France 2030 et qui est doté de 54 Mds€), dont les grandes

lignes ont été annoncées par le Premier ministre en septembre 2020.

Celles-ci ciblent des secteurs, des marchés ou des technologies prioritaires afin d'en soutenir toutes les étapes clés de leur développement en fonction de la maturité des innovations, depuis leur conception jusqu'aux conditions de leur déploiement, favorisant ainsi une meilleure articulation entre l'amont et l'aval des politiques d'aide à l'innovation.

Des moyens financiers importants y sont consacrés pour investir de façon exceptionnelle et massive dans une approche globale : les financements de France 2030 s'ajoutent ou complètent les financements de France Relance ainsi que les moyens d'intervention des ministères, qui accompagnent eux aussi le déploiement par des actions aux niveaux normatif, réglementaire, législatif et européen.

Chaque stratégie est pilotée par un coordinateur interministériel ayant pour mission de suivre l'ensemble des actions menées dans le cadre de celle-ci. Il supervise la mise en œuvre de la stratégie considérée en lien avec les ministères, les experts et les scientifiques compétents réunis au sein d'une unité dédiée appelée « *task force* ». Rattaché au Secrétariat général pour l'investissement (SGPI) ou à un ministère pilote, le coordinateur rapporte au Comex⁽¹¹⁾ du C2i⁽¹²⁾.

⁽¹¹⁾ Le Conseil interministériel de l'innovation (C2i) s'appuie sur un COMEX pour organiser et suivre l'exécution des stratégies nationales. Le COMEX est constitué du Secrétaire général pour l'investissement, des directeurs généraux de la DGE, de la DGRI et de la DGEC et des administrations centrales concernées, ainsi que du Commissaire général au développement durable.

⁽¹²⁾ Le C2i est présidé par le Premier ministre et se compose des ministres concernés par le programme d'investissements d'avenir devenu France 2030. Le secrétariat du Conseil est assuré par le Secrétariat général pour l'investissement. Le C2i est responsable de l'ensemble du volet dit « Dirigé » de la convention de mise en œuvre du plan et valide, sur proposition du comité exécutif, les stratégies nationales mobilisant tout ou partie des crédits qu'il alloue.

Une gouvernance interministérielle renouvelée

Tout en apportant des moyens financiers supplémentaires, le plan d'investissement France 2030 a simplifié la gouvernance : la stratégie d'accélération de l'hydrogène décarboné (objet de cet article) partage désormais une gouvernance commune avec une autre stratégie, celle de la décarbonation de l'industrie. Ce rapprochement est logique, parce que l'hydrogène est avant tout un levier de cette dernière stratégie et parce que les grands projets de décarbonation des aciéries, des cimenteries et de l'industrie chimique au moyen de l'hydrogène se trouvent à l'intersection des deux stratégies d'accélération précitées.

Ainsi, les deux *task force* interministérielles, qui pilotaient les stratégies Hydrogène décarboné et Décarbonation de l'industrie, que j'ai l'honneur de coordonner, ont été fusionnées pour devenir le Comité de pilotage ministériel opérationnel Hydrogène décarboné et Décarbonation de l'industrie (CPMO).

Cette nouvelle instance interministérielle réunit la direction générale des Entreprises, la direction générale de l'Énergie et du Climat, le Conseil général du développement durable, la direction générale de la Recherche et de l'Innovation, la direction générale de l'Enseignement supérieur et de l'Insertion professionnelle, le Secrétariat général pour l'investissement, les opérateurs BpiFrance, l'Ademe, l'Agence nationale pour la recherche et, en tant que de besoin, la direction générale des Infrastructures, des Transports et des Mobilités et la direction générale de l'Aviation civile. Cette instance pilote désormais l'exécution des deux stratégies précitées et leurs éventuelles adaptations.

Dans sa configuration de haut niveau, elle réunit le ministre délégué chargé de l'Industrie, le ministre de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique, la ministre de la Transition énergétique, le Secrétaire général pour l'investissement ainsi que les personnalités qualifiées extérieures à l'administration.

Cette instance a une vision de l'ensemble des projets instruits par les opérateurs (Ademe, BpiFrance, ANR). Le dialogue interministériel est conduit en permanence, que ce soit au niveau stratégique ou au niveau des projets. Et l'ensemble des politiques publiques, qui gravitent autour de l'innovation, de la souveraineté et du développement industriel, ou encore de la planification énergétique et de la protection du climat et de l'environnement, et des compétences sont mises en cohérence pour être au service des deux stratégies précitées. À ces différents volets s'ajoute désormais l'international, volet sur lequel la direction générale du Trésor et les services du ministère de l'Europe et des Affaires européennes (MEAE) apportent leurs compétences.

Des moyens financiers alloués massivement et une ambition mondiale

La stratégie nationale d'accélération, adoptée en septembre 2020, prévoyait initialement d'apporter un soutien public au développement de l'hydrogène

bas-carbone à hauteur de 7,2 Mds€ jusqu'en 2030, dont :

- 4,78 Mds€ provenant du budget du ministère de la Transition écologique ;
- 1,275 Mds€ intégrés dans le Plan de relance ;
- 1 Mds€ environ provenant du programme d'investissements d'avenir (devenu France 2030).

Le plan d'investissement France 2030⁽¹³⁾ a, fin 2021, apporté un financement supplémentaire de 1,9 Mds€ en faveur de la stratégie Hydrogène bas-carbone, qui se trouve ainsi dotée finalement d'une enveloppe de crédits de 8,9 Mds€ à engager d'ici à 2030.

La stratégie française vise la décarbonation de l'économie, l'autosuffisance sur le plan de la production de l'hydrogène et le leadership mondial en la matière

Prérequis pour comprendre la stratégie française

Des enjeux nationaux qui servent une ambition mondiale

La stratégie développée par la France vise à la fois à produire l'hydrogène dont elle a besoin (enjeu d'indépendance) et à accélérer les applications industrielles de l'hydrogène et son utilisation dans le domaine de la mobilité lourde et intensive (enjeu de décarbonation de son économie), tout en maîtrisant les technologies et la fabrication des composants clés (enjeu de souveraineté), de manière synchrone, pour se placer en tête de la compétition mondiale (enjeu économique, notamment en termes d'emploi).

C'est une stratégie qui sert, tout d'abord, à la décarbonation de l'économie française, lorsque l'hydrogène apparaît comme la solution la plus pertinente au plan technique et économique. Mais elle doit aussi viser l'export, car les investissements très lourds consentis dans les *gigafactories* françaises ne peuvent être amortis en se limitant au seul marché national. La courbe d'expérience acquise et les références relatives au déploiement publiées sur le site vitrine « France » doivent servir l'export. C'est pourquoi le Président de la République a fixé, dans le cadre de France 2030, un objectif, celui de détenir le *leadership* au niveau mondial pour la filière Hydrogène.

L'hydrogène sera partout, mais il n'est pas la réponse à tout

La production d'hydrogène par électrolyse nécessite beaucoup d'électricité, jusqu'à 58 kWh pour seulement 1 kg d'hydrogène produit. Au-delà de l'hydrogène, la décarbonation de l'économie va accroître très fortement le besoin en électricité décarbonée et en infrastructures réseaux : ainsi, l'hydrogène doit être réservé aux seuls

⁽¹³⁾ France 2030 a apporté 34 Mds€ supplémentaires aux 20 Mds€ du PIA4 qu'il a absorbé ; l'on parle désormais de 54 Mds€ d'ici à 2030.

usages de décarbonation qui ne peuvent être réalisés autrement. La voie de l'hydrogène doit être mise en concurrence avec d'autres solutions de décarbonation sur la base du critère du coût à la tonne de CO₂ évitée.

Quand une utilisation directe de l'électricité est possible, cette dernière a toutes les chances d'afficher de meilleurs rendements énergétiques que l'hydrogène, elle devra donc être privilégiée. Ainsi, les usages en matière de chauffage des bâtiments ou l'injection de l'hydrogène en mélange dans le réseau de gaz, ou encore les procédés de production recourant à la combustion de l'hydrogène ne seront pas soutenus par des aides publiques (excepté dans des zones non interconnectées (ZNI) ou pour répondre aux besoins en haute température de certains *process*).

La stratégie ne soutiendra pas plus le développement de voitures particulières à hydrogène, car en la matière la batterie constitue le meilleur choix, offrant un rendement électrique supérieur à 70 % (charge, décharge, moteur...), alors que celui de la pile à combustible est actuellement d'environ 23 %⁽¹⁴⁾ (en intégrant les pertes au niveau de l'électrolyseur, de la compression, de la pile à combustible (PAC), du moteur – voir la Figure 3 ci-dessous).

La stratégie française de l'hydrogène décarboné

La stratégie française pour le développement de l'hydrogène décarboné, inscrite dans le plan d'investissement France 2030, fixe trois objectifs complémentaires.

Bien qu'elle couvre tout le spectre de l'innovation, elle se différencie des autres stratégies par les moyens très importants qui sont consacrés à l'industrialisation et au déploiement de l'hydrogène (voir la Figure 4 de la page suivante).

Installer suffisamment d'électrolyseurs pour pouvoir alimenter le marché national

Objectif en termes de capacité installée d'électrolyse...

Pour des raisons de souveraineté et d'arrêt progressif de l'exploration et de l'exploitation des hydrocarbures, la France a fait le choix de produire l'hydrogène

décarboné sur son sol, sans recourir aux combustibles fossiles (ce qui exclut le vaporeformage même couplé à du CCS ou du CCU⁽¹⁵⁾).

La stratégie de la France prévoit l'installation d'une capacité de production par électrolyse de 6,5 GW d'hydrogène d'ici à 2030. Ce chiffre résulte d'un consensus au sein de l'État prenant en compte, d'une part, les capacités électriques additionnelles d'ici à 2030 et, d'autre part, le volume d'hydrogène gris actuellement consommé et substituable.

Les électrolyseurs seront positionnés au plus près des lieux d'utilisation de l'hydrogène, que ceux-ci servent dans des usines ou pour la mobilité. Ils seront branchés principalement sur le réseau électrique français, qui est déjà largement décarboné.

Cette capacité d'électrolyse permettra de produire à partir de 2030 environ 650 000 tonnes d'hydrogène par an. Ce sera ainsi l'émission de 6 millions de tonnes de CO₂ qui pourra être évitée, rien qu'au niveau de la production de cet hydrogène, soit l'équivalent des émissions annuelles de la ville de Paris ou de 350 000 voitures à essence.

Une étude réalisée en 2021, pour le compte de France Hydrogène, chiffre les besoins en hydrogène décarboné à 680 000 tonnes en 2030 (scénario de référence). Cette étude vient conforter les prévisions de l'État et les orientations de la stratégie nationale (voir la Figure 5 de la page suivante).

... et de disponibilité des équipements et de l'électricité

Il est indispensable de mettre en place en France toute la chaîne de valeur, laquelle passe par la production, le stockage, le transport et la distribution de l'hydrogène, mais aussi celle de tous les composants et systèmes nécessaires pour son usage dans les secteurs de la mobilité lourde et de l'industrie, voire celui de l'énergie. À cet effet, la France devra disposer d'usines de production d'équipements qui soient capables de répondre à temps à la demande, ainsi que de suffisamment d'électricité décarbonée pour pouvoir produire l'hydrogène nécessaire.

⁽¹⁴⁾ ADEME (2020) : « Rendement de la chaîne à hydrogène, cas du *power to H2 to power* », <https://bibliothèque.ademe.fr/mobilite-et-transport/1685-rendement-de-la-chaine-hydrogene.html>

⁽¹⁵⁾ Procédés de Carbon Capture & Storage (CCS) et de Carbon Capture & Usage (CCU).

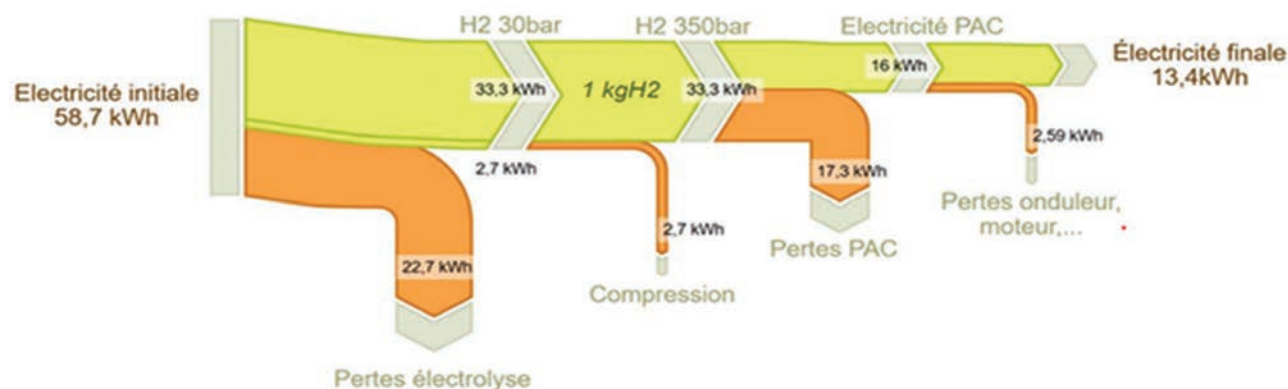


Figure 3 : Diagramme de Sankey exprimant l'énergie nécessaire pour produire 1 kg d'hydrogène, ainsi que l'énergie électrique en résultant.

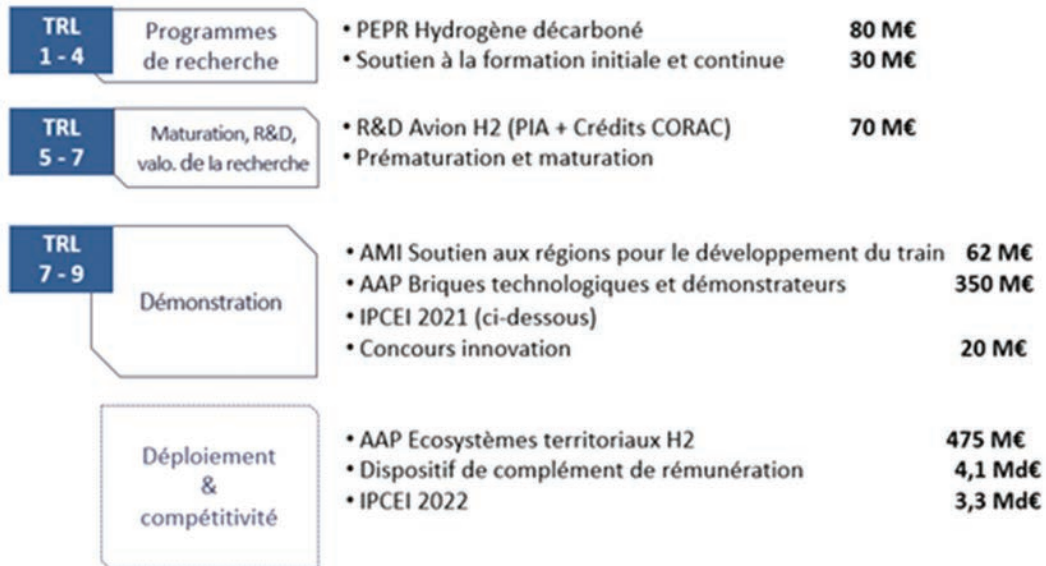


Figure 4 : Les principaux dispositifs de soutien financier dédiés à l'hydrogène – Source : France 2030.

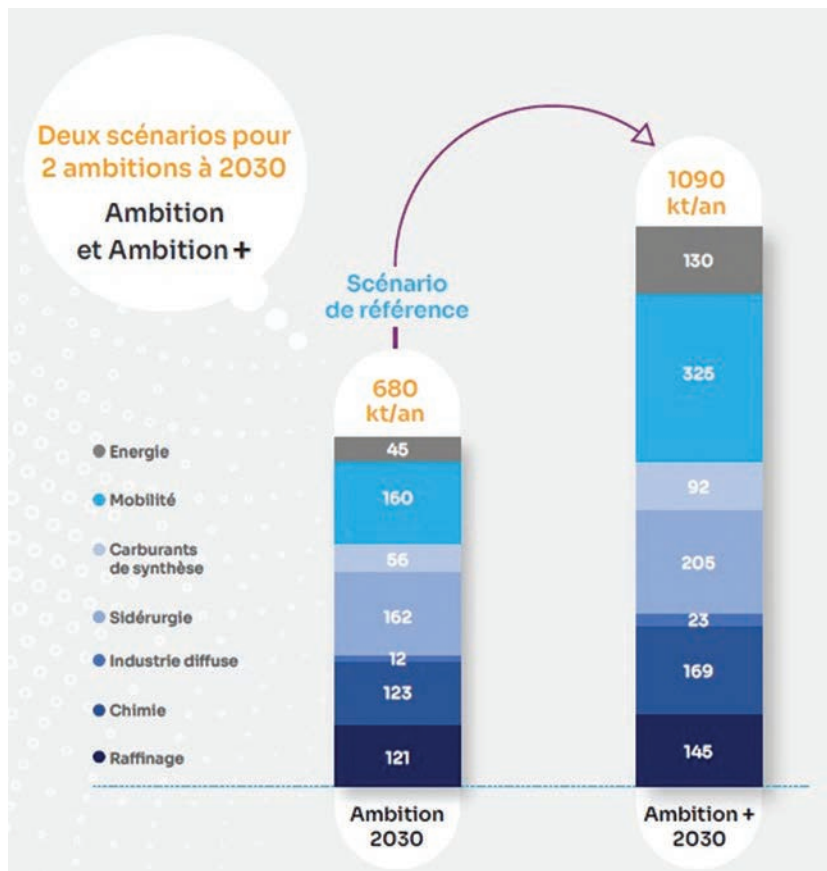


Figure 5 : Les différents scénarios à horizon 2030 – Source : France Hydrogène (2021), « Trajectoire pour une grande ambition Hydrogène »⁽¹⁶⁾.

⁽¹⁶⁾ Hincio (2021), « Trajectoire pour une grande ambition Hydrogène », étude réalisée pour France Hydrogène, <https://www.france-hydrogene.org/publication/trajecoire-pour-une-grande-ambition-hydrogene/>

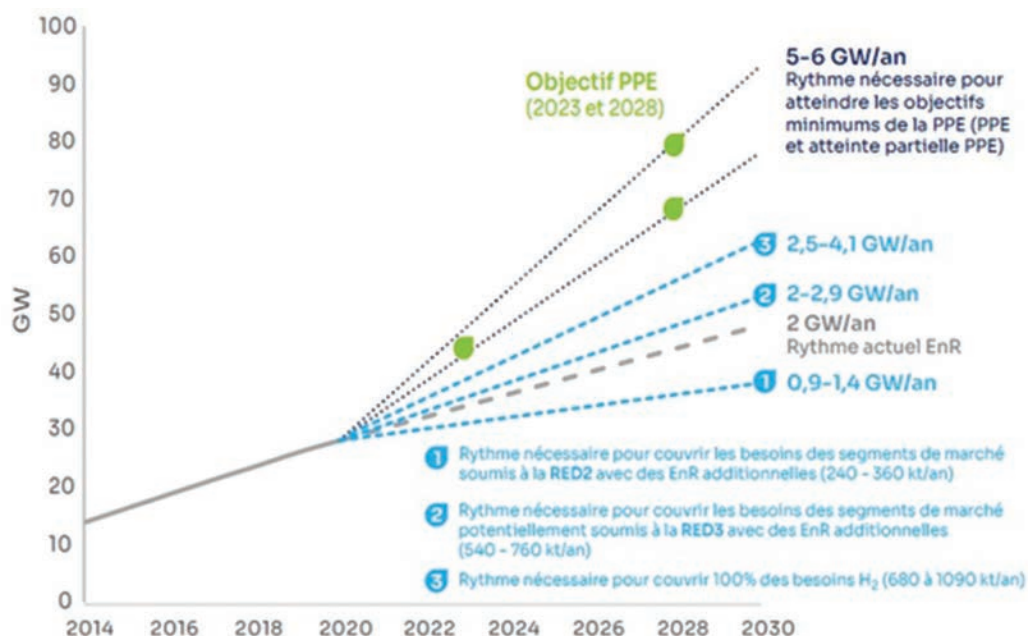


Figure 6 : Objectif PPE (Programmation pluriannuelle de l'énergie) – Source : France Hydrogène (2021), « Trajectoire pour une grande ambition Hydrogène »(17).

Des études de la DGEC et de RTE ainsi que des études réalisées pour le compte de France Hydrogène et du Conseil national de l'hydrogène confirment le fait que la France disposera *a priori* des capacités additionnelles électriques nécessaires pour alimenter les 6,5 GW d'électrolyseurs prévus en 2030 (voir la Figure 6 ci-dessus).

Dispositifs de soutien pour réaliser l'objectif précité

Pour soutenir cet objectif, l'État a prévu principalement deux dispositifs.

Le premier est l'IPCEI⁽¹⁸⁾ Hydrogène qui doté de 3,275 Mds€ par le biais de France Relance et France 2030, va permettre de financer des *gigafactories* d'électrolyseurs, des équipements pour la mobilité (piles à combustible, réservoirs, matériaux...) ou des trains à hydrogène, ainsi que des projets de décarbonation de l'industrie lourde (production d'aciers et de ciments verts, notamment).

Parmi les dix premiers dossiers IPCEI qui ont été notifiés par la France à la Commission en juin 2022 et qui pourront donner lieu à un engagement financier de l'État de l'ordre de 2,3 Mds€ à partir de septembre 2022, quatre concernent des usines de production d'électrolyseurs couvrant toutes les technologies (alcalins, PEM ou électrolyse haute température SOEC).

Ces usines sont certes encore sur le chemin critique de la réalisation de l'objectif précité, mais leurs calendriers de montée en charge, leur capacité élevée de production, leur redondance en termes d'activité et la baisse des coûts de production attendue permettent de sécuriser l'approvisionnement national en électrolyseurs.

Le deuxième dispositif de soutien à la production d'hydrogène décarboné par un complément tarifaire est doté de 4,2 Mds€ provenant principalement du budget du ministère de la Transition énergétique : il a été prévu pour compenser le surcoût de l'hydrogène décarboné produit par électrolyse (3 à 5 fois le coût de l'hydrogène gris⁽¹⁹⁾, grâce au financement apporté pour compenser les dépenses CAPEX et OPEX supportées par les producteurs sur une période de dix à vingt ans. Le dispositif devrait permettre de soutenir une capacité de production d'hydrogène de 1 GW. Ce projet a été prénotifié à la Commission, le lancement des premiers appels d'offres est attendu pour le début 2023.

Rappelons que la parité de prix entre l'hydrogène gris et l'hydrogène décarboné pourrait être atteinte vers 2030, grâce, d'une part, à l'augmentation du coût de la tonne de CO₂ et, d'autre part, aux travaux de R&D, ainsi qu'aux économies d'échelle permises par l'entrée en service des *gigafactories* d'électrolyseurs (voir la Figure 7 de la page suivante).

Développer les mobilités lourdes et la décarbonation de l'industrie

Objectif

En parallèle d'une première phase de conversion de nos transports terrestres de passagers et de marchandises aux technologies hydrogène (véhicules utilitaires

⁽¹⁷⁾ Hincio (2021), « Trajectoire pour une grande ambition Hydrogène », étude réalisée pour France Hydrogène, <https://www.france-hydrogene.org/publication/trajec-toire-pour-une-grande-ambition-hydrogene/>

⁽¹⁸⁾ Important Projects of Common European Interest (ou PIIEC, en français). Le PIIEC est un mécanisme européen qui autorise les États membres à un financement de l'innovation et l'industrialisation dans des domaines stratégiques allant au-delà des limites habituellement fixées par la réglementation européenne en matière d'aides d'État (voir l'article d'Olivier Marfaing consacré à ce sujet).

⁽¹⁹⁾ Évaluation réalisée avant l'actuelle crise énergétique liée à la guerre en Ukraine.

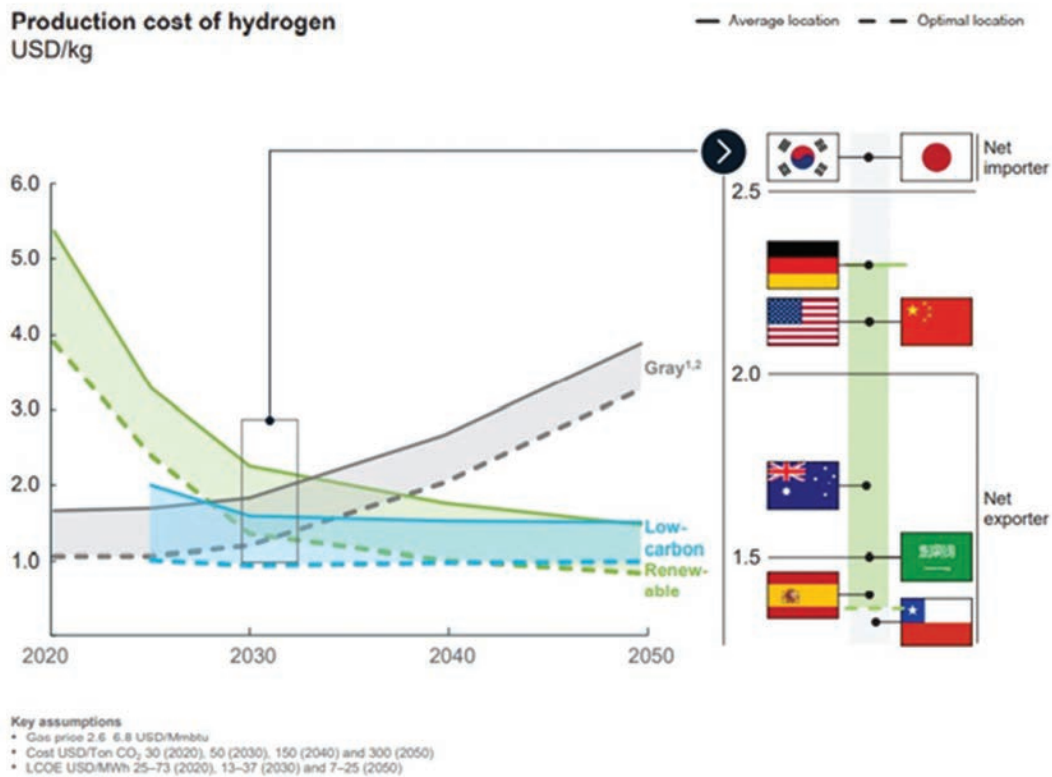


Figure 7 : Coût de production de l'hydrogène – Source : Étude McKinsey (2021)⁽²⁰⁾.

et poids lourds, bus, trains à hydrogène), des projets pilotes seront conduits en vue de la production de navettes fluviales, de navires et d'avions fonctionnant à l'hydrogène.

Par ailleurs, France 2030 vise à remplacer par de l'hydrogène décarboné la majeure partie de l'hydrogène gris utilisé dans des industries telles que le raffinage, la chimie ou pour la production d'engrais.

Un soutien sera aussi apporté au développement de nouveaux usages de l'hydrogène afin notamment de décarboner des secteurs industriels tels que la sidérurgie (en substitution au charbon) et les cimenteries (par capture du CO₂ émis et production de méthanol).

Dispositifs de soutien pour réaliser l'objectif précité

L'appel à projets « Briques technologiques et démonstrateur hydrogène », opéré par l'Ademe et doté de 350 M€ dans le cadre de France 2030, soutient en particulier la conception et la démonstration de nouveaux véhicules (poids lourds, véhicules utilitaires, bateaux, matériels ferroviaires, véhicules *off road*) ainsi que les équipements associés (réservoirs, piles à combustible). À ce jour, la fabrication de nombreux engins *off-road* (des dameuses, des engins agricoles), mais aussi des groupes motopropulseurs à forte puissance à pile à combustible et des bus à hydrogène, a été soutenue. Il est à noter que plusieurs projets de moteurs à combustion à hydrogène, portés par des consortia d'acteurs majeurs de la filière automobile sont eux aussi

soutenus : il s'agit de projets stratégiques pour la reconversion de la filière moteur » de l'industrie automobile, mais aussi pour la filière logistique et poids lourds, qui ne disposent pas de solutions pour se décarboner. Ces projets doivent permettre de relever les défis en matière de rendement et d'émission de NOx.

L'IPCEI Hydrogène (voir *supra*), outre le soutien qu'il apportera à la fabrication d'électrolyseurs, devrait également soutenir la création de *gigafactories* de production de matériels roulants à hydrogène chez Alstom, de piles à combustible chez Symbio (Forvia et Michelin) et Hyvia (Renault Group et Plug Power) et de réservoirs conformes chez Forvia ou Plastic Omnium.

L'IPCEI pourrait aussi aider à la décarbonation de la bioraffinerie de la Mède, du site d'ArcelorMittal de Dunkerque (remplacement d'un haut fourneau par une ligne DRI de réduction du minerai par un mélange gaz naturel et hydrogène décarboné) et d'une cimenterie du groupe Vicat (sur la base du CCU et de la production de méthanol).

Ces projets IPCEI ont fait l'objet d'une notification (en ce qui concerne les *gigafactories* pour la mobilité) ou d'une prénotification (projets de décarbonation de l'industrie) et sont en attente de validation par la Commission.

L'appel à projets « Écosystèmes territoriaux Hydrogène », doté de 475 M€ par le ministère de la Transition énergétique (MTE) et France 2030, vise à déployer les premiers « écosystèmes » d'hydrogène dans les territoires. À cette fin, il a vocation à aider les collectivités ou les acteurs privés à se doter d'électrolyseurs, de stations de rechargement ou encore d'équipements de transport à hydrogène (bateaux, bus,

⁽²⁰⁾ McKinsey & Compagny (2021), "Hydrogen Insights 2021", étude réalisée pour Hydrogen Council, <https://hydrogencouncil.com/en/Hydrogen-Insights-2021/>

cars...). D'ores et déjà, quinze écosystèmes ou extensions d'écosystèmes territoriaux Hydrogène, représentant 36 MW d'électrolyseurs au total, vingt stations de rechargement et 270 poids lourds et véhicules utilitaires ont été soutenus pour un montant de 105 M€.

Construire en France une filière industrielle qui soit créatrice d'emplois et garante de notre maîtrise technologique

Objectif

L'hydrogène, sur l'ensemble de son cycle (de sa production jusqu'à son usage), peut générer entre 50 000 et 150 000 emplois directs et indirects en France. La filière industrielle de production de l'hydrogène ainsi que les filières utilisatrices de ladite molécule seront accompagnées pour qu'elles maximisent le développement d'emplois verts à pourvoir par des travailleurs français et garantir la maîtrise sur notre territoire de briques technologiques critiques.

Dispositifs de soutien pour réaliser l'objectif

Un appel à projets, transverse à l'ensemble des stratégies d'accélération et dénommé « Compétence et métiers d'avenir », a été lancé pour soutenir des projets de réalisation de diagnostics de compétence, mais aussi des projets en matière de formation.

Une stratégie en mouvement qui s'adaptera en fonction des évolutions techniques, économiques et des orientations européennes

Divergence entre la stratégie allemande et celle de la France

L'Allemagne n'a pas d'autre choix que d'importer de l'hydrogène vert

Les besoins allemands en hydrogène « vert » à l'horizon 2030 sont estimés entre 2,7 et 3,3 Mt (principalement pour son industrie). Ils sont 3 à 4 fois supérieurs aux besoins de la France (de 0,6 à 1 Mt).

Ce sont pour l'Allemagne de 90 à 110 TWH/an d'électricité verte qui seront nécessaires en 2030 pour l'électrolyse. Si l'Allemagne devait substituer l'hydrogène gris produit et consommé actuellement par son industrie, elle aurait besoin de disposer dès aujourd'hui de 55 TWH d'électricité supplémentaire.

Or, par manque d'électricité d'origine renouvelable sur son territoire, l'Allemagne ne prévoit de produire, en 2030, que 420 kt d'hydrogène vert, correspondant à une capacité d'électrolyse de 5 GW. C'est ce qui l'a conduite à axer sa stratégie⁽²¹⁾ sur l'importation d'environ 75 % de l'hydrogène vert dont elle a besoin⁽²²⁾.

⁽²¹⁾ BMWi (2020), "Die Nationale Wasserstoffstrategie".

⁽²²⁾ L'actuel gouvernement allemand, au vu de la crise du gaz notamment, est en train de doubler les objectifs de production locale d'hydrogène vert pour la porter à 10 GW. Mais cela ne change pas fondamentalement le diagnostic.

Pour cela, elle consacre 1 Md€ au financement de projets de coopération internationale avec des entreprises étrangères, typiquement des entreprises présentes dans des pays potentiellement exportateurs d'hydrogène vert (par exemple, l'Australie).

De même, elle alloue un même montant de 1 Md€ pour sa plateforme H2global : un système d'appel d'offres à double enchère pour que celle-ci achète de l'hydrogène vert à l'international (en Europe, tout d'abord, mais aussi en Arabie saoudite, au Chili, en Australie ou en Afrique du Nord) avant de le revendre aux industriels allemands (en compensant une partie du coût, correspondant, lorsque c'est le cas, à un prix de l'hydrogène vert supérieur à celui de l'hydrogène gris). L'Allemagne pousse, avec le soutien de la Commission, à la création d'une plateforme H2global au niveau européen dans le cadre du paquet « RepowerEU »⁽²³⁾.

Enfin, du fait d'une forte présence de son industrie dans le sud du pays, alors que ses ressources en EnR sont situées dans le nord, comme le seront les futurs terminaux d'importation d'hydrogène, l'Allemagne va devoir consacrer plusieurs milliards d'euros pour développer un réseau de *pipelines* pour transporter l'hydrogène. Dans le cadre de l'IPCEI Hydrogène, elle a sélectionné 62 projets représentant une enveloppe d'aides de 8 Mds€, dont quinze concernent la construction des infrastructures de transport d'hydrogène par *pipelines* sur environ 1 700 km. Ce sont principalement des infrastructures de transport de gaz reconverties, même s'il y aura aussi la construction de quelques *pipelines* neufs de transport d'hydrogène.

De son côté, la France a fait le choix d'un investissement sans regret dans les électrolyseurs et ne financera pas les infrastructures de transport à court terme

Contrairement à l'Allemagne, la France dispose de la capacité électrique nécessaire pour produire suffisamment d'hydrogène décarboné en réponse aux besoins de son industrie (qui cependant n'a pas le même poids que l'industrie allemande).

Elle a fait le choix de déployer massivement des électrolyseurs, branchés sur le réseau électrique, et donc au plus près des lieux d'utilisation, pour décarboner son industrie et la mobilité lourde. Ce faisant, elle profite de son réseau électrique décarboné existant (nonobstant la nécessité pour RTE de renforcer l'infrastructure électrique pour permettre de réaliser un certain nombre de projets d'électrolyse). Elle minimise ainsi les coûts de transport et de distribution de l'hydrogène et peut en déployer tout de suite la production, sans attendre les autorisations qu'exigent les lourds travaux nécessaires au développement des *pipelines* de transport de l'hydrogène.

⁽²³⁾ Le plan « REPowerEU » définit une série de mesures visant à réduire rapidement la dépendance de l'Union européenne (UE) à l'égard des combustibles fossiles russes et à accélérer la transition écologique, tout en renforçant la résilience du système énergétique à l'échelle de l'UE. Ce plan repose sur une diversification des approvisionnements, le développement des EnR et la sobriété énergétique.

Deux études menées par France Hydrogène et par le Comité stratégique de filière « Nouveaux systèmes énergétiques » montrent que l'investissement dans les électrolyseurs est pour la France un investissement « sans regret » et que les infrastructures de transport d'hydrogène par canalisation pourraient être source de nombreux avantages, mais pas avant 2030 :

- L'étude Hincio, de juillet 2021, réalisée pour France Hydrogène, a estimé un besoin de 6,5 GW d'électrolyseurs (scénario de référence) correspondant à 6 Md€ d'investissement et à 685 km de canalisations intra-bassins en 2030 (au plan national, sept grands bassins à hydrogène ont été identifiés) pour un coût de 1 Md€ (voir la Figure 8 ci-après).
- L'étude GuideHouse (2021) réalisée pour le Comité stratégique de filière « Nouveaux systèmes énergétiques » (CSF NSE) et consacrée au « Rôle des infrastructures de transport et de stockage d'hydrogène »⁽²⁴⁾, a conclu notamment que « la modélisation conduite indique qu'en massifiant les capacités de production, la mise en œuvre d'infrastructures hydrogène entre les bassins industriels permettrait de réduire le coût de l'hydrogène livré de 10 % d'ici à 2030... ».

Dans un volet additionnel de l'étude, à la demande du CNH, GuideHouse s'est intéressée à l'hypothèse d'une mise en concurrence de la production d'hydrogène décarboné avec une éventuelle production de ce gaz par des installations recourant au vaporeformage (à partir de gaz naturel), mais en y adjoignant le stockage du CO₂ (voie écartée par la France). Il est intéressant de constater que le modèle simulé démontre qu'il sera

⁽²⁴⁾ Étude réalisée pour le CSF NSE à l'initiative de GRTgaz, de HDF Energy, Soladvent, de Storengy, de Teréga et de TotalEnergies, <https://systemesenergetiques.org/le-role-des-infrastructures-de-transport-et-de-stockage-dhydrogene-un-enjeu-de-competitivite-industrielle/>

toujours nécessaire de recourir à l'électrolyse, pour une capacité certes un peu plus faible, mais se situant cependant entre 2,2 et 2,9 GW.

Les points d'inflexion possibles de la stratégie française

S'il n'y a pas d'éléments objectifs à cette heure pour remettre en cause la stratégie française, un certain nombre de sujets doivent encore être suivis de près, car ils peuvent infléchir les orientations de la stratégie précitée.

Les infrastructures de transport par pipelines

La question des besoins en matière d'infrastructures de transport par *pipelines* de l'hydrogène devra être reposée avant 2025. En effet, les études réalisées précédemment ont montré que, même dans un modèle de production par électrolyseurs et avec le développement des usages massifs d'hydrogène vers 2030, les *pipelines* irrigant l'intérieur des grands bassins industriels d'hydrogène mais aussi reliant ces bassins entre eux pourraient faire baisser le coût de l'hydrogène livré ainsi que les coûts d'investissement global des infrastructures de production et de transport. Or, pour disposer d'un réseau de canalisations de transport d'hydrogène suffisamment développé en 2030, il faut lancer le projet cinq ans avant, c'est-à-dire en 2025.

Ponctuellement, un certain nombre de projets de canalisations de transport peuvent trouver leur utilité pour relier des industriels gros consommateurs d'hydrogène à un producteur distant de plusieurs kilomètres. C'est à ce titre que RTE dialogue avec GRTgaz, notamment pour savoir quelle serait l'infrastructure (électrique ou au gaz) la plus pertinente à développer pour déployer l'hydrogène au cas par cas.

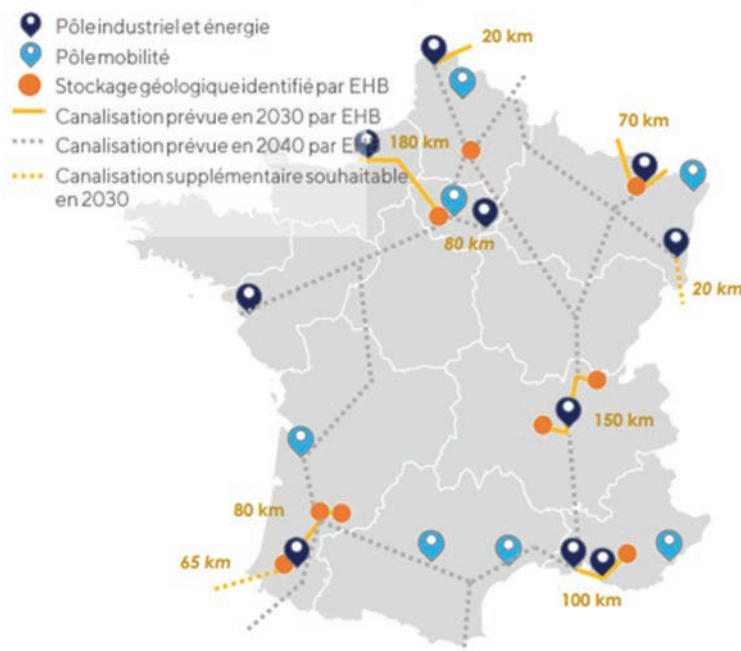


Figure 8 : Étendue du réseau de canalisations de transport de l'hydrogène nécessaire pour raccorder les grands pôles industriels et d'énergie – Source : EU H2 backbone (EHB : European Hydrogen backbone).

S'agissant des projets d'infrastructures transfrontalières (par exemple, cas où le producteur d'hydrogène est en France et l'usine consommatrice en Allemagne), la question du partage des coûts CAPEX et OPEX doit également être posée, car les soutiens financiers apportés par la France ne doivent pas servir à financer la décarbonation des pays voisins.

Compétitivité de l'hydrogène importé en Europe

La stratégie française de production autonome d'hydrogène est à contre-courant de la stratégie allemande, laquelle, comme indiqué *supra*, est basée sur une importation massive. Or, cette stratégie allemande d'importation sera très certainement reprise et même amplifiée par la Commission européenne dans le cadre du plan « RepowerEU ». L'importation massive d'hydrogène « vert » en Europe (venant de certains pays d'Europe du Sud ou d'Europe du Nord, mais aussi d'Arabie saoudite, du Chili, d'Australie ou d'Afrique du Nord) pourrait venir concurrencer la production française d'hydrogène (mais aussi la production indigène allemande).

Déjà, un premier projet de l'américain Air Products d'implantation d'un terminal d'ammoniac à Rotterdam (l'ammoniac sera retransformé en hydrogène vert à l'arrivée) a été annoncé, il devrait être opérationnel en 2026. Il sera ainsi en mesure d'acheminer vers l'Europe la production d'environ 650 kt d'hydrogène vert par an en provenance de son site de Neom en Arabie saoudite.

Ces quantités paraissent très importantes au regard de la production française envisagée par électrolyse (exactement 650 kt/an en 2030), mais il faut bien avoir à l'esprit que les besoins de l'Allemagne et d'autres pays européens s'annoncent encore plus élevés.

Par ailleurs, on a peu de visibilité sur le prix, livré, de l'hydrogène ainsi importé et sur son contenu carbone final (si l'ammoniac est plus facile à transporter que l'hydrogène liquéfié, la transformation successive de l'hydrogène en ammoniac, puis en hydrogène, ainsi que la logistique associée génèrent un coût énergétique et un coût carbone qu'il convient de prendre en compte).

Chaîne de l'ammoniac

La stratégie française n'a pas prévu une utilisation de l'hydrogène décarboné sous forme d'ammoniac. Si la molécule d'ammoniac gagne la partie et son utilisation est généralisée dans la chimie, dans les moteurs à combustion ou dans les piles à combustible, la France devra alors adapter sa stratégie.

Directive RED III et RFNBO⁽²⁵⁾

Au niveau européen, la France défend l'idée d'un hydrogène décarboné produit à partir d'une électricité qui l'est aussi, notamment celle d'origine nucléaire, tandis que d'autres États membres souhaitent imposer l'utilisation d'une électricité produite à 100 % à partir d'énergies renouvelables pour atteindre des objectifs élevés d'incorporation dans les secteurs de la mobilité et de l'industrie. Si l'électricité décarbonée ne peut pas être prise en compte dans le cadre des directives

précitées, un certain nombre de projets de décarbonation de l'industrie (notamment de capture du CO₂, puis de production d'e-fuels/RFNBO à partir d'hydrogène décarboné) ne trouveront pas les débouchés nécessaires pour équilibrer leur modèle économique.

Les enjeux technologiques

Les innovations incrémentales ou de rupture peuvent accélérer le déploiement de l'hydrogène et conforter la stratégie française de production indigène de cette molécule. Les innovations technologiques particulièrement recherchées doivent permettre :

- d'augmenter le rendement et la fiabilité des électrolyseurs (augmentation des densités de courant, mise au point des électrolyseurs AEM (à membranes échangeuses d'anions) ou à haute température SOEC (cellules électrolytiques à oxyde solide) ;
- de produire l'hydrogène grâce à des procédés plus compétitifs ou recourant à des ressources nouvelles (par exemple, la thermolyse et la pyrogazéification – qui consomment moins d'énergie que l'électrolyse – de certaines biomasses (à la condition que ces dernières soient disponibles et exemptes de tout conflit d'usage) ou de combustibles solides de récupération (CSR)) ;
- de faire baisser le coût des équipements (par exemple, en diminuant la quantité des métaux stratégiques utilisés dans les piles à combustible et les électrolyseurs) ou d'augmenter leur durée de vie ;
- de déployer à moindre coût l'hydrogène dans la mobilité lourde (par exemple, il faut investiguer la piste du moteur à combustion à hydrogène, des piles à combustible à forte puissance et moins chères, des réservoirs conformes...) ;
- de faciliter le stockage et le transport de l'hydrogène.

Bibliographies

MCKINSEY & COMPAGNY (2021), "Hydrogen Insights 2021", étude réalisée pour Hydrogen Council, <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2021/>

ADEME (2020), « Rendement de la chaîne à hydrogène, cas du *power to H2 to power* », <https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/1685-rendement-de-la-chaine-hydrogene.html>

HINICIO (2021), « Trajectoire pour une grande ambition Hydrogène », étude réalisée pour France Hydrogène, <https://www.france-hydrogene.org/publication/trajectoire-pour-une-grande-ambition-hydrogene/>

BMW (2020), "Die Nationale Wasserstoffstrategie", <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/the-national-hydrogen-strategy.pdf>

GUIDEHOUSE (2021), « Rôle des infrastructures de transport et de stockage d'hydrogène », étude réalisée pour le CSF NSE à l'initiative de GRTgaz, de HDF Energy, de Soladvent, de Storengy, de Teréga et de TotalEnergies, <https://systemesenergetiques.org/le-role-des-infrastructures-de-transport-et-de-stockage-dhydrogene-un-enjeu-de-competitivite-industrielle/>

⁽²⁵⁾ RED : Renewable Energy Directive ; RFNBO : Renewable Fuels of non biological origin.

RTE (2020), « La transition vers un hydrogène bas-carbone. Atouts et enjeux pour le système électrique à l'horizon 2030-2035 », <https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-07/rapport%20hydrogene.pdf>

RTE (2021), « Futurs énergétiques 2050 », <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques>

ADEME (2021), « Transition(s) 2050 : choisir maintenant, agir pour le climat », <https://transitions2050.ademe.fr/>