Séance du 5 mars 2024

ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES
POUR UN PROGRÈS RAISONNÉ, CHOISI ET PARTAGÉ

Conférence-débat de Florence Lambert avec Patrick Maestro

LE PASSAGE À L'ÉCHELLE DES TECHNOLOGIES DE L'HYDROGÈNE

L'hydrogène est une priorité pour la souveraineté énergétique. Il a été propulsé au premier plan avec la stratégie nationale annoncée en 2020 par le gouvernement, et les objectifs de neutralité carbone à horizon 2050. Il a beaucoup été écrit sur les couleurs de l'hydrogène, ce qui rappelle qu'il en existe plusieurs formes, mais surtout qu'il est fondamental de se préoccuper de la façon de le produire. Le plus important n'est pas tant la couleur que l'impact environnemental. Et il importe aujourd'hui de s'assurer que ces productions vont être couplées à la montée en puissance des réseaux d'énergie renouvelable.

Comment produire l'hydrogène le plus « propre » possible ? Comment le stocker, le transporter ? Comment le manipuler en minimisant les risques ? Les problématiques sont nombreuses sur le sujet, et les questions ouvertes.

D'aucuns s'inquiètent pour l'avenir des acteurs de l'hydrogène. Mais de jeunes sociétés, comme Genvia, relèvent le défi, et prennent à bras le corps cette phase d'industrialisation nécessaire, autour notamment de la technologie d'électrolyse à haute température qui utilise de l'eau vaporisée et nécessite moins d'énergie…

Le processus sera long, et le rythme de croissance du marché sera probablement plus lent que prévu. De fait, ces technologies sont complexes à industrialiser, et il faut entrainer la chaine de valeur (notamment matériaux et équipementiers). Mais l'hydrogène reste un atout de premier plan, aux usages multiples. Et pour Genvia, l'ambition est claire : mettre le savoir-faire technologique du CEA, allié aux compétences mécaniques, métallurgiques, et d'ingénierie de Schlumberger, au service de la transition énergétique.

Florence Lambert. Docteure en électrochimie, auteure d'une thèse sur le stockage des énergies renouvelables, Florence Lambert a commencé en 2000 sa carrière au CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies renouvelables), où elle a assuré différentes fonctions managériales liées aux systèmes d'énergies renouvelables (photovoltaïque, batteries, hydrogène). En 2013, elle a notamment pris la direction du Liten, laboratoire du CEA dédié à la transition énergétique. Très impliquée au niveau des institutions autour du stockage de l'énergie, elle a été nommée Présidente de la Conférence mondiale de l'énergie solaire. En 2021, elle était nommée Femme de l'année 2020 dans la catégorie Innovation par le média Green Univers. La même année, elle a pris la présidence de la start-up Genvia dédiée à l'industrialisation de la technologie d'électrolyse Haute température du CEA en partenariat avec l'industrie. En 2022, elle a été nommée ambassadrice du plan d'investissement France 2030, et académicienne à l'Académie des technologies.

Patrick Maestro. Chimiste et expert des matériaux, Patrick Maestro s'intéresse notamment aux produits biosourcés avec les composés à base d'oxydes de terre rares que l'on retrouve aujourd'hui dans les lampes à basse consommation LED ou les catalyseurs de postcombustion des voitures… Directeur scientifique de Rhodia puis de Solvay, auteur d'une quinzaine de brevets, il s'est surtout consacré à faire collaborer recherche publique et monde industriel. Il a ainsi contribué à la création de plusieurs unités mixtes du CNRS en partenariat avec Solvay telles que le laboratoire « Polymères et matériaux avancés », le « laboratoire du futur » et le laboratoire E2P2L à Shanghai. Il est également membre de l'Académie des technologies et sert aujourd'hui en tant que secrétaire général d'Euro-CASE, association des académies de technologies et d'ingénierie d'Europe.

Sommaire

Exposé de Florence Lambert **2**
Débats **8**

Exposé de Florence Lambert

L'hydrogène est un atout important de la décarbonation, qui a été propulsé au premier plan dès son apparition dans les politiques du Net Zéro, notamment dans des tentatives d'électrification.

Il a un aspect « couteau suisse », parfois surestimé, mais de fait, il couvre de plus en plus d'usages, prioritairement dans l'industrie, où il permet une convergence entre réseaux d'énergie, et mobilité.

Usages de l'hydrogène dans l'industrie

En tant que matière première : en remplacement de l'hydrogène aujourd'hui produit par du vaporeformage, polluant.

- Dans les fours, en remplacement du méthane. Un des objectifs actuels est de travailler avec les équipementiers sur de nouvelles formes de combustion, pour non seulement diminuer les contenus « carbone » de ces procédés, mais aussi les optimiser, à l'horizon des cinq à dix années à venir. Il ne suffit pas de remplacer un vaporeformeur par un électrolyseur, mais il importe de travailler sur des équipements nouveaux pour que ces industries puissent se reconfigurer.

- Production d'e-molécules : ammoniac, méthanol, kérosène. Une façon de transformer ces industries en unités de production également de carburants de synthèse.

- Mobilité et stockage des réseaux. Dans le cadre de la stratégie française de mobilité propre, notamment automobile autour des batteries, l'hydrogène représente un avantage pour les « usages intenses » (longues distances, recharges rapides).

- Électrification des grosses plateformes (bus, cars, camions…).

Les points faibles

- Les rendements sont peu favorables. Quand on fait un rendement de chaîne global, on reste généralement en dessous de 40 % entre la production, le stockage, la reconversion en pile à combustibles. Dans ce contexte, ce n'est vraisemblablement pas la raison de l'ingénieur qui va l'emporter. Par-delà la notion d'efficacité dans les rendements, pointe aussi la notion de disponibilité de l'énergie.

- Toutes ces considérations se font souvent à l'aune d'un réseau électrique français - ou Européen - décarboné et très développé. Mais dans d'autres contextes, il va être urgent de développer des mobilités propres. Il sera sans doute plus facile de transporter des molécules d'hydrogène que de devoir reconcevoir ex nihilo un réseau électrique. Il va donc falloir différencier la stratégie française, et européenne, de celle notamment des pays émergents où la notion de disponibilité des technologies devance celle des rendements. De manière générale, il va falloir envisager une palette de solutions.

- La chaîne de valeur : l'hydrogène repose sur toute une chaîne de la valeur, comme le montre la figure 1.

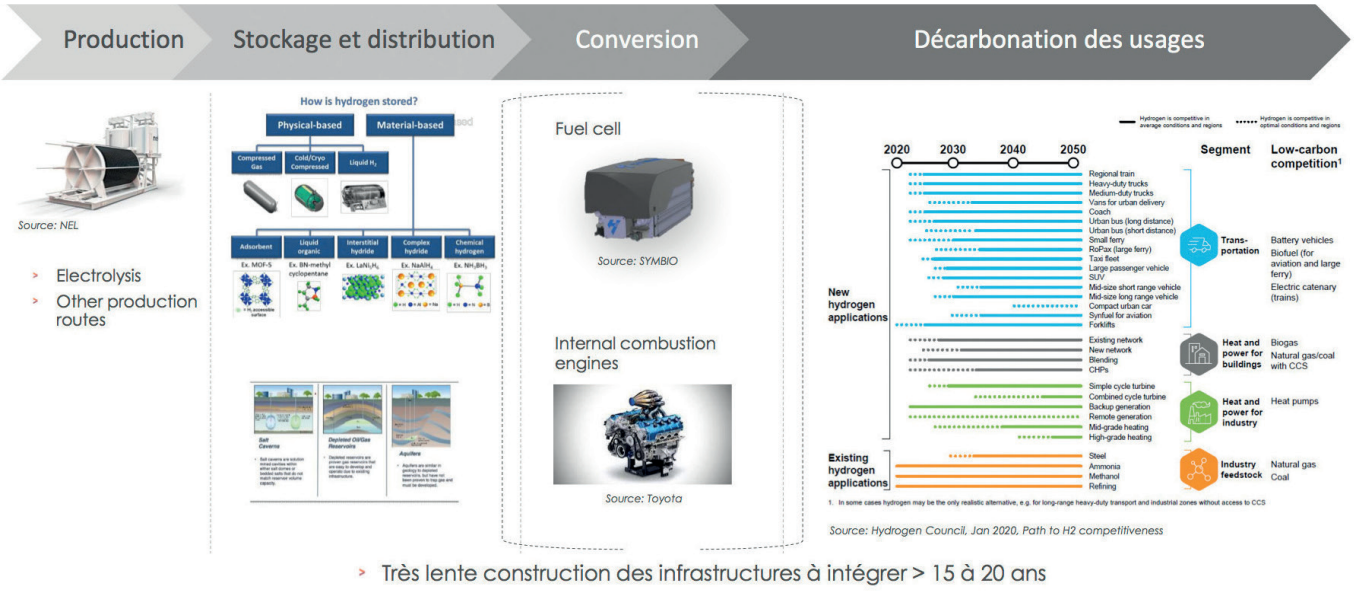


figure 1 - Chaîne de la valeur de l'hydrogène

Il faut désormais que l'ensemble de cette chaîne se mette en œuvre. Cela peut prendre quinze à vingt ans, car la construction des infrastructures sera forcément très lente.

— Des prévisions de marché revues à la baisse : le dernier rapport de l'AIE le montre clairement.

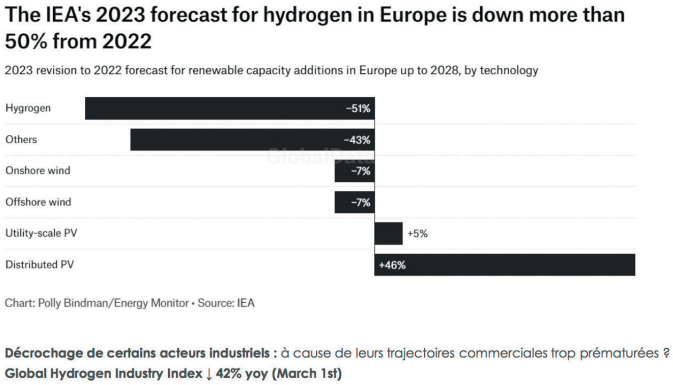


figure 2 - Prévisions de marché revues à la baisse

La baisse, on le voit, concerne les énergies renouvelables en général, mais les lendemains risquent d'être particulièrement difficiles pour les acteurs de l'hydrogène, qui ont accumulé beaucoup de dettes (figure 2).

Le premier écueil ne concerne pas que l'électro chimie, la maturation de l'ensemble du système est également importante. Très important aussi, l'appréhension des durées de vie des technologies. Souvent les acteurs industriels se lancent dans des trajectoires commerciales avant même d'avoir assuré ces durées de vie, ce qui peut parfois leur coûter cher.

Enfin, dernier écueil : le décrochage de l'index des sociétés cotées dans l'hydrogène.

Les couleurs de l'hydrogène

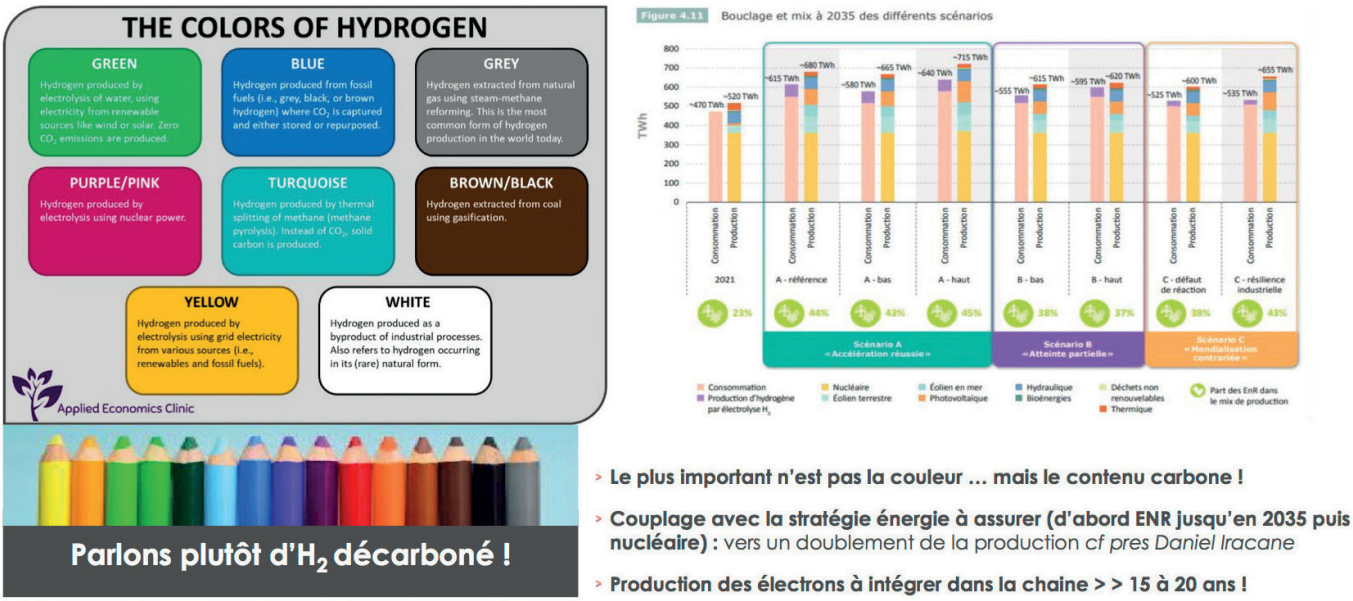


figure 3 - Différentes couleurs de l'hydrogène

Cette notion de couleurs - très européenne -, montre qu'il existe plusieurs formes d'hydrogène mais rappelle surtout qu'il est fondamental de se préoccuper de la façon de les produire (figure 3). On a vu en Europe, notamment avec l'arrivée du Purple Pink, qu'il y avait une légère volonté de stigmatiser l'hydrogène en provenance du nucléaire. Depuis quelques mois, enfin, l'Europe va plutôt parler d'hydrogène décarboné.

Le plus important n'est pas la couleur mais le contenu carbone. Il importe de s'assurer que ces productions vont être couplées à la montée en puissance des réseaux d'énergie décarbonée.

Malgré des feuilles de route ambitieuses dans le nucléaire, jusqu'en 2035, l'essor du marché de l'hydrogène doit se concentrer uniquement sur des ENR. Au-delà de la chaîne complète à configurer, il faut que l'Europe se mette à reconstruire des bases de production décarbonées, donc d'abord renouvelables et ensuite nucléaires.

Les différentes technologies

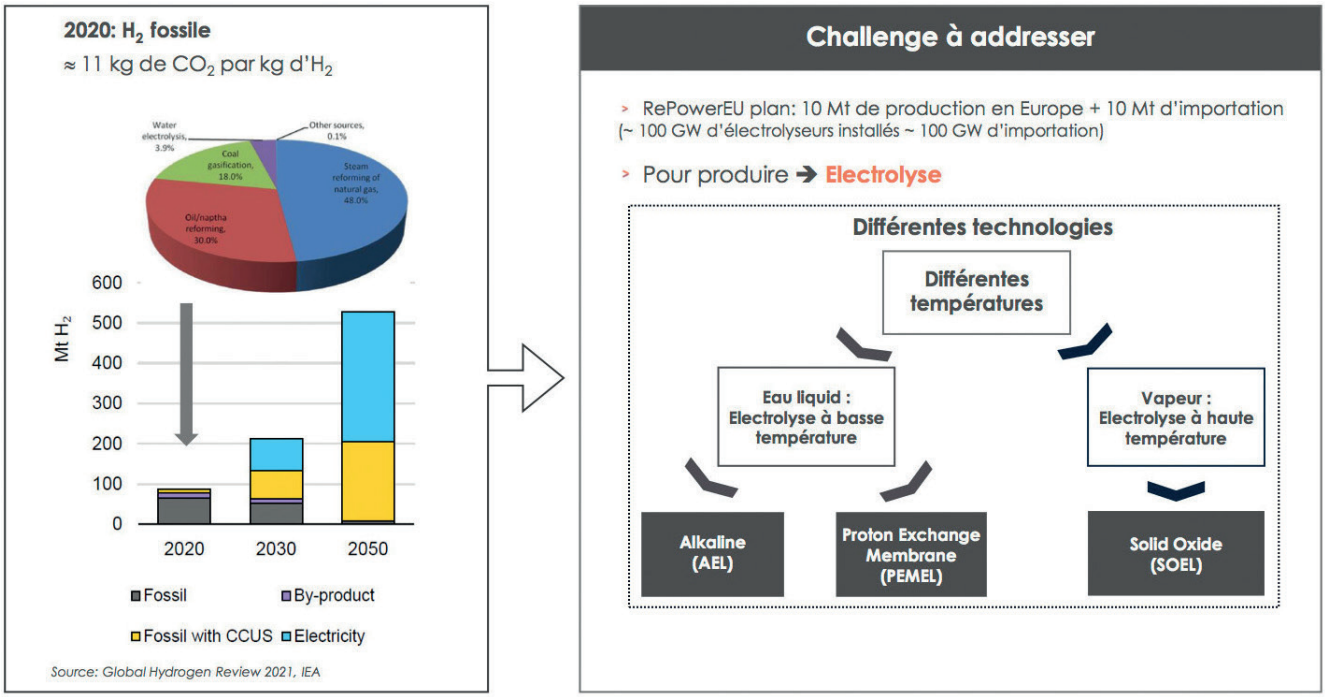
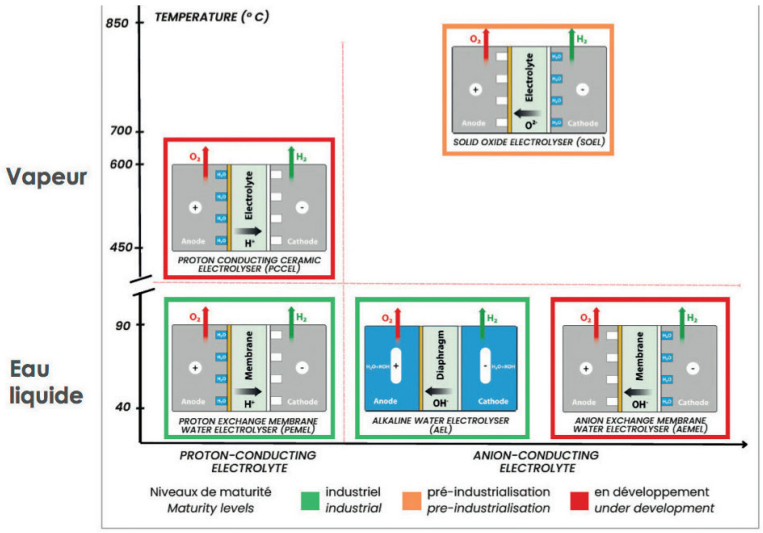


figure 4 - Différentes technologies dans la stratégie française

La production par électrolyse a été largement soutenue par la stratégie française de développement de l'hydrogène (figure 4). Dans l'électrolyse, on distingue les technologies qui électrolysent de l'eau liquide et celles - comme chez Genvia - qui utilisent de l'eau vaporisée, permettant à la dissociation de la vapeur d'eau de nécessiter moins d'énergie. Second avantage du procédé : lorsque la température augmente, une partie de l'énergie électrique nécessaire pour dissocier la molécule peut être aussi récupérée et remplacée par de la chaleur. D'où l'intérêt de coupler cette technologie notamment à de la chaleur fatale.

Différents niveaux de maturité



consumption @ nominal capacity					
Capital Cost	€/(kg/d)	1250	1000	900	800
O&M cost	€(kg/d)/yr	26	20	18	16
PEMELc	**Unit**	**2020**	**2024**	**2027**	**2030**
Electricity consumption @ nominal capacity	kWh/kg	55	52	50	48
Capital Cost	€/(kg/d)	2100	1550	1250	1000
O&M cost	€(kg/d)/yr	41	30	25	21
SOE	**Unit**	**2020**	**2024**	**2027**	**2030**
Electricity consumption @ nominal capacity	kWh/kg	40	39	38	37
Capital Cost	€/(kg/d)	3550	2000	1200	800
O&M cost	€(kg/d)/yr	180	100	60	40

- **Décollage du marché de l'AEL avec une forte compétition chinoise (ex de *Longi*)**
- **Excellente compacité et flexibilité du PEMEL / SOE pour les couplages exothermiques et le nucléaire**

figure 5 - Différents niveaux de maturité

Ce graphe de Bruno Pollet (figure 5) montre les différents stades de maturation des technologies. On constate un vrai décollage de l'alcalin, première technologie de remplacement aujourd'hui, mais qui va devoir se confronter d'ici peu à une compétition asiatique. On observe aussi une très bonne compacité et flexibilité de la technologie PEMEL/SOE pour les couplages exothermiques dans les procédés industriels mais aussi pour le nucléaire.

En ce qui concerne les matériaux, les défis de demain vont consister à diminuer la résistance interne, donc travailler avec des électrolytes plus fins, travailler sur le scellement, ce qui est très compliqué pour une industrialisation de masse. Donc on travaille par exemple sur des scellements qui vont être plus massifs.

Stockage et distribution

C'est sans doute le volet le plus développé dans les projets français industriels (PIIEC).

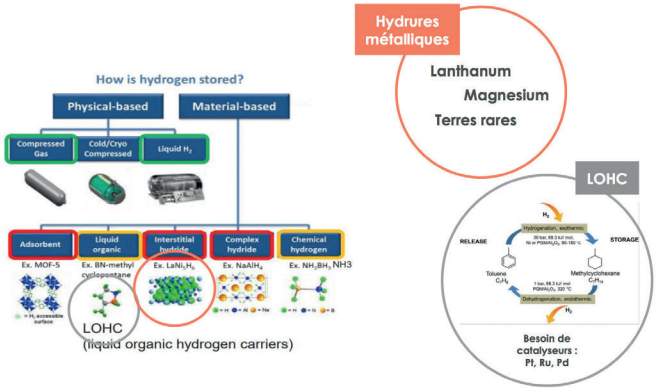


figure 6 - Stockage de l'hydrogène

Pour l'heure, c'est le stockage comprimé qui est le plus mature : le plus immédiat et le plus compétitif (figure 6). Un fort développement est en cours sur les hydrures métalliques et on peut noter une accélération sur les « Liquid organic hydrogen carriers » (LOHC). Au-delà du secteur de l'automobile, on n'observe tout de même pas la même maturité que sur les électrolyseurs, au niveau industriel. C'est préoccupant.

Se pose toujours ici la question essentielle : est-ce qu'on stocke sous forme d'hydrogène ou d'autres molécules ?

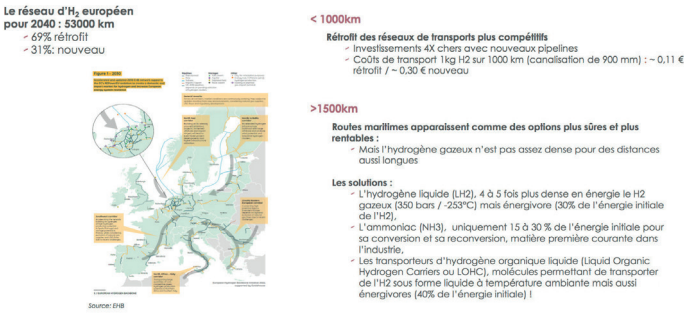


figure 7 - Transport et distribution de l'hydrogène

En ce qui concerne le transport, on le voit dans la figure 7, en dessous de 1 000 kilomètres, on reste sur des réseaux de transport existants, ou l'on construit de nouveaux pipelines. Au-delà de 1 500 kilomètres, le transport se fait sous forme liquide, ce qui reste très énergivore, ou bien sous forme d'autres molécules comme l'ammoniac.

Dans les conférences sur le sujet, on considère de moins en moins l'hydrogène comme un point d'arrivée, mais plutôt comme une étape intermédiaire vers des carburants de synthèse, des molécules dérivées. Sur les projets à grande échelle, la plupart des transports se font sous forme d'ammoniac, ce qui génère des questions de sécurité rarement abordées (figure 8).

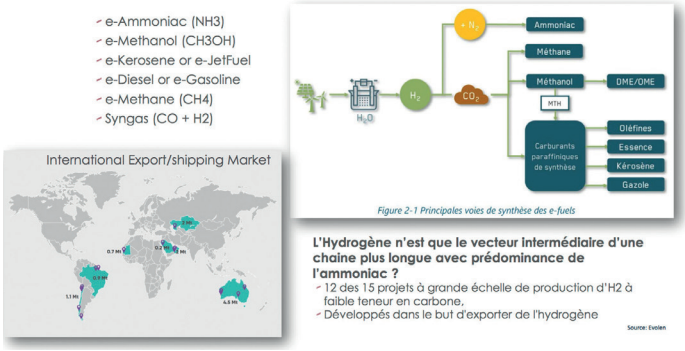


figure 8 - Molécules dérivées de l'hydrogène

Les piles à combustible

Vient ensuite la question de la conversion, notamment pour la mobilité. Différents types de piles à combustibles répondent aujourd'hui à différents usages. Le procédé le plus mature dans le domaine reste les PEM, qui devraient probablement bénéficier d'une baisse assez rapide des coûts, grâce à l'industrialisation du monde de l'automobile. Cependant, les quantités d'énergie produites restent encore très peu importantes.

Genvia, la genèse

La société Genvia est un écosystème assez unique, mi public mi privé, qui est né de la rencontre incroyable entre le CEA et le groupe Schlumberger qui cherchait alors à développer des alternatives au pétrole. À l'origine, donc, la technologie réversible d'électrolyseur haute température à oxyde solide, développée depuis une quinzaine d'années au CEA de Grenoble : quinze ans de R&D sanctionnés par 40 brevets, ce qui nous plaçait dans le top 2 mondial, et justifiait de se lancer sur cette trajectoire industrielle.

Et l'arrivée de Schlumberger, aujourd'hui SLB, riche des compétences et du savoir-faire mécanique et métallurgique de son usine de Béziers. L'aventure a donc commencé avec deux actionnaires majoritaires (le CEA et SLB) rejoints ensuite par d'autres actionnaires qui représentent les premières applications comme la cimenterie, Vinci pour la décarbonation de la déconstruction, mais aussi les concessions autoroutes et aéroports et enfin l'ARIS (Agence Régionale des Investissements Stratégiques Occcitanie). L'Occitanie a beaucoup d'ambitions dans la transition énergétique.

Un support unique de l'État français

Genvia a été lauréat des IPCEI, ces aides européennes à l'innovation, qui nous octroyé 250 millions d'euros pour une période allant de 2021 à 2027. Cet argent nous a permis, au-delà du périmètre industriel autour du *stack*, non seulement d'intégrer le premier pilote, mais aussi tous les développements liés aux systèmes sous bannière Genvia.

La technologie Genvia

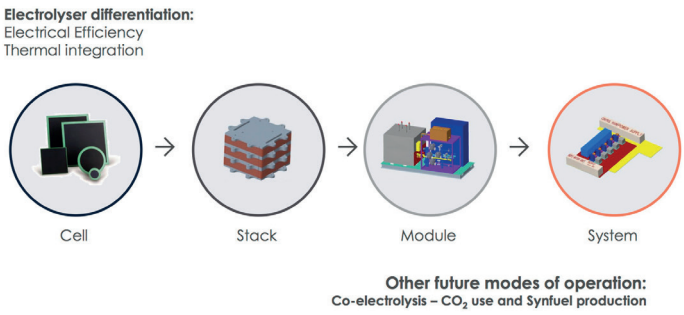


figure 9 - Genvia: Electrolyser Technology Components

Genvia couvre toute cette chaîne de la valeur, depuis la céramique, mise « en sandwich » dans ce qu'on appelle un *stack*, qui est donc un « sandwich » de céramique et de métal (figure 9). Ce qui se prépare qu'aujourd'hui, c'est un équipementier qui va aller jusqu'à des modules qui seront ensuite produits dans notre *factory*.

Cette expérience passionnante révèle toutefois la faiblesse du tissu des équipementiers qui n'est pas à maturité pour suivre tous ces projets. Face au formidable réveil des usines en France - usines de batteries d'électrolyse, de piles, de réservoirs d'hydrogène… -, une possibilité serait de trouver des sujets intermédiaires communs aux différentes filières pour aider à maturer quelques ETI capables de nous aider dans l'industrialisation des technologies.

Genvia aujourd'hui

Nous sommes désormais 160 dans la société Genvia qui n'est donc plus une start-up, et fonctionne essentiellement autour de trois cœurs de métier. La production et notre siège sont installés à Béziers, dans une usine 1900, magnifique, qui a connu tout une partie du passé industriel français. L'ingénierie industrielle est à Clamart, dans le centre de SLB. Mais nos racines grenobloises ont pour vocation de perdurer.

Après bientôt trois ans où notre cœur de technologie a été éprouvé avec suffisamment d'heures de tests, le temps est venu de la mise en œuvre, avec ce développement d'ingénierie concurrente, une première ligne de production de stacks et de systèmes qui a été inaugurée l'année dernière et qui permet de produire notre premier système. Il a fallu quinze ans pour obtenir 40 brevets, mais trois ans seulement pour en déposer récemment une trentaine de nouveaux, ce qui porte le portfolio à environ une centaine de brevets sur toute cette chaîne de la valeur.

La technologie Genvia est une technologie « du coup d'après » et notre connexion à l'innovation est fondamentale. Elle commence par le cœur du réacteur, c'est à dire la céramique. Genvia est donc adossée à un programme de recherche copiloté par le CEA et le CNRS sur la céramique, certainement le meilleur spot d'innovation au monde qui a couplé le cahier des charges de Genvia et les connaissances de matériaux liées à l'électro chimie mais également aux couches minces issues de la microélectronique pour limiter au maximum les réactions parasites et produire à partir de chaque électron le plus possible d'hydrogène.

La nouveauté c'est le lancement, dès cette année, d'un laboratoire de mise à l'échelle de tout cela autour de cette céramique. Et nous avons noué une alliance avec le seul acteur qui produit des céramiques - estonien -, pour créer une Europe de la céramique, de la haute température. Pour couvrir tous nos défis, il est nécessaire de s'adosser le plus possible à une échelle européenne.

La data science est un domaine auquel nous tenons et qui a été lancé dès le démarrage pour essayer de développer des modèles qui vont être logiques donc immédiats. Genvia a aussi entrepris de développer des jumeaux numériques multi échelles. Cela va prendre plusieurs années, mais on a commencé à le faire dès le départ pour permettre de développer un produit intrinsèquement digital.

Genvia demain

Nous sommes en train d'ouvrir une nouvelle page, avec notamment l'accord signé avec Airbus sur la production des carburants de synthèse et de toutes les molécules dérivées hydrogène. Cela signifie qu'il va falloir assez vite se diriger sur des trajectoires de forte puissance : quelques dizaines de mégawatts, puis au-delà de 100 mégawatts.

Au-delà de 2035, le sujet de prédilection de la haute température sera le marché du couplage du nucléaire. Pour relancer la stratégie du nucléaire, nous sommes en train de travailler sur une équipe d'ingénierie commune, avec quelques grandes étapes qu'on peut voir en figure 10.

Constitution d'un consortium sur la base de technologies françaises et montage du projet	**2023-2024**
Etudes des schémas de couplage	**2025-2026**
Développements des briques spécifiques aux différentes technologies	**2025-2027**
Expérimentations à échelles réduites des couplages *→ démonstrateurs 5MW et 20MW*	**2028-2031**
Expérimentation à échelle industrielle *→ démonstrateur à échelle industrielle 100MW*	**2026-2035**

» Jalons coordonnés avec la stratégie nationale H2 et la nouvelle programmation nucléaire

figure 10 - Couplage EHT-NUC / Proposition d'une feuille de route en France

Conclusion

Rien ne sert de courir. L'adage est particulièrement adapté à l'hydrogène. La dynamique de Genvia, c'est d'assoir une trajectoire produit qui doit être éprouvée en fonction du risque, mais surtout être en écho à une stratégie de marché qui va prendre un certain temps avant de se mettre en place. Les technologies sont, de fait, plus difficiles à industrialiser qu'un simple concept PowerPoint. Il ne faut pas sous-estimer non plus l'absence de maturité du segment équipementier industriel qui, au-delà de toute la chaîne globale, entraine forcément une inertie de mise en œuvre.

Cela étant, n'oublions pas que l'intérêt de l'hydrogène, c'est de pouvoir assoir une trajectoire du Net zéro en étant souverain, notamment en lien avec le couplage nucléaire et la production d'e-molécules. Ce « couteau Suisse » a notamment la vertu de se produire localement et de s'affranchir de sujets géopolitiques. L'idée, sur le sujet, n'est pas de comparer et d'opposer des solutions. Le rendement n'est peut-être pas toujours utile, mais par exemple, dans une chaîne globale, il faudra valoriser les chaînes les plus efficaces.

Débats

Vous avez parlé de la disponibilité de l'énergie pour les pays où les réseaux sont moins bons qu'en France. Est-ce qu'il faudra envisager de transporter de l'hydrogène dans ces pays, ou est-ce que le bilan carbone sera trop important et faudra-t-il plutôt envisager une production plus localisée ?

Florence Lambert : Aujourd'hui, on envisage plutôt de l'électrolyse locale, surtout si ces pays correspondent à des *sweet spots* solaires, photovoltaïques, ou éoliens. De plus en plus de projets s'orientent vers du stockage et ces pays envisagent de produire de l'hydrogène pour leur propre usage mais aussi pour l'exporter. C'est notamment la vision de l'Allemagne qui, dans son plan hydrogène, intègre beaucoup d'importations en provenance notamment d'Afrique du Nord.

Quand on fait tous les calculs, comme les coûts de la molécule d'hydrogène ont une composante directe du coût de l'électricité, on arrive assez vite à un modèle qui pourrait être rentable. Par ailleurs, avoir accès à ces *sweet spots* peut être intéressant pour les énergéticiens. Selon moi, si l'on veut éviter de refaire une bulle comme celle du solaire, il faut absolument que les entreprises comme Genvia qui se développent aujourd'hui, se comparent par rapport à un hydrogène produit ailleurs puis transporté. En revanche, je n'ai pas encore les bons niveaux de comparaison avec les contenus carbone de ces transports.

L'hydrogène est un produit chimique classé parmi les produits dangereux, mais l'on oublie souvent les problèmes de sécurité. On répond qu'il est plus facile d'éteindre un feu d'hydrogène qu'un feu de batterie. Mais quand l'hydrogène flambe, c'est qu'il n'a pas explosé… Ces problèmes de sécurité sont clairement maîtrisés dans les installations industrielles Seveso. Mais que se passe-t-il en dehors de l'industrie ? Quelles que soient les interventions, notamment celles de France Hydrogène, on n'aborde pas le sujet. Or, cela paraît être un sujet majeur qui, si l'on n'y prend pas garde, risque de tuer le développement de l'hydrogène.

F L : Je confirme qu'il s'agit d'un sujet majeur. Dès le démarrage de notre aventure, nous avons souhaité nous associer au Bureau Veritas et nous avons beaucoup travaillé avec l'INERIS (l'Institut national de l'environnement industriel et des risques). Ainsi tous nos produits ont été développés avec un prisme de sécurité. Il n'en va pas de même pour les batteries.

Quand j'évoque des compétiteurs ou des acteurs industriels partis trop tôt dans des trajectoires commerciales, ce que je redoute beaucoup en tant qu'acteur de l'hydrogène, c'est d'avoir des faiblesses système qui pourraient être importantes parce qu'on peut avoir une faiblesse, parce qu'il y a un problème de durée de vie… Ce sujet, je le prends en premier chef dans tous mes développements. Avant d'installer notre produit chez ArcelorMittal - en 2025 -, on va tester deux fois notre premier système, par petit bout, pendant un an, dans note site de Grenoble. Ce n'est qu'une fois qu'on aura éprouvé le tout que nous irons chez notre premier client. C'est sûr, les actionnaires préféreraient que cela se passe beaucoup plus vite. Mais il ne faut pas confondre vitesse et précipitation sur ce sujet. Il me paraît fondamental de faire une très bonne ingénierie au niveau système pour bien encadrer tous les sujets liés aux risques.

L'une de vos inquiétudes concerne les équipementiers, c'est-à-dire les gens qui vont fabriquer les machines. Imaginez-vous qu'un support public ou des grandes entreprises puissent résoudre ce problème ? Ou faut-il se résigner à aller les chercher en Allemagne, là où probablement il y en a le plus ?

F L : C'est une question cruciale, en effet. Nous ne sommes pas là dans des ordres de grandeur comparables à ce qui a été investi sur les différentes filières, que l'on parle de batterie, de technologie d'hydrogène, d'électrolyseur comme TEM… Je pense qu'on peut recenser tous les sujets un peu connexes d'industrialisation et regarder en face quels acteurs pourraient être les meilleurs. J'ai en tête quelques belles ETI. Après, je pense que ce que l'on n'a pas en France, il faut aller le chercher en Allemagne. D'où mon alliance avec l'Estonie, sur la céramique. Je pense qu'il faut être pragmatique à l'échelle européenne. Et après, imaginer des plateformes technologiques qui seraient multi usage, peut-être plus

facilement finançables par les pouvoirs publics, et que l'on pourrait aider dans la maturation des équipements.

C'est par exemple, l'expérience que j'ai avec notre partenaire Horiba, probablement leader de l'équipement de laboratoire hydrogène. Nous les avons aidés à faire la mise à l'échelle d'un équipement qui permet de faire le conditionnement final (scellement et tests électrochimiques). Ils avaient onze mois de retard au départ, que nous avons réussi à rattraper en faisant du co-développement avec eux. Je suis persuadée que dans toutes les nouvelles usines, on peut avoir pléthore de ce genre de retard, et que l'on pourrait essayer d'imaginer des plateformes technologiques dans lesquelles on aide les équipementiers qui verraient différents cahiers des charges industriels et qui pourraient monter en puissance sur des plateformes. Un sujet qui pourrait intéresser notre Académie. J'ai, pour ma part, commencé à contacter Verkor, d'autres acteurs industriels pas forcément du secteur de l'hydrogène, qui sont confrontés à ce genre de problème, et qui seraient prêts à creuser ce sujet. Cela dit, il faut certes avoir d'abord des usines en France, mais être aussi en capacité de les chercher ailleurs s'il le faut, en Allemagne ou en Italie du Nord, par exemple.

Mots clés : e-molécule, électrolyse, Genvia, hydrogène, LOHC, Net Zéro, pile à combustibles

Citation : Florence Lambert & Patrick Maestro. (2024). *Le passage à l'échelle des technologies de l'hydrogène*. Les soirées de l'Académie des technologies. @

Retrouvez les autres parutions des séances thématiques de l'Académie des technologies sur notre site

Académie des technologies. Le Ponant, 19 rue Leblanc, 75015 Paris. 01 53 85 44 44. academie-technologies.fr
Production du comité des travaux. Directeur de la publication : Patrick Pélata. Rédacteur en chef de la série : Hélène Louvel. Auteur : Marie-Claude Treglia. n° ISSN : en attente.

Les propos retranscrits ici ne constituent pas une position de l'Académie des technologies et ils ne relèvent pas, à sa connaissance, de liens d'intérêts. Chaque intervenant a validé la transcription de sa contribution, les autres participants (questions posées) ne sont pas cités nominativement pour favoriser la liberté des échanges.