

L'hydrogène

Pour respecter une augmentation de la température moyenne limitée à 2° maximum, nous devons impérativement émettre moins de CO₂. L'hydrogène est une solution intéressante, et il devrait contribuer à 18% de l'énergie consommée dans le monde en 2050.

Le gouvernement français a d'ailleurs annoncé un plan de 7 milliards d'€ pour développer la filière hydrogène d'ici 2030, avec les objectifs suivants : décarboner tous les secteurs de l'industrie, développer la mobilité lourde et, à terme, stocker l'électricité renouvelable intermittente.

Un potentiel prometteur

Le formidable potentiel de la molécule d'hydrogène (H₂) est connu depuis longtemps. Très dense en énergie, sa combustion dans un moteur ou sa consommation dans la pile à combustible d'un véhicule électrique dégage de la vapeur d'eau... et zéro CO₂. Autre avantage majeur : malgré sa non-disponibilité directe, l'hydrogène «vert» peut être produit sans émission de carbone à partir d'électricité renouvelable ou d'énergie nucléaire (actuelle ou de nouvelle génération). Par un courant électrique, l'électrolyse consiste à casser la molécule d'eau H₂O pour en récupérer ses composants. L'alternative peu écologique est le vaporeformage du méthane fossile. Une belle opportunité de stockage massif des productions solaire et éolienne, inépuisables, mais, hélas, fluctuantes et intermittentes.

A long terme, selon les analyses de l'agence internationale de l'énergie, la production d'hydrogène devrait permettre d'intégrer sur le réseau de 30 à 50% d'énergie éolienne et solaire.

Trois attentes majeures

- **Le transport** : Alors que les batteries électriques s'avèrent encombrantes et limitées en puissance, surtout pour les transports longue distance, l'hydrogène offre une bonne densité énergétique et une recharge rapide. Les experts prévoient 25% de véhicules électriques à hydrogène en 2050.
- **L'industrie** : Les 900 000 tonnes d'hydrogène, consommées annuellement par l'industrie française, offrent un débouché opportun à l'hydrogène vert pour limiter l'effet de serre : par exemple pour la fabrication d'acier, ou dans la construction.
- **Le réseau électrique** : L'électrolyse pourrait, en apportant une solution de stockage, absorber les surplus des productions d'électricité renouvelable intermittentes et augmenter ainsi la part du solaire et de l'éolien dans le mix énergétique.



Bernard Soret (75 ILI) et Jean-Marie Heyberger (74 ILI), membres du Comité de rédaction

Trois défis à relever

- **Le coût** : Celui de la pile à combustible (pour convertir l'hydrogène en électricité), et aussi de la distribution sont encore à améliorer et à mettre en place.
- **Le rendement du processus** : Celui de l'électrolyse, inférieur à 70%, doit être optimisé. Il en est de même pour la pile à combustible.
- **Le stockage massif** : Des solutions sont à l'étude en cavités naturelles, par injection dans le réseau de gaz naturel ou par incorporation dans un liquide, ce qui serait compatible avec les infrastructures utilisées pour les combustibles liquides.

Un objectif final de neutralité carbone

Le respect de son échéance à 2030 pour l'Europe est tributaire des atouts majeurs de l'hydrogène en conjonction avec tous les autres contributeurs, les énergies renouvelables en particulier. Et sans oublier une vertu éternelle, la sobriété, à laquelle nous sommes tous appelés.

Les ingénieurs Icam sont à l'œuvre

Nous remercions vivement le père jésuite, les experts, les publications (dont Sciences et Vie n°1239 de décembre 2020) et tous nos ingénieurs qui ont bien voulu nous partager leur expérience pour constituer ce dossier.

Hydrogène, l'Heure H

Pierre-Etienne Franc – VP Hydrogène Air Liquide



Les annonces de plusieurs gouvernements européens, y compris du gouvernement français (7,2 milliards d'euros pour la filière hydrogène), bouclent un cycle riche en annonces de soutien à la filière hydrogène et constituent l'aboutissement d'une dynamique qui s'est développée sur les dix dernières années.

C'est une nouvelle étape qui s'engage, décisive pour la décennie qui s'annonce. Conjointement, l'urgence climatique qui s'accélère chaque mois, et l'urgence économique résultant de la crise sanitaire, se réunissent pour donner ainsi une chance unique à notre filière pour prendre toute sa part de la transition énergétique en marche.

Les progrès des dix dernières années sont considérables !

En dix ans de déploiement des technologies de production et d'usage de l'hydrogène au service de la transition énergétique, mobilité, industrie, résidentiel, nous sommes passés de la démonstration à l'ère des séries (plus de 20 000 véhicules hydrogène, plusieurs gigawatts de capacités annoncées en projets d'électrolyse, plus de 300 000 sites stationnaires...). Nous expérimentons désormais les enjeux de fiabilité et de compétitivité, nous éprouvons au quotidien les bénéfices à l'usage et nous pouvons chiffrer les potentialités pour le climat, à l'échelle d'un pays ou d'un continent. Nous pouvons, pour Air Liquide, citer quelques exemples emblématiques de cette dynamique.

La mobilité hydrogène fait ses preuves tous les jours dans le monde. En France, le développement réussi de la flotte de taxis hydrogène Hype, créée en 2015 et lancée grâce à Air Liquide à l'occasion de la COP21, en est l'un des symboles les plus significatifs : elle compte déjà plus de 100 véhicules. L'acquisition récente du Groupe Slota (opérateur historique de taxis parisiens) par HysetCo (société d'actifs dédiée au développement de la mobilité hydrogène qui détient la flotte exploitée par Hype) permettra bientôt de remplacer 600 taxis parisiens diesel additionnels en véhicules zéro émission. Démarré en janvier au Québec, le site Air Liquide de Bécancour fonctionne grâce à la plus grande unité au monde d'électrolyse PEM (20 MW) actuellement en service. Alimenté grâce à de l'hydroélectricité, l'électrolyseur permet de produire 8,2 tonnes d'hydrogène d'origine renouvelable par jour. Sa production est destinée à des clients industriels ainsi qu'aux marchés de la mobilité propre du nord-est de l'Amérique du Nord. Celle-ci permet d'éviter l'émission de 27 000 tonnes de CO₂ par an, soit les émissions annuelles d'environ 10 000 voitures.

Les plus grands pays sont maintenant fortement engagés

L'Asie, d'abord, qui ne s'y est pas trompée. La Chine, qui sait l'importance d'une industrie automobile forte au service de l'innovation et de la croissance, a bien compris que l'avenir

était dans la maîtrise des propulsions électriques, à batterie ou à hydrogène. Entourée des deux pays leaders sur ces technologies, le Japon et la Corée du Sud, avec des politiques de soutien lourdes et durables et des champions mondiaux incontournables, elle fait de l'Asie le champion actuel de la course qui commence sur le marché de la mobilité.

Focalisée à date sur les usages, l'Asie travaille encore ses options pour décarboner ses sources d'hydrogène et ainsi enclencher les développements des usages sur les autres segments clés de l'industrie.



L'Europe, longtemps soutien appuyé des efforts de recherche et de démonstration de la filière, avec une avant-garde dans les déploiements tenus par l'Allemagne, se positionne désormais clairement à la pointe dans la compréhension et les

ambitions pour faire de l'hydrogène un des piliers de la transition énergétique grâce à une approche systémique, à raison. Plusieurs pays d'Europe ont désormais embrayé avec une stratégie visant à favoriser ses avantages compétitifs (sources renouvelables au sud, usage et diffusion dans les industries et les transports au nord et au centre, variété des méthodes de décarbonation aux Pays-Bas et dans les pays nordiques). Ainsi, nous entrons dans la politique de massification et de déploiement, essentielle pour diminuer les coûts, accroître les usages et la pénétration de la molécule dans les grands secteurs qui en ont besoin pour basculer vers des procédés propres. L'existence de nombreux champions français, et le soutien désormais affirmé des pouvoirs publics à une approche systémique, de l'amont à l'aval, permettent à l'Europe de disposer désormais d'une vision unifiée, c'est une étape fondamentale pour la filière !

Les grands acteurs du Moyen-Orient regardent à leur tour très sérieusement l'hydrogène comme option possible pour décarboner les énergies fossiles pour quelques décennies, sous réserve d'être capables de développer de vrais carbon sinks (puits à carbone), qu'il s'agisse de CCS (captage et séquestration du carbone) ou de CCU (captage et valorisation du carbone). L'Australie agit dans la même optique, avec des projets déjà très avancés avec ses grands partenaires énergétiques asiatiques.

Enfin, quid de l'Amérique du Nord ? Berceau du plus grand déploiement à date dans les usages de véhicules électriques à hydrogène, en Californie et de chariots élévateurs (plus de 30 000 déjà en service) sur l'ensemble des États-Unis, les américains n'ont pas encore poussé l'avantage au niveau d'une politique fédérale, question d'alignement probablement. Car quelques-unes des startups les plus prometteuses du secteur se développent sur le sol nord-américain. Il ne manque ainsi qu'une politique de passage à l'échelle de l'ensemble du territoire pour que les principaux pays émetteurs soient alignés dans cette révolution silencieuse et vertueuse de l'hydrogène ! L'arrivée au pouvoir de l'administration Biden, et son retour dans les accords de Paris associé à un fort plan de relance sur le climat devraient probablement remettre les États-Unis au cœur du jeu.

Cette dynamique est le fruit des succès, des expériences à l'échelle, mais aussi, bien sûr, du travail considérable que nous avons accompli, pour définir à la fois une ambition et une feuille de route pour y parvenir, notamment au sein du Conseil de l'Hydrogène, grâce à la mobilisation engagée de 109 dirigeants des principaux groupes mondiaux. Cette accélération doit aussi beaucoup aux grandes organisations nationales et régionales, soutiens d'une vision déclinée par zone qui permet aux décideurs publics de disposer d'une ambition quantifiable en programmes de soutien et en objectifs pour la croissance, le climat et l'emploi.

La somme des annonces, qui reste encore à finaliser dans les prochains mois, met au service des technologies hydrogène plusieurs dizaines de milliards d'euros pour accompagner le passage à l'échelle. Cet effort et cette confiance doivent nous permettre de mobiliser ressources, technologies et investissements avec trois obsessions chevillées au corps : La sécurité, les coûts et la neutralité carbone.



La sécurité doit désormais, plus encore qu'hier, faire l'objet de notre attention accrue

Les risques liés à l'hydrogène ne changent pas de nature du fait de sa diffusion, mais la dynamique qui s'enclenche provoque sur le marché un appel d'air de compétences, de projets et d'acteurs qui doivent acquérir au plus vite les savoir-faire, les règles et les normes de déploiements d'équipements d'usage de cette technologie avec les plus strictes exigences en terme de sécurité. Ce n'est pas, en soi, un mouvement différent de celui qui a accompagné l'essor des batteries ou hier du gaz et avant-hier des technologies d'usage des carburants pétroliers. Mais nous devons, avec les pouvoirs publics, le préparer, partout où les déploiements s'accroissent.

Les coûts par les effets d'échelle !

Les volumes doivent permettre de faire baisser les coûts et d'atteindre des niveaux de prix qui soient raisonnablement compétitifs avec les solutions existantes, tout en valorisant le premium de valeur intrinsèque qui réside dans la capacité de ces technologies à offrir des solutions bonnes pour le climat et la qualité de l'air. Cette ambition, dont nous sommes depositaires, nécessite dès aujourd'hui de développer des projets à une échelle réaliste et répliquable, sur des business modèles

durables. Nous devons dimensionner proprement les prochains grands projets de déploiements, production et usages, pour montrer des résultats tangibles dans les toutes prochaines années.

La neutralité carbone, vite !

Nous devons enfin mettre en œuvre toutes les solutions permettant de décarboner l'hydrogène, aux fins de réagir effectivement à l'urgence climatique. Ceci signifie bien sûr de favoriser toutes les solutions à base d'électricité décarbonée pour l'électrolyse, et toutes les solutions de traitement des productions à base d'énergies fossiles, pour en neutraliser les effets carbone. C'est à cette aune, la combinaison de ces deux grandes routes, que nous pourrons aller vite dans

les déploiements en mobilisant les actifs et les technologies existantes et les nouvelles promesses de l'énergie verte. Mais c'est aussi par cet effort que nous pouvons fédérer toutes les forces vives de l'énergie et atteindre rapidement des solutions efficaces et compétitives, avec les impacts recherchés sur l'emploi, la croissance et le climat. Sur ce plan, aussi, il faut noter les grands progrès faits dans l'analyse de solutions et des différentes chaînes de valeur de production de l'hydrogène sous l'angle du cycle de vie. La dernière étude réalisée pour le H2 Council par le cabinet LBST, avec le support de McKinsey, que l'on peut trouver sur le site du conseil, montre que nous aurons toutes les solutions pour obtenir un hydrogène bas carbone et que combinées, intelligemment selon les zones géographiques, les potentiels de capture et stockage d'un côté, d'énergie solaire ou éolienne de l'autre, elles permettent, pour des capitaux investis optimisés, de réduire significativement l'empreinte carbone de nos grands systèmes énergétiques, productifs et de transport.

Alors, nous pourrons être fiers d'avoir fait advenir la décennie de l'hydrogène !! Et nous pourrons aspirer au titre de CLIMATE CH₂AMPION !!

L'hydrogène, carburant de nos trajets quotidiens, la solution miracle ?

Damien Schram (104 ILI)



Diplômé de l'Icam site de Lille en 2004, (marié, 4 enfants), j'ai intégré TMMF (site de production de la Toyota Yaris) dans l'atelier Plastique qui injecte, peint et assemble les boucliers. Nous produisons également les tableaux de bord moussés et venons d'accroître notre diversité de pièces manufacturées.

J'ai démarré par un parcours d'intégration sur ligne avant d'occuper un poste de chef d'équipe en production. J'ai évolué ensuite comme ingénieur méthodes en injection et montage plastique avant de devenir Responsable Projets.

Aujourd'hui, j'occupe le poste d'Assistant Manager Engineering (Projets et support Prod/Maintenance).

L'énergie au cœur des enjeux de l'automobile

Rappelons tout d'abord que la passionnante histoire de l'automobile commence avec la machine à vapeur au 18^e siècle. S'en est suivi le moteur à explosion au 19^e siècle accompagné de sa démocratisation. L'idée de la voiture propre qui est très en vogue de nos jours n'est pas si récente que cela. Combien de progrès techniques ont vu jour dans le moteur à explosion ? La voiture électrique, qui est née fin du XIX^{ème} siècle avec la «Jamais contente», semble inaugurer une nouvelle ère pour l'automobile de demain.

De la production des batteries à leur recyclage, en passant par l'extraction des minéraux et la production de l'électricité nécessaire à leur recharge, la question de leur impact sur l'environnement se pose. Mais de manière plus pragmatique, la question de leur autonomie est l'un des autres freins à l'expansion de ce type de véhicule.

L'hydrogène, la solution d'avenir ?

C'est précisément sur ces deux derniers aspects (fabrication des batteries et autonomie) que la voiture à hydrogène trouve son intérêt.

Le véhicule électrique à hydrogène exploite une pile à combustible qui produit de l'électricité à partir de l'oxydation de l'hydrogène. Les rejets dans l'atmosphère font rêver : de l'eau et de la vapeur d'eau. Toutefois, trois enjeux majeurs sont à prendre en compte : la production, la distribution et le stockage embarqué de l'hydrogène.

Question production, la vraie question est de savoir comment sera produit l'hydrogène. Il y a deux voies : celle des hydrocarbures comme le gaz (séparation de l'hydrogène du carbone) et celle de l'électrolyse, qui, associée aux énergies renouvelables comme les éoliennes ou les panneaux solaires, présente un bilan carbone neutre. Question distribution, le déploiement des stations est très coûteux. Leur ravitaillement n'est pas simple non plus. On compte aujourd'hui une dizaine de stations en France contre une centaine en Allemagne ou au Japon.

Question stockage embarqué, les deux principaux problèmes sont la sécurité et le volume. En effet, l'hydrogène est un gaz qui occupe un volume important. On compte 1 kg d'hydrogène pour 11m³, soit le coffre d'un grand utilitaire pour parcourir 100 km !

Il faut donc chercher à réduire ce volume en augmentant la densité de ce gaz. Trois solutions pour cela :

- Stocker à haute pression sous forme gazeuse. A 700 bars, l'hydrogène possède une masse volumique de 42 kg/m³ contre 0,090 kg/m³ à pression et température normales. A cette pression, on peut stocker 5 kg d'hydrogène dans un réservoir de 125l. Cela donne une autonomie de 500 à 600 km.
- Stocker à très basse température sous forme liquide. A -252,87°C et à 1,013 bar, l'hydrogène possède une masse volumique de près de 71 kg/m³. A cette pression, on peut stocker 5 kg dans un réservoir de 75l. Les réservoirs doivent être parfaitement isolés. Cette solution est réservée à la propulsion spatiale.
- Stocker à base d'hydrure (composé H⁻) sous forme solide.



Vue en coupe de la Toyota Mirai - pile à combustible et réservoir à hydrogène haute pression

L'hydrogène chez Toyota

La solution pour l'automobile est de stocker à haute pression. L'enjeu est la sécurisation des réservoirs. Toyota est l'un des leaders dans le domaine de fabrication des réservoirs à hydrogène qu'il renforce de fibres de carbone, des piles à combustible et d'autres composants clés. Toyota a mis à disposition pas moins de 23 700 brevets, représentant vingt années de développement technologique, et portant sur les véhicules hybrides et hydrogène. En septembre 2018, Toyota a annoncé fournir ces systèmes au fabricant d'autobus portugais Caetano. Il est également question d'équiper les bus produits par le géant chinois Beijing Automotive.

Pour sa production propre, Toyota commercialise depuis 2014, la Mirai 1 qui embarque 4,6 kg d'hydrogène à 700 bars, et à présent la Mirai 2 qui embarque 5,6 kg pour 650 km d'autonomie.

Quel sera notre mode de propulsion demain ?

L'hydrogène sera-t-il notre carburant de demain ? C'est très probable. Mais sera-t-il le seul, je ne pense pas. Il n'y a pas de solution miracle. L'avenir ne serait-il pas dans la mixité des technologies selon les besoins (batteries pour la ville, l'hydrogène pour les longues distances).

L'association d'énergies est aussi un progrès notable pour un véhicule plus propre. Il s'agit en particulier de l'hybride essence/électrique qui est déjà disponible sur le marché depuis une dizaine d'années en Europe.

Sans mettre de côté qu'une consommation raisonnée de nos ressources est déjà et sera plus que jamais de mise demain.

Un secteur en expansion

Pour nous, ingénieurs généralistes, le domaine d'exploration est vaste pour faire de l'hydrogène une énergie à la portée de tous.

Le prix de ce type de voiture s'élève à 75 k€ ; un plein d'hydrogène à 60 € pour 600 km.

Que ce soit dans le domaine de la distribution ou dans le domaine de la production des véhicules, il y a encore tant à faire !

Il est nécessaire de développer les stations de recharge et pour cela de réduire les coûts d'installation, sans oublier d'innover sur les modes de production même de l'hydrogène.

Du côté de la production, la pile à combustible est encore très onéreuse notamment en raison de la présence de platine. Le coût de fabrication des réservoirs (entre 2 et 3 k€) pèse aussi lourdement sur le prix de revient.

Le train à hydrogène : Un projet pour les ambitions d'une mobilité décarbonée

Yannick Legay (90 ILI)



Yannick Legay (90 ILI) a démarré sa carrière chez Alstom en 1991 (30 ans) et a occupé différents postes en ingénierie systèmes, production, gestion de projets. En 2008, Yannick prend la direction technique de la plateforme TGV puis la direction de l'ingénierie du site Alstom de la Rochelle (Tramways et TGV). Après avoir occupé le poste de directeur technico-commercial, il est actuellement Directeur de l'Ingénierie d'Alstom France.

La décarbonation de la mobilité

Par ses caractéristiques de transport public, fonctionnant majoritairement à l'électricité, le transport ferroviaire est reconnu comme étant intrinsèquement vertueux du point de vue écologique. Néanmoins, environ 50 % du réseau ferré ouest-européen n'est actuellement pas électrifié. Cette fraction importante du réseau non équipée de caténaires était jusqu'à récemment parcourue exclusivement par des trains diesels.

Dans un objectif du « Zéro émission », les principales solu-

tions pour remplacer les trains diesels vieillissants par des engins à traction purement électrique s'appuient essentiellement sur trois possibilités :

- **Électrifier les lignes :** compte-tenu de la faible densité de trafic des lignes concernées, cette option est aujourd'hui rarement retenue en raison du coût important que représentent de tels travaux d'infrastructure (1 à 3 M€ par km de voie).
- **Utiliser des trains électriques avec batteries de traction.** Cette technique, relativement simple, sera adaptée pour la desserte d'une partie des lignes mais peut nécessiter des temps de recharge longs et contraignants pour l'exploitant ferroviaire.
- **Utiliser des trains à hydrogène.** Cette technologie en rupture permet d'embarquer à bord des trains une quantité importante d'énergie décarbonée et stockable dans des réservoirs.

Parier sur l'hydrogène comme carburant de demain, c'est avant tout proposer un système de production propre de l'hydrogène. L'hydrogène permettant d'atteindre l'objectif d'une mobilité décarbonée provient de l'électrolyse de l'eau (séparation des atomes d'oxygène et d'hydrogène présents dans l'eau par de l'énergie électrique décarbonée essentiellement renouvelable : vent, soleil, hydraulique). C'est l'hydrogène le plus propre que l'on sait produire aujourd'hui.

L'augmentation constante des installations renouvelables comme les éoliennes ou les centrales solaires permet de produire en dehors des périodes de pointe plus d'électricité que nécessaire. Cette électricité « verte » est alors disponible pour

Coradia iLint, long de 54m et composé de 2 voitures



Alternative verte aux TER diesel

L'arrivée prochaine des rames TER H2 s'inscrit dans le plan de la SNCF en faveur de la transition énergétique, du verdissement du ferroviaire et de la neutralité carbone en 2050.

produire de l'hydrogène par électrolyse. Cette énergie stockée sous forme d'hydrogène va pouvoir être mise dans des réservoirs et servir à des usages de mobilité (voiture, bus, train, avion...).

A bord du train, une pile à hydrogène va permettre de générer de l'électricité à partir d'hydrogène et de l'air ambiant. Cette génération d'électricité à bord ne rejette que de l'eau pure et de la chaleur, sans aucune émission polluante.

Une feuille de route pour le verdissement des trains régionaux

Le parc de matériel ferroviaire diesel pour les passagers a connu un très fort renouvellement dans les années 1990-2000. La durée de vie d'un train étant d'environ 30 ans, la question des énergies à promouvoir pour les prochains renouvellements de flotte de trains se pose dès aujourd'hui dans certains pays, se posera d'ici moins de 10 ans en France. Ce choix engagera les Etats pour les 30 années suivantes vis-à-vis de leur capacité à respecter leurs engagements de décarboner le transport à l'horizon 2040-2050.

Face à cet enjeu que vont rencontrer de nombreux pays, Alstom a décidé de travailler l'ensemble de ces solutions de verdissement et de lancer un vaste plan d'innovations sur les batteries et l'hydrogène. Dès 2013, les études d'un train équipé de piles à combustible à hydrogène ont été lancées. Les 2 premiers prototypes ont été mis en service commercial avec passagers en septembre 2018 en Allemagne.



- 1 et 2 - Réservoirs et leur principe de remplissage
- 3 - Module unitaire de pile à combustible (stack)
- 4 - Power pack Hydrogène constitué de plusieurs stacks



Un train de passagers fonctionnant à l'hydrogène déjà en service

Ce train, le Coradia iLint, long de 54 m et composé de 2 voitures est actuellement utilisé sur des dessertes régionales en Allemagne.

La capacité de stockage en hydrogène y est de l'ordre de 260 kg (à 350 bars) ce qui permet de parcourir jusqu'à 1000 km selon les profils de mission et ceci sans émission de CO₂ ni de particules. La recharge s'effectue en 20 minutes environ, comme pour un plein de diesel sur ce type de train.

La pile à hydrogène est au cœur du système en tant que source primaire d'énergie. Le train dispose également d'une batterie Li-Ion par voiture qui va permettre de récupérer de l'énergie électro-dynamique lors du freinage. La batterie libérera son énergie en phase d'accélération en tant que boost et permettra d'optimiser le fonctionnement de la pile à hydrogène pour en améliorer l'efficacité. L'utilisation intelligente de ce système permet de réduire de 15 à 20% l'énergie totale nécessaire.

Le déploiement du train à hydrogène : un tremplin pour la mobilité décarbonée

Le déploiement du train à hydrogène pourrait créer un effet levier sur le lancement de l'usage de cette énergie pour la mobilité. En effet, pour réduire le coût de l'hydrogène vert, sa production doit être massifiée. Un parc de trains régionaux va consommer plusieurs tonnes d'hydrogène par jour en remplacement du diesel.

L'usage ferroviaire d'hydrogène serait donc à la fois important, répétable (tous les jours), localisable (un seul point de rechargement), et sur une longue durée.

La massification de la production permettra de réduire le coût de production de la molécule d'hydrogène et d'attirer d'autres consommateurs (bus, voitures, camions, taxis...) autour d'un même point d'avitaillement.

En France, l'engouement autour de l'hydrogène s'est accéléré ces derniers mois; le lancement par le gouvernement du plan hydrogène national (doté de 7 Milliards d'euros) en est l'illustration. Depuis maintenant presque 3 ans, des discussions ont eu lieu avec le support de la SNCF et de 4 régions françaises pour préciser les caractéristiques des trains attendus et permettre de lancer cette technologie dans nos territoires.

Le ferroviaire, un secteur au cœur de la transition écologique

Le transport ferroviaire a un rôle fondamental à jouer dans la transition écologique. C'est un défi majeur que de rendre ce mode de transport toujours plus attractif et plus performant pour inciter les voyageurs à emprunter un train plutôt qu'une voiture, un TGV plutôt que l'avion... Ce challenge se retrouve dans tous les pays du monde où les infrastructures routières urbaines et péri-urbaines sont saturées et où les réseaux de tramways, métros et autres trains de proximité apportent des alternatives écologiques, sûres, fiables et confortables à cette congestion routière. La filière ferroviaire française est reconnue internationalement pour ses compétences et sa capacité à innover dans des secteurs divers comme la digitalisation pour la sécurité et la fiabilité des trains, le développement de solutions de propulsions sobres et décarbonées.

L'hydrogène : un nouveau moyen de stocker de l'énergie ?

Olivier Villard (117 ITO)



Les études et les campagnes de publicité se font aujourd'hui la guerre pour savoir quelle serait la meilleure technologie pour atteindre nos objectifs écologiques. L'hydrogène nous est vendu comme la substance qui devrait à la fois être aussi facile à utiliser que notre bon vieux pétrole, mais qui serait aussi la solution d'un revirement écologique majeur.

Ne pas oublier l'origine de l'énergie

Lorsque l'on parle d'énergie, il est essentiel de toujours parler de la source de cette dernière. Il nous est primordial d'arrêter de penser qu'une énergie quelle qu'elle soit puisse être gratuite. Tout ce que nous savons construire a pour principe de réorienter une énergie à notre avantage et selon nos besoins; nous ne savons pas la « créer ». Lorsque nous pensons qu'une énergie est dite gratuite, cela veut seulement dire que nous ne sommes pas conscients de son origine, soit par ignorance, soit par omission.

Ainsi lorsque l'on pense à l'hydrogène, ou plus exactement au dihydrogène, nous avons tendance à le voir comme un carburant mais il est important de ne pas le comparer au pétrole. Cette molécule à deux atomes est trop peu disponible sur Terre naturellement, et n'est pas extraite ou collectée aujourd'hui.

Les défis de l'hydrogène

Nous sommes nombreux à avoir expérimenté la formation de dihydrogène au collège via l'électrolyse de l'eau mais la technique industrielle doit encore se développer pour optimiser et rentabiliser sa production. Il présente tout son potentiel lorsqu'il est produit à partir d'une énergie verte et sans l'utilisation d'hydrocarbures. C'est là un caractère primordial de cette technologie car autrement, il ne présente plus d'avantage pour décarboner l'industrie. C'est pourquoi il nous faudra en parallèle veiller à l'origine de notre électricité.

Une fois obtenu, il faut le stocker et palier à deux de ses caractéristiques physiques. Premièrement sa très faible masse volumique à pression et température normales (env. 90 g/m³) oblige à rechercher un moyen de stockage à haute densité et deuxièmement la faible taille de ses molécules rend l'étanchéité des réservoirs complexe. Différentes méthodes sont à l'étude (ex.: stockage sous pression, sous forme liquide, sous forme solide...) pour chercher à avoir des solutions sûres, efficaces et répondant aux besoins.

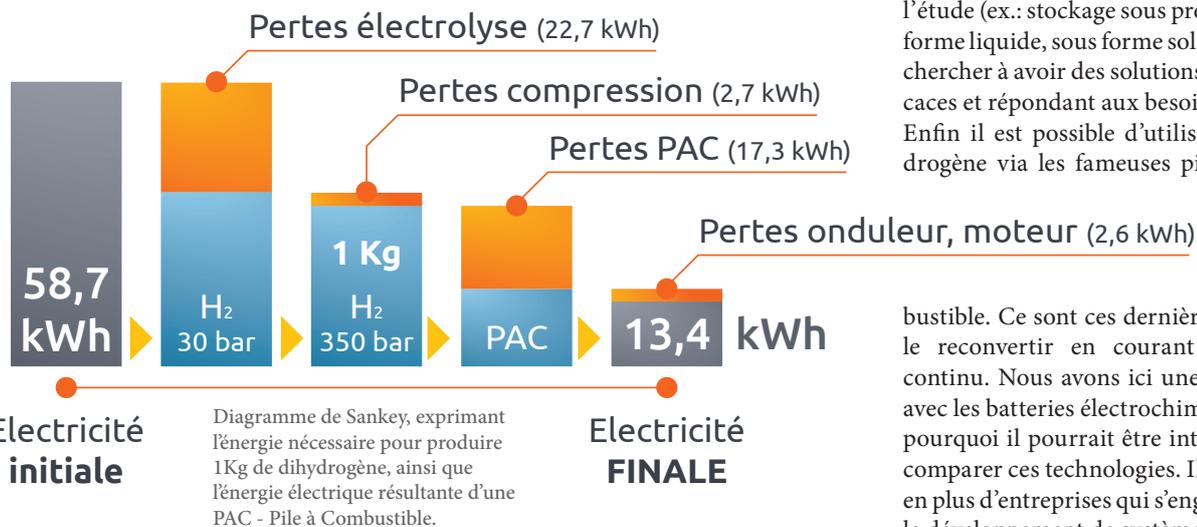
Enfin il est possible d'utiliser ce dihydrogène via les fameuses piles à com-

bustible. Ce sont ces dernières qui vont le reconvertir en courant électrique continu. Nous avons ici une similitude avec les batteries électrochimiques, c'est pourquoi il pourrait être intéressant de comparer ces technologies. Il y a de plus en plus d'entreprises qui s'engagent dans le développement de systèmes intégrant

des piles à combustible. Il serait possible d'imaginer transposer ou fusionner une partie des technologies développées en lien avec ces dernières : l'avenir dépendra de l'étendue de notre imagination.

Quelques mots sur moi

Jeune ingénieur voulant jouer un rôle dans la gestion énergétique, je travaille depuis mon diplôme dans le développement de batteries au lithium pour des véhicules électriques. J'espère avoir au cours de ma carrière la possibilité de m'investir aussi dans l'hydrogène car je pense que ça peut être une des solutions majeures dans un nouveau modèle énergétique. Son utilisation massive aura évidemment son lot de difficultés, mais j'espère que nous, ingénieurs et citoyens, serons capables de nous en servir de façon juste et honnête.



L'hydrogène comme un moyen de stocker de l'énergie et non pas comme une source

L'hydrogène doit être vu comme un vecteur d'énergie et non pas comme une source d'énergie. Il intervient au milieu d'une chaîne de transformation dont on doit encore bien définir le début et la fin pour obtenir une solution bénéfique. Aujourd'hui l'un de nos principaux vecteurs énergétiques est l'électricité, mais contrairement à ce dernier, l'hydrogène présente l'avantage d'être un matériau physique et ainsi d'être stockable et transportable. Ces transformations ont aussi un coût énergétique qu'il ne faut pas négliger, car elles réduisent le rendement final. C'est pourquoi il faut pouvoir justifier son utilisation, sinon les technologies électriques classiques peuvent s'avérer les plus économes, quitte à adapter ses habitudes plutôt que la technologie. Dans le cas contraire, il faut répondre à 3 problématiques: la production, le stockage et l'utilisation de l'hydrogène.

Aviation du futur, les vols à l'hydrogène

Résumé de l'article Info-pilote (n°779 de février 2021) Bernard Miermont

La combustion de l'hydrogène dégage 3 fois plus d'énergie que celle du pétrole, sans aucun déchet polluant mais avec le gros défaut de sa très faible masse volumique.

1 kg d'hydrogène à pression ambiante occupe un volume de 11 000 litres. Même avec l'avantage de sa plus forte énergie, il faut donc plus de 3 000 litres d'hydrogène pour remplacer 1 litre d'essence.



Hydrogène gazeux comprimé

La pression dans un réservoir de technologie récente peut monter jusqu'à 700 fois la pression atmosphérique. Malheureusement le volume du gaz ainsi comprimé reste encore 7 fois plus important que celui du kérosène à quantité d'énergie identique, avec de très lourds réservoirs (plus de 10kg pour 1 kg d'hydrogène comprimé). Un projet d'Airbus concerne une aile volante à la forme épaisse pour loger ces volumineux réservoirs.

Hydrogène liquide LH2

La pression de liquéfaction de 1820 bars étant irréaliste, la seule méthode pour obtenir du LH2 consiste à abaisser sa température, à pression ambiante, à moins 253 degrés Celsius (proche du zéro absolu). La liquéfaction permet de réduire considérablement le volume qui reste toutefois 4 fois plus important que le volume du kérosène équivalent en énergie. Le volume réellement occupé par le réservoir entouré d'une grosse épaisseur d'isolant est au moins le double de celui du gaz seul. Le rendement d'un réservoir cryogénique atteint 25% c'est à dire que le carburant consommable représente le 1/4 de la masse totale du réservoir plein. Le réservoir et son hydrogène pèsent en définitive 1.5 fois plus lourd que la quantité de kérosène remplacée. Il en résulte aussi que l'effet bénéfique du délestage consécutif à la consommation durant le vol devient à peine perceptible.

EN RAISON DU STOCKAGE, LES AVIONS AVEC DE LOURDS RÉSERVOIRS D'HYDROGÈNE SERONT À PRIORI CANTONNÉS AUX VOLS DE COURTS TRAJETS (moins de 3 heures)

Avion hybride électrique

Un autre projet d'Airbus concerne un avion électrique à hélices, destiné aux vols courts. La batterie, trop lourde, restitue 40 fois moins d'énergie par kg que le kérosène.

Il est donc tentant de chercher une hybridation avec une pile à combustible qui fournit l'électricité à partir d'un réservoir

Le saviez-vous ?... L'hydrogène crée la révolution de l'aviation

Le passage du kérosène à l'hydrogène est comparable à celui de l'hélice aux réacteurs.

A l'horizon 2050, 40% de la flotte européenne court et moyen-courrier pourrait être converti à l'hydrogène. Par contre, pour mettre sur le marché un premier avion décarboné en 2035 il faudra que tous les choix technologiques soient définis, au plus tard, en 2025.

L'hydrogène propulse, déjà, les fusées Ariane.

L'hydrogène est, globalement et à 90%, compatible avec les réacteurs des avions actuels. Le passage à l'hydrogène est « techniquement faisable ».

Un A 320 d'Airbus, qui emporte 23 tonnes de kérosène, pourrait se contenter de 9 tonnes d'hydrogène mais ces 9 tonnes nécessitent environ, 150 m³ de réservoir, soit 4 fois plus que le kérosène.

L'hydrogène doit être maintenu à -253°C. On pourrait imaginer une isolation multicouche sous vide, du type de celle des réservoirs d'Ariane 5.

Un problème de sécurité est posé par l'hydrogène. La molécule d'hydrogène est si petite qu'elle peut passer à travers l'acier, les joints...le risque de fuite est un des problèmes majeurs et ce d'autant plus qu'il s'agit d'un produit inflammable.

Airbus a dévoilé récemment 3 concepts d'avions neutres en carbone, dont le ZEROe, une aile volante.

L'aile volante a l'avantage d'offrir une capacité de stockage du carburant plus grande que le profil classique d'avion.

Il faudra construire, près des aéroports, des centrales de production d'hydrogène car cet élément est plus difficilement transportable que le kérosène.

Disons, enfin, que tous ces développements techniques ont et auront un coût non négligeable. Le passage à l'hydrogène renchérit le prix des billets d'avion.

(La plupart de ces informations ont été puisées dans une enquête effectuée par Bruno Trévidic, du journal Les Echos)

d'hydrogène comprimé. Le gros avantage de l'hybridation par rapport à un pack de batteries seules est la rapidité de remplissage du réservoir.

SI L'HYBRIDATION FAIT PRENDRE DU POIDS, ELLE PERMET AUSSI LA RAPIDITÉ DE REMPLISSAGE DU RÉSERVOIR, AVEC DES PERFORMANCES SATISFAISANTES EN MILIEU URBAIN POUR LES TAXIS VOLANTS (Démonstration aux J.O. de Paris 2024)

L'hydrogène reste le carburant du futur

Très dense en énergie massique, il sert aujourd'hui à la propulsion des fusées ou des missiles hypersoniques. Hors de l'atmosphère, la résistance de l'air et donc le volume ont moins d'importance. Le recours à l'hydrogène liquide pour le vol supersonique au delà de Mach 3 est incontournable pour au moins une bonne raison : la très basse température du LH2 est le seul moyen de refroidir la peau de l'avion et de climatiser la cabine.

L'UTILISATION DE L'HYDROGÈNE POUR SE DÉPLACER DANS LES AIRS EST UNE HISTOIRE QUI COMMENCE.

Le développement des piles à combustible, un point clé du changement écologique

Clément Ammeux (114 ILI)



En 2013, lors de ma 4^{ème} année à l'Icam, c'est par hasard qu'un ami m'a tendu une revue scientifique en disant «ça va t'intéresser, il existe un genre de batterie sans lithium qui ne rejette que de l'eau». En réalité, l'article traitait du sujet renaissant de la production d'hydrogène et de leur exploitation via la pile à combustible, dont le principe avait déjà été découvert en 1839. Après cette découverte, une idée a pris place dans mon esprit : je voulais tourner ma carrière vers le développement de cette technologie. Celle-ci se présentait à moi comme l'une des manières les plus abouties de travailler dans une industrie participant au tournant écologique.

L'obtention du poste souhaité

Au cours de mes études, l'apprentissage de l'allemand n'ayant laissé personne dupe, c'est grâce à un VIE que j'ai appris cette langue. Puis, faisant le constat que la France ne s'était à cette époque pas encore autant engagée que sa voisine dans le déploiement de cette technologie, j'ai saisi l'opportunité de rejoindre l'équipe de R&D de Sunfire. Cette entreprise, implantée à Dresde, a été créée avec l'ambition de devenir une référence sur la technologie des Piles à combustible à haute température (convertissant l'hydrogène en électricité et en eau) et des électrolyseurs (convertissant l'eau et l'électricité en hydrogène).

Au sein d'une équipe forte d'une dizaine d'années d'expé-



Conteneur d'électrolyseurs SOEC

rience sur ce sujet, j'ai découvert les détails du fonctionnement électro-chimique de ces appareils, ainsi qu'une chaîne de production encore composée de procédés manuels et semi-automatiques. Ma mission consiste actuellement à simplifier certains composants de nos produits en vue de réduire les coûts et de rendre possible l'automatisation complète de la production. Je travaille essentiellement sur 2 axes : d'une part, la réalisation de prototypes et les expérimentations sur les technologies de fabrication, ce qui implique une relation quotidienne avec la production. D'autre part, l'amélioration de produits et la confrontation d'idées sur l'amélioration de ses performances, afin de donner accès à une compréhension de cette technologie.



Modèle d'un électrolyseur alcalin de 5000 kW

Un secteur dynamique qui offre encore beaucoup à explorer

Sunfire développe également les systèmes qui exploitent les piles à combustible et les électrolyseurs. Pour optimiser le potentiel de cette technologie, il est important qu'un système de régulation en assure le fonctionnement en fonction des entrées et sorties. Cela permet, en exploitant non seulement l'électricité mais aussi la chaleur (par exemple dans les aciéries), d'atteindre un rendement allant jusqu'à 95%. C'est un avantage important de la technologie des électrolyseurs de type Solid Oxide Electrolyser Cell, dans laquelle la réaction d'électrolyse se passe dans une membrane en céramique chauffée à haute température (environ 800°C).

Dernièrement, afin de répondre aux enjeux d'industries ne disposant pas de chaleur, Sunfire s'est agrandi avec l'acquisition d'un partenaire spécialisé dans l'électrolyse alcaline, fonctionnant à plus basse température (environ 70°C). Cela permet de répondre aux demandes émanant de clients de plus en plus divers. Enfin, en plus de produire de l'électricité ou de l'hydrogène, Sunfire produit également des hydrocarbures de synthèse via une réaction chimique qui combine l'hydrogène et le CO₂. Ce procédé est déjà mis en œuvre afin d'alimenter les types de transport ne bénéficiant pas jusqu'ici d'une maturité suffisante dans les appareils à propulsion électrique (batterie ou hydrogène), comme c'est le cas par exemple dans l'aviation.

Perspectives d'avenir personnel

En ce qui me concerne, je souhaite poursuivre ma vie professionnelle dans ce domaine. Les divers plans hydrogène lancés en 2020 donnent place à des projets de plus en plus nombreux. Cette industrie s'engage actuellement sur des volumes ambitieux et les besoins en compétences et en partenaires sont immenses. Par la suite, je souhaite élargir mes responsabilités et apporter un point de vue à des décisions stratégiques, éclairé par les connaissances techniques que je suis en train d'apprendre.

L'hydrogène est la mobilité

Ludovic Flatet (100 AVE)



Actuellement, Directeur Industriel de la Business Unit New Energies Chez Plastic Omnium (BU dédiée en particulier à L'hydrogène) depuis juillet 2020, j'ai fait toute ma carrière chez Plastic Omnium depuis 2000. J'ai occupé des postes en développement process comme Ingénieurs process, Responsable méthode entre 2000 et 2011. Puis, je fus responsable production et responsable technique de l'usine de Compiègne entre 2011 et 2015. Enfin, j'ai occupé successivement les postes de Responsable Qualité Développement Europe puis Responsable Industrialisation Europe entre 2015 et 2020.

L'architecture d'une voiture.



Pourquoi l'hydrogène et quels sont ses avantages ?

Quels sont les bénéfices d'une voiture électrique à pile hydrogène en comparaison d'une voiture à batterie, d'une voiture thermique ou d'une voiture hybride ?

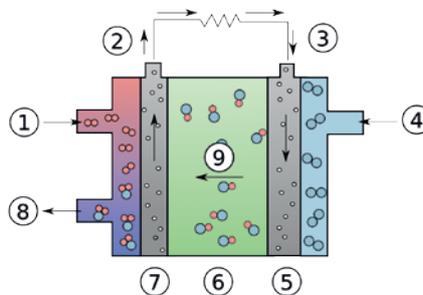
Tout d'abord en comparaison d'un véhicule thermique, l'avantage est environnemental. En effet, un véhicule à hydrogène ne génère pas de CO₂ mais seulement de l'eau comme émission. Si, maintenant, on le compare avec une voiture électrique à batterie, les avantages sont multiples : tout d'abord l'autonomie équivalente à une voiture thermique pour un temps de recharge n'excédant pas quelques minutes. Ensuite le poids, en effet les batteries embarquées dans un véhicule peuvent représenter jusqu'à 30 % du poids total du Véhicule. On utilise donc une partie importante de l'électricité de la batterie pour contrer simplement cet effet de surpoids.

Enfin aujourd'hui, les véhicules hybrides thermiques et électriques sont de véritables produits de transition, mais pas totalement rationnels en termes de coût et de CO₂. Les coûts et la masse sont doublés, les voitures transportant deux moteurs, un réservoir à carburant, une boîte de vitesses et une batterie. À l'inverse, le mariage hydrogène et batterie permet de réduire le nombre de composants à un seul moteur électrique, une pile à combustible et une batterie. La solution apporte une forte autonomie et un temps de recharge de quelques minutes grâce à l'hydrogène, tandis que la batterie permet de régler le problème du rendement de la pile à combustible. Avec cette architecture, parfois la voiture ne marchera que sur la batterie ou parfois elle sera rechargée par la pile à combustible.

La PAC (la Pile A Combustible)

Bien qu'il existe différentes technologies de piles à combustible, les constructeurs de voitures à PAC H₂ préfèrent celles à membrane PEM (protons exchange membrane). L'hydrogène reçu des réservoirs va passer au-dessus de l'anode, ce qui aura pour effet de le dissocier en ions hydrogène (protons) et en électrons. Seuls les protons peuvent traverser la membrane électrolyte polymère située entre les 2 électrodes. Les

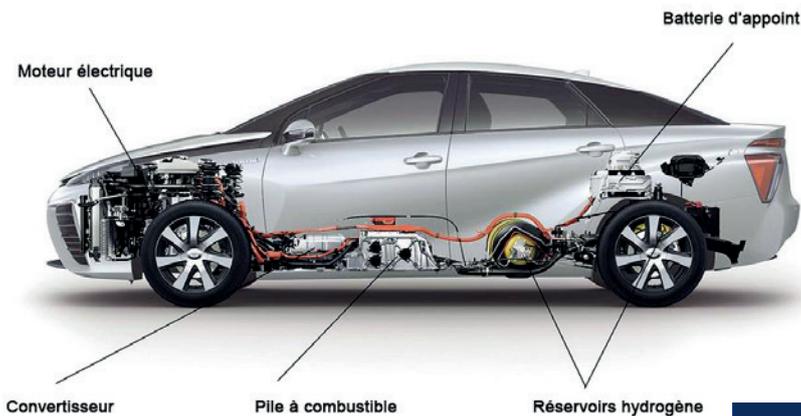
Courant électrique produit par une PAC (Pile à Combustible)



- 1 - Dihydrogène
- 2 - Anode
- 3 - Cathode
- 4 - Oxygène
- 5 - Catalyseur
- 6 - Electrolyte
- 7 - Catalyseur
- 8 - Excès de dihydrogène - eau - chaleur
- 9 - Electrolyte

électrons empruntent un circuit extérieur, formant le courant électrique.

À la cathode, les électrons et les protons s'associent à l'oxygène reçu de l'air extérieur pour former de l'eau pure. Aucun polluant ni autre résidu n'accompagne cette opération, juste un dégagement de chaleur idéal pour alimenter le chauffage de l'habitacle.

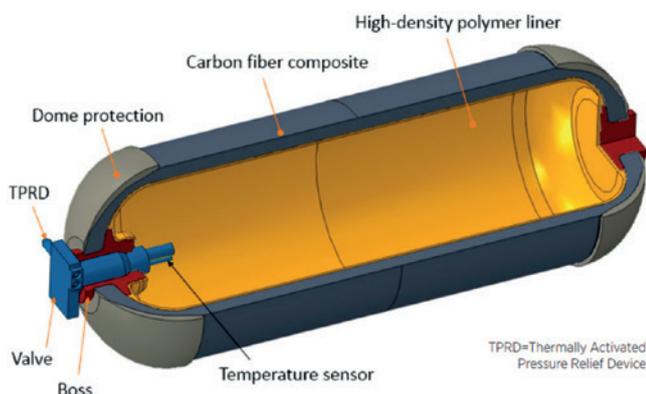


Une voiture à pile hydrogène (FCEV = Fuel Cell Electric Vehicles) est d'abord une voiture électrique, mais qui reçoit principalement son énergie d'une pile à combustible. Son architecture se compose : d'une PAC (Pile à Combustible), d'un réservoir, d'une batterie tampon

Le réservoir haute pression ou high pressure vessel

Plus la pression de stockage dans les réservoirs est élevée (700 bars par exemple), plus la quantité de gaz délivrée l'est aussi. Ces réservoirs sont réalisés en matériaux composites de haute technicité et sont complétés par différents dispositifs : une électrovanne, un régulateur haute pression et un clapet de surdébit. Les réservoirs subissent des tests draconiens avant d'être homologués, incluant parfois des tirs à la mitrailleuse. Leur comportement est observé lors de tests de collision et d'incendie plus poussés qu'avec des véhicules thermiques classiques.

Des détecteurs H₂ sont répartis dans le véhicule pour assurer la sécurité. En cas d'alerte, l'électrovanne coupe l'arrivée en gaz, la pile à combustible s'arrête et une ventilation va se charger d'expulser l'hydrogène éventuellement présent à bord.



La batterie tampon

Comme pour une voiture hybride classique, le besoin en capacité de la batterie n'est pas très élevé, juste quelques kilowattheures. Concrètement, le pack ne permettrait de parcourir qu'une poignée de kilomètres tout au plus.

Un vecteur énergétique prometteur

(source Sciences et Vie)

- 1 kg d'hydrogène contient 3 fois plus d'énergie que 1 kg de gazole et 2 fois plus d'énergie que 1 kg de gaz naturel.
- L'hydrogène (selon Mc Kinsey) pourrait être la source d'1/5 de l'énergie consommée sur la planète en 2050.
- L'hydrogène devrait permettre de réduire de 75 à 90% la contribution du transport aérien à l'effet de serre.

Quand pourra-t-on imaginer de voir rouler ces véhicules à hydrogène ?

Les premiers utilisateurs de cette technologie vont être avant tout le transport de marchandises et les transports en commun et ceci certainement dans les 5 ans qui viennent. La raison est simple : les camions, les bus et les véhicules utilitaires ne peuvent pas compter sur les batteries pour se décarboner. Pour propulser un poids lourd de 38 tonnes à pleine charge, il faudrait l'équiper d'une batterie de 14 tonnes ! Or, ces véhicules représentent près de 10 % du parc roulant dans le monde et 30 % des émissions. Il y a urgence à les électrifier, et ils le seront grâce à l'hydrogène.

Côté particuliers, on imagine plus raisonnablement une première massification entre 2028 et 2030. En effet, certainement deux raisons à cela : tout d'abord, il faut du temps aux constructeurs pour intégrer cette technologie dans les véhicules et donc modifier les architectures véhicule. La deuxième raison tient au fait d'être capable de créer un réseau de distribution suffisamment dense.

Chez Plastic Omnium, équipementier de rang 1, qui ambitionne de devenir un des leaders mondiaux dans cette technologie, la première estimation est que 200 000 véhicules à hydrogène seront en circulation dans le monde d'ici à 2025. Cette date représentera un point d'inflexion avec l'arrivée des premiers véhicules particuliers. Cela permettra de faire croître le marché à 2 millions d'unités en 2030, dont 300 000 à 400 000 camions et utilitaires et 1,7 million de voitures individuelles. L'hybride de 2030 sera à batteries et hydrogène.

Les 3 couleurs de l'hydrogène

- GRIS : Hydrogène actuel, extrait des combustibles fossiles, principalement du gaz naturel.
- BLEU : Hydrogène décarboné, en captant le CO₂ (vapoformage ou stockage géologique).
- VERT : Hydrogène produit sans émission de CO₂, à partir d'électricité renouvelable ou d'énergie nucléaire.

Une industrie en transformation

Chloé Gros (105 ITO)



Diplômée de l'Icam site de Toulouse, j'ai trouvé mon premier emploi en tant qu'ingénieur méthodes chez Arial Concept, comme sous-traitant d'Airbus sur le projet A380, pour l'industrialisation des logiciels téléchargeables à bord de l'avion.

Attirée par l'industrie et ses contrastes les plus marqués, je me suis tournée vers la sidérurgie en 2008 pour un poste dans la maintenance mécanique, pendant 12 ans dans le département Fonte en tant qu'ingénieur fiabiliste puis ingénieur projet. Depuis 2019, je suis en charge de projets de maintenance transversaux usine, dans un service central.

Ottawa 2005, à l'Institut de Recherche en Construction

A l'occasion de mon mémoire de fin d'études, j'ai découvert des solutions d'avenir pour l'habitat dans nos sociétés modernes. Les technologies innovantes, comme les panneaux photovoltaïques, les moteurs à cogénération externe, la géothermie, étaient testées dans des maisons expérimentales du Centre Canadien des Technologies Résidentielles. Cette année-là, j'ai pu participer à l'installation de la première pile à combustible résidentielle, qui combine la production de chaleur et d'électricité dans le garage d'une maison canadienne type. Cette expérience m'a sensibilisée aux enjeux énergétiques de notre société.

Une pile à combustible dans nos maisons, est-ce possible ?

J'ai pu ainsi mesurer le pas à réaliser dans notre pays pour développer les énergies renouvelables et optimiser l'énergie jusque dans nos maisons et nos activités quotidiennes (transport, chauffage, appareils domestiques).

Sur la figure ci dessous, nous voyons la part d'émissions de CO₂ en France pour le chauffage résidentiel (15%), assez proche de la part de l'industrie manufacturière, contrairement à ce que l'on pourrait imaginer. Intégrée dans l'équipe de maintenance mécanique du département Fonte, en charge de projets de fiabilisation et de rénovation, j'ai commencé au déchargement des matières premières. Mon bureau était situé

Les avantages de la pile à combustible

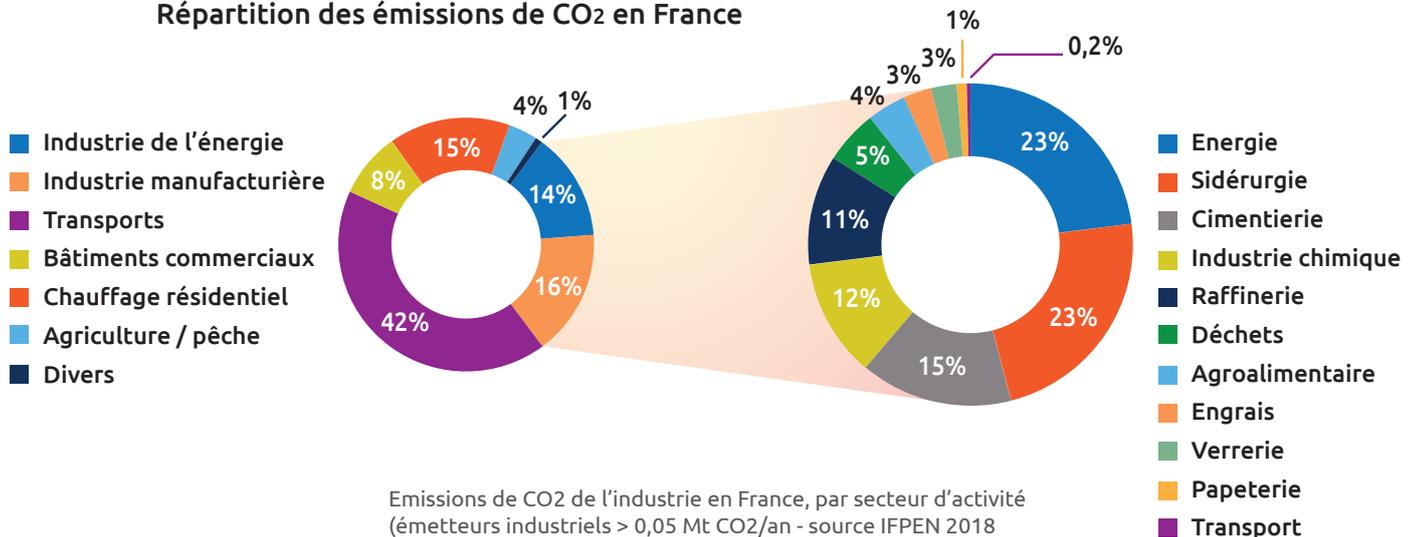
Une pile à combustible fonctionne sur le même principe qu'une batterie mais n'a pas besoin d'être rechargée car celle-ci est continuellement alimentée en combustible. La réaction électrochimique, dans laquelle l'oxygène et l'hydrogène se combinent pour former de l'eau, crée un courant électrique et de la chaleur.

Ne nécessitant pas de combustion directe dans l'air, elle n'émet pas de gaz polluant ; ne comportant pas de turbine, elle est parfaitement silencieuse et offre un rendement énergétique total de 80 % (pour 25 à 30 % avec des moteurs à gaz de puissance similaire).

En fournissant chaleur et électricité elle permet au particulier de ne plus dépendre d'un réseau de distribution collective. Toute l'organisation classique du transport d'énergie est ainsi remise en question...

“au pied” de la grande cheminée rouge et blanche de la chaîne d'agglomération des minerais (120 m), puis, entre les deux hauts fourneaux (102 m). Ces “phares”, dans le paysage côtier de mon enfance, ont pris de plus en plus d'importance pour moi.

Répartition des émissions de CO₂ en France



Comment ne pas être sensible et responsable de ce que nous respirons !

Les exigences environnementales, devenant toujours plus contraignantes, à juste titre, le site a investi plus de 100 millions d'euros ces dix dernières années sur des projets environnementaux : dépoussiérage à l'aciérie, traitement et recirculation des fumées de l'agglomération, désulfuration du gaz de cokerie, technologies big data et objets connectés pour l'analyse des poussières... Au fil des années, j'ai vu ces installations s'intégrer au processus de fabrication, et de nettes améliorations sur les fumées. En effet, les rejets du site ont fortement diminué: -45% de dioxyde de soufre et d'oxyde d'azote, -70% de poussières, -85% de dioxines.

Ces progrès sont encourageants et de nouveaux investissements sont en cours à Fos-sur-Mer pour réduire encore l'empreinte environnementale et produire durablement.

Le groupe ArcelorMittal s'est engagé à réduire de 30 % les émissions de CO2 en Europe en 2030 et atteindre la neutralité carbone mondiale en 2050.

Dans la sidérurgie, l'enjeu principal est au haut-fourneau, pourquoi ?

Rappelons-nous le diagramme Fer- Carbone ; dans l'acier il y a entre 0,02% et 2% de carbone. C'est peu et pourtant...

A Fos, 2,6 millions de tonnes de charbon sont utilisées chaque année pour produire de la fonte aux hauts fourneaux et représentent 90% du bilan carbone des émissions directes du site (production 4 Mt d'acier). Dans la cuve des hauts fourneaux a lieu la réduction et la fusion des minerais de fer par l'apport de carbone, dégageant ainsi une grande quantité de CO2.

Plusieurs leviers pour réduire les émissions de CO2 sont identifiés : l'acier circulaire, le carbone circulaire et l'hydrogène.

Ci-dessous : Inspection par drone de haut fourneau
A droite : Sur le plancher de coulée du haut fourneau



Fos-sur-Mer 2008 - 2021, site sidérurgique d'ArcelorMittal

Dans notre usine de Fos, l'économie circulaire est importante, comme la production de ciment à partir de laitier de haut-fourneau pour une empreinte CO2 inférieure à celle du ciment classique. Nous recyclons les palettes en bois d'emballage dans la chaudière biomasse pour chauffer les bâtiments administratifs, économiser du fioul et du CO2.

Le prochain challenge est de multiplier par dix la quantité d'acier recyclé à l'aciérie, d'ici 2030, en investissant dans deux fours électriques (un pour réchauffer l'acier liquide, l'autre pour fondre des ferrailles), réduisant ainsi la production de fonte.

Deux axes d'innovations sont en cours sur plusieurs sites sidérurgiques européens pour :

- Recycler le carbone ; par exemple à Fos, celui contenu dans les gaz de hauts fourneaux pour produire des composés utilisables dans la fabrication de polymères, solvants et carburants.
- Remplacer le charbon par de l'hydrogène vert pour réduire le minerai de fer sans émettre de CO2.

Le constat est clair, l'industrie sidérurgique s'est beaucoup transformée depuis la révolution industrielle jusqu'aux moyens actuels de pilotage automatisé, et demain avec un système productif optimisé pour réduire au maximum son impact environnemental et climatique.



En sidérurgie, l'hydrogène renouvelable devient une solution pour décarboner.

L'implication dans de tels challenges énergétiques est possible dans cette industrie alliant gigantisme des installations, technologies de pointe, femmes et hommes pour produire un matériau performant, recyclable à l'infini, l'acier.

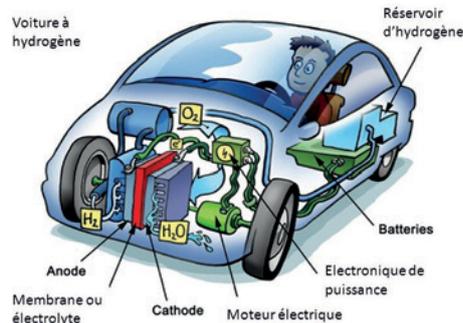
L'hydrogène pour stopper l'émission de carbone des véhicules routiers ?

Vianney Sterlin (97 INA)



L'engouement actuel pour l'hydrogène concerne entre autres les secteurs du transport routier des marchandises mais également celui des personnes. Il est vrai que l'hydrogène, lorsqu'il est produit à partir d'énergie renouvelable, peut être un moyen efficace de décarbonation des véhicules.

Les véhicules à hydrogène sont des véhicules à moteurs électriques, ces derniers étant alimentés par l'électricité produite par une pile à combustible. Ces véhicules entrent directement en concurrence avec les véhicules électriques à batteries. L'argument principal avancé par les partisans du véhicule à hydrogène est la recharge qui prend 5 minutes à la station-service, comme on peut le faire aujourd'hui avec les moteurs à combustion interne. Un autre point fort mis en avant est le poids du réservoir d'hydrogène, bien que volumineux, qui est bien moindre que le poids des batteries. De ces avantages, en découle un intérêt de l'hydrogène principalement pour les véhicules lourds (autobus ou camions), pour lesquels le temps de ravitaillement ou la charge utile sont des critères importants pour les besoins du service.

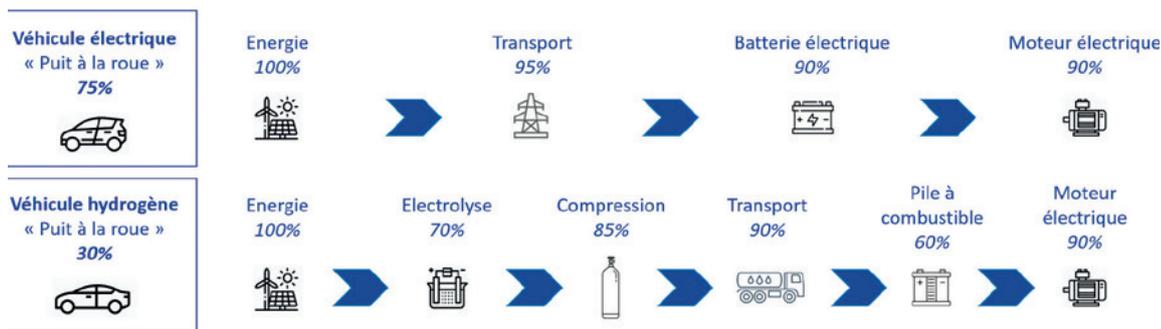


produits par Toyota (Mirai) ou Hyundai (Nexo) sont d'ailleurs proposées à plus de 70.000 euros, soit un prix 2 fois plus élevé que celui de leurs équivalents à batteries.

Bien sûr, tous ces coûts vont être réduits au fil des années qui viennent sachant que de nombreux acteurs entrent sur ce segment. Néanmoins, les batteries font également d'importants progrès au fil du temps. Le gros avantage du temps de ravitaillement du véhicule à hydrogène perd peu à peu de sa consistance lorsque l'on sait que les réseaux de recharge se développent rapidement. Les réseaux de superchargeurs Tesla ou son concurrent Ioney ont déjà des bornes de recharge installées à 250 voire même à 350kW de puissance bientôt. Pour un véhicule qui consomme environ

Rentabilité énergétique d'un véhicule électrique vs. véhicule hydrogène

Taux de conversion d'énergie (en %) pour chaque étape



En ce qui concerne le secteur automobile, il apparaît que les véhicules à hydrogène ont plusieurs inconvénients par rapport à leurs homologues à batteries :

- Le premier obstacle est le rendement du « puits à la roue » de la voiture à hydrogène qui est nettement plus faible que celui d'une voiture électrique à batteries. En effet l'électrolyse de l'eau mais aussi la compression de l'hydrogène à l'état liquide pour pouvoir être transporté, et enfin la génération d'électricité par la pile à combustible, ont des rendements moyens qui, mis bout à bout, atterrissent à 30% contre environ 75% pour les véhicules à batteries :

- En découle un coût de revient au kilomètre des véhicules à hydrogène particulièrement élevé : pour produire l'hydrogène vert, qui est le seul qui peut être intéressant dans la transition énergétique, il faut une énergie considérable pour l'électrolyse de l'eau au pied des éoliennes. Ensuite, la compression de l'hydrogène dans des réservoirs puis son transport vers les stations de distribution coûtent également très chers. Enfin, au sein même du véhicule, le réservoir en matériaux composites pour résister à une pression jusqu'à 700 bars et la pile à combustible embarquée sont également très onéreux. Les premiers véhicules de tourisme

20 à 25 KWH/100km, vous récupérez 400km d'autonomie entre 15 et 20 minutes de charge ! Le coût de fabrication des batteries lithium-ion a été divisé par 3 entre 2015 et 2020, mais surtout leur densité énergétique (énergie stockée par kg) ne cesse de progresser. Les cathodes sans Cobalt (élément souvent décrié par les médias pour les conditions de son extraction en République Démocratique du Congo) sont déjà une réalité, et surtout les batteries à électrolyte solide, qui vont arriver dans la seconde partie de la décennie, seront encore plus performantes du point de vue densité énergétique mais aussi en termes de vitesse de charge.

Au final, les véhicules à hydrogène peuvent donc faire sens pour décarboner des flottes de véhicules lourds (camions ou autobus) qui ont besoin de se recharger rapidement ou qui parcourent quotidiennement des kilométrages élevés. Le réseau de stations de ravitaillement, aujourd'hui inexistant, devra par contre être développé. Les batteries n'ont néanmoins pas dit leur dernier mot, même pour ces applications lourdes, les deux technologies pouvant très bien cohabiter. Pour l'automobile, l'hydrogène semble par contre avoir trop d'inconvénients pour rivaliser avec la technologie batterie, qui est déjà performante et qui continue de progresser.

Un écosystème de mobilité hydrogène

François Challet (104 INA)



La fabrication d'hydrogène à partir d'énergie renouvelable est importante pour l'avenir.

Technique et Ethique vers un écosystème de mobilité hydrogène

Plusieurs expériences dans le développement d'appareils de production d'eau chaude et de chauffage m'ont amené à m'intéresser à l'énergie dans l'habitat et plus globalement à la transition énergétique. Je n'avais jamais envisagé une carrière dans le domaine public, sans doute par méconnaissance des opportunités existantes. C'est le contenu d'une mission stimulante techniquement et pleine de sens sur le plan éthique qui m'a conduit à rejoindre le SyDEV (Syndicat Départemental d'Énergie et d'équipement de la Vendée) pour déployer un écosystème de mobilité hydrogène particulièrement innovant.

Le SyDEV et la production d'hydrogène par électrolyse à partir d'éoliennes

Le SyDEV est, depuis toujours, convaincu que l'utilisation de l'hydrogène n'a de sens que s'il est élaboré de façon vertueuse. En effet, l'hydrogène obtenu par vaporeformage (utilisé par certains procédés chimique et pétrochimique) émet près de 10 fois plus de CO₂, au cours de son élaboration, que l'hydrogène produit par un électrolyseur alimenté par de l'électricité renouvelable. Ce constat nous a conduits à envisager une production d'hydrogène par un électrolyseur alimenté directement par 3 éoliennes de



Vue de synthèse du site de production d'hydrogène vert de Bouin avec les éoliennes l'alimentant en arrière-plan

Essentiel architectes

La mission du SyDEV

Ce syndicat, auquel adhèrent toutes les communes et intercommunalités vendéennes, agit pour leur compte par transfert de compétences, pour garantir le service public de la distribution des énergies à tous les Vendéens. Au-delà de ses missions premières, le syndicat est reconnu nationalement pour son dynamisme dans les projets innovants (Smart Grid, autoconsommation...) et la mise en œuvre d'une politique en faveur de la transition énergétique. Cela se concrétise notamment par l'accompagnement des collectivités dans la rénovation énergétique de leurs bâtiments et par le développement de carburants alternatifs. Une intervention, dès 2015, dans la création d'un réseau de bornes de recharge public a permis de faire de la Vendée un des départements le plus électromobile de France. Plus récemment, le déploiement de stations GNV et bio GNV a permis de proposer aux transporteurs responsables un carburant leur permettant de réduire leur empreinte environnementale et de créer un avantage concurrentiel en proposant une offre de transport décarbonée.

C'est donc naturellement que le SyDEV a engagé une réflexion sur l'hydrogène en 2015. Le déploiement de la mobilité hydrogène présuppose de développer simultanément un site de production, des infrastructures de distribution et d'identifier des usagers afin de ne pas entrer dans la problématique de l'œuf et de la poule.

notre SEM (Société d'Économie Mixte) Vendée Énergie. Ce raccordement direct de l'électrolyseur aux éoliennes sera une première en France et garantira un hydrogène 100% vert contrairement aux sites raccordés sur le réseau qui utilisent une électricité dont la provenance est variable selon le moment de la journée. L'usine de production, située à Bouin (85) est en cours de réalisation par la prometteuse startup Lhyfe qui en assurera également l'exploitation. Le SyDEV assure quant à lui la maîtrise d'ouvrage d'un premier réseau de 4 stations dont la première ouvrira à la Roche-sur-Yon à l'automne 2021. Plusieurs collectivités locales se sont engagées dans l'acquisition des premiers véhicules de l'écosystème. Pour le moment dédiée à des flottes captives, l'utilisation de l'hydrogène pourra s'étendre à des usages itinérants (transport de marchandise notamment) d'ici quelques années, lorsque le maillage de stations sera suffisant.

Le vecteur hydrogène est sous les feux des projecteurs depuis l'annonce d'un plan national doté de 7 milliards d'euros, ce qui n'est pas sans

déranger certains lobbies venant pointer du doigt des coûts élevés et un rendement perfectible de la chaîne énergétique. Ces critiques sont complètement déplacées dans le contexte d'urgence climatique que nous connaissons. L'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) vient de publier une étude évaluant à 75% la réduction d'émissions de GES (Gaz à Effet de Serre) d'un véhicule utilisant de l'hydrogène renouvelable par rapport à un véhicule thermique sur son cycle de vie complet. Ce résultat est plus qu'honorable pour une technologie récente face au moteur thermique qui bénéficie de près de 150 ans d'évolution. D'importants progrès sont en cours pour améliorer les rendements et la durée de vie des piles à combustible et des électrolyseurs tout en utilisant moins de métaux rares. Quant aux coûts, ils devraient se démocratiser dès le milieu de la décennie, c'est-à-dire demain

Perspectives d'avenir de l'hydrogène dans le transport

Je suis, pour ma part, convaincu que l'hydrogène jouera un rôle important dans la transition énergétique en complément des autres énergies alternatives (bio GNV, électricité). Les véhicules hydrogène utilisent une motorisation

électrique alimentée par une pile à combustible et offrent donc un agrément comparable aux véhicules à batterie tout en présentant les avantages des véhicules thermiques. Ils disposent ainsi d'une autonomie importante grâce à la bonne densité énergétique de l'hydrogène comprimé. Le ravitaillement rapide s'apparente à celui d'un véhicule thermique et la charge utile est conservée. De ce fait, l'utilisation de l'hydrogène est pertinente pour des véhicules lourds ou utilisés intensivement (taxis, bus, camions de ramassage des ordures, bateaux). L'hydrogène présente également l'intérêt de stocker de l'énergie de provenance renouvelable et sa production locale nous permettra d'accroître notre indépendance énergétique.

Malgré toutes ces promesses, le déploiement massif de l'hydrogène devra probablement attendre une décennie pour que la technologie soit acceptée du grand public, qu'elle se démocratise et qu'une filière se crée. J'aime aussi rappeler que ces énergies alternatives conservent un faible impact environnemental et que leur utilisation n'aura de sens qu'en rationalisant nos déplacements.

Hygreen Provence, ce n'est pas du vent

Patrick Delafin (73 ILI)

A la fin de ma carrière dans la chimie, partagée entre les services techniques et l'exploitation, je suis revenu prendre ma retraite dans la région de Manosque. J'y observe les projets techniques qui contribuent au développement de cette région. Sa principale richesse est le soleil, on y vante 300 jours de soleil par an.

L'éco-Campus Provence ou une stratégie régionale pour l'hydrogène

La communauté de communes DLVA (Durance, Luberon, Verdon, Agglomération, 25 communes et 65 000 habitants) est au cœur de la vallée des Energies. Le long de la Durance canalisée et du Verdon, nous avons une production d'électricité hydraulique de 2GW. Le nucléaire est représenté par le centre d'études nucléaires de Cadarache avec ses 5000 chercheurs et plus récemment le projet international d'ITER. On y trouve, aussi, les stockages souterrains de gaz naturel (Géométhane) et d'hydrocarbures ainsi qu'un bio méthaneur et une centrale de chauffe à la biomasse de 4,5 MW, sans oublier un centre de formation Energies renouvelables : l'Eco Campus Provence. En 2017, DLVA a le souci de diversifier les énergies renouvelables. Assistée de Capenergies, elle s'est faite le promoteur d'un projet innovant de production d'hydrogène vert à partir de la richesse de la région, le soleil : le projet Hygreen Provence, une première mondiale visant à décarboner les utilisations de l'hydrogène.

Je remercie Dominique Bertin (DG adjoint Développement territorial - chef de projet HyGreen), qui m'a précisé que ce projet est fait en concertation avec les populations, les services de l'état, et les parcs du Verdon et du Lubéron. La préservation des paysages et le respect de la biodiversité sont des préalables du projet. Cette démarche est pilote pour les doctrines liées à la transition énergétique. Les élus ont fait le choix de ne travailler, au départ, que sur des terrains publics pour simplifier les démarches et éviter la lenteur des expropriations. La collectivité joue ici son rôle d'organisateur mais aussi de facilitateur.

Innovation

Hygreen est un projet ambitieux qui vise à produire, stocker et distribuer de l'hydrogène vert. Il participera à la construction d'un système de production d'électricité renouvelable local en utilisant, à terme 1500 ha de panneaux pho-





tovoltaïques. L'électricité produite est valorisée directement sur le réseau, à terme l'équivalent d'une tranche de nucléaire, et pour produire, à l'aide d'électrolyseurs, 43 000 T d'hydrogène vert. Le stockage de l'hydrogène pur sera fait dans 2 cavités salines de grandes dimensions qui existent dans le sous-sol de la DLVA (cavités, construites à 1000m de profondeur, dans des couches salines, prévues pour le stockage stratégique de gaz naturel, et non utilisées). La DLVA a avec ses cavités salines, un formidable outil pour répondre à la variabilité de la production et de l'utilisation de ces énergies : électricité et l'hydrogène.

Ce partenariat innovant public-privé, entre la DLVA et Engie et sa filiale Storengy, Air Liquide et sa filiale Hydrogen Council, GRDF, Géométhane, RTE, Enedis, GRTgaz, a été rendu possible grâce à l'engagement de tous dans la transition « zéro carbone » et contribuera au développement de la filière hydrogène en France.

Marchés visés pour l'hydrogène

L'hydrogène sera utilisé :

- Pour des marchés de mobilité collective : Des bus, véhicules utilitaires, le train TER Marseille – Manosque - Briançon à l'hydrogène (Train alimenté par une pile à combustible) et pour alimenter le déploiement de stations de mobilité verte dans la région.
- Pour remplacer l'hydrogène « gris » utilisé par les industriels de l'étang de Berre.
- Pour alimenter en chaud et en froid un écoquartier de l'agglomération.
- Pour, au besoin, produire de l'hythane (mélange de 20% d'hydrogène et 80% de gaz naturel), stocké dans les cavités souterraines dédiées au gaz naturel.

Planning et financement du projet

Le projet doit s'étendre sur plus de 10 ans avec des investissements qui vont atteindre 1.3 milliard d'€. En 2023 : Une étape dite démonstrateur : Production d'électricité à petite échelle, (300 ha de panneaux photovoltaïques, production 120 Mwc) avec un électrolyseur pour produire 220 T d'H₂ par an.

A partir de 2026 : Extension à 300 ha de panneaux, production totale de 440 Mwc avec production de 27 500 T d'hydrogène par an et stockage en cavité saline.

En 2030 : Extension à 1 500 ha de panneaux pour une puissance de 900 Mwc et une production d'H₂ de 43 000 T/an. Ce projet doit s'auto-financer et contribuer au développement économique de cette région des Alpes de Haute Provence en favorisant l'implantation d'industriels souhaitant exploiter cette production « zéro carbone ».

La Provence, bientôt en pole position mondiale dans le domaine de l'énergie [décarbonée] ?

L'envergure du projet Hygreen est une première en France, il est au cœur de la stratégie régionale sur l'hydrogène. Il demande la maîtrise de la chaîne de valeur de l'hydrogène : de la production jusqu'au point d'utilisation. Sa crédibilité est assurée par les partenaires industriels de renom qui sont tous très engagés dans la production « zéro carbone ». Les retombées pour la DLVA : des ressources fiscales et la création de 1000 emplois directs et indirects ainsi que le développement de la formation ENR sur l'Eco Campus. On pouvait lire dans la presse : « Hygreen, avec ITER, qui vise à reproduire l'énergie du soleil, les Alpes de Haute-Provence et le Pays manosquin, seront amenés en pole position mondiale sur le sujet de l'énergie, et ce n'est pas du vent ».

Elargissons nos horizons !

Xavier de Benaze, jésuite



Il nous faut quitter nos œillères et oser inventer de nouvelles trajectoires au service du vivant.

Commencer par alimenter le débat démocratique

L'hydrogène est-il le futur de l'humanité ? Ou bien une utopie technique ? Une gabegie environnementale ? Ou un indispensable pour la transition ?

Le débat est complexe. Je ne suis pas un expert hydrogène. Mais un premier point, c'est que si « l'énergie est notre avenir », économisons là et ... débattions-en ! Si notre avenir passe effectivement en partie par la question de notre usage de l'énergie, que ce soit en termes de quantité ou de qualité, il serait étrange dans un régime démocratique que les décisions en ce domaine soient prises entre spécialistes uniquement. Le débat public doit avoir lieu. Mais pour qu'il soit fructueux, il faut qu'il soit informé. Je me réjouis donc que la revue *Icam liaisons* participe à ce travail général d'éclairage de nos intelligences, et je lirai avec intérêt les autres contributions de ce numéro.

Sortir du paradigme technocratique

Cependant, un risque serait d'en rester à une liste d'arguments, de projections « pour » ou « contre » l'hydrogène. Dans son encyclique *Laudato Si*, le Pape met en garde contre ce qu'il appelle « le paradigme technocratique », c'est-à-dire une grille de lecture du monde « homogène et unidimensionnel[le] » (n°106), où la méthode technico-scientifique devient la seule façon de voir le monde et de le dominer comme une chose inerte. Attention : il ne s'agit pas ici de rejeter en bloc les progrès immenses que le développement des savoirs scientifiques et techniques ont permis à notre humanité. Certainement pas. Mais il faut justement utiliser nos intelligences avec toutes les formes qui sont les leurs, et non uniquement la forme technico-économique.

Entrer dans une vision du monde relationnelle

Quelle serait alors une autre vision du monde qui nous permettrait de regarder le problème autrement que comme un problème technique auquel on doit « juste » trouver une solution technique ? Lorsque des étudiants (dont des *Icam*) ou des professionnels (dont des *Icam*) viennent se former au Campus de la Transition, une des propositions que nous leur faisons c'est d'essayer d'entrer dans une vision relationnelle du monde. Réaliser d'abord que j'existe par les trois relations fondamentales qui tissent toute vie humaine : relation aux autres humains, relation aux autres vivants et relation à soi-même. Trois relations auxquelles de nombreuses personnes rajouteront une quatrième : relation à plus grand que soi (ici certains nomment Dieu, d'autres la Nature, d'autres le Vivant, d'autres ne se prononcent pas, tout en restant ouverts). Vous pouvez faire le test : durant le confinement, qu'est ce qui m'a fortement manqué ? Puis-je voir comment cela est en fait un manque de relations et donc de vie ? Ou bien songez aux ingréd-

ients de votre petit-déjeuner ? D'où viennent-ils ? Avec qui vous mettent-ils en relations ? Comment construisent-ils votre propre corps, là maintenant ?... Relations à soi, aux autres humains, aux autres vivants, à plus grand que soi. Il faut un peu de temps pour apprendre à regarder le monde autour de soi avec cette nouvelle paire de lunettes et non plus celle du paradigme technocratique. Puis pour voir comment ce qui est vrai pour moi, l'est aussi de tout vivant, de tout le cosmos qu'on pourrait métaphoriquement appeler « le tissu du vivant ». Quel lien avec l'hydrogène ? En insérant notre « question hydrogène » dans une vision plus large, cette cosmologie relationnelle nous libère de la seule approche technique. Plutôt que de savoir si oui ou non l'hydrogène va pouvoir remplacer telle ou telle forme d'énergie, si oui ou non on peut produire un hydrogène « propre » écologiquement et socialement parlant, on pourra alors se demander ce qui compte vraiment dans une « vie bonne ». Si ce qui compte pour le vivant c'est la richesse et l'épanouissement de ses relations, peut-être pourra-t-on se poser autrement la question du besoin de consommer toujours plus d'énergie, quelle qu'en soit la forme. Si je découvre l'in-



tensité relationnelle de ma vie familiale et amicale, et le tissu du vivant où je suis inséré dans mon quartier, ma ville, mon département, peut-être pourrions-nous choisir ensemble de réduire nos déplacements et donc nos besoins énergétiques ? Trajectoires personnelles et sociétales qui viendraient alors éclairer autrement les questions techniques, valides mais non plus isolées, sur le mode de production de l'hydrogène. Cet article, somme toute, est une invitation à quitter les œillères technico-économiques qui trop souvent nous servent d'unique grille de lecture du réel. En expérimentant notre inscription dans le tissu du vivant, en goûtant notre existence comme relationnelle, les débats techniques autour de l'hydrogène (comme tant d'autres questions liées à la Transition) trouveront leur juste place. Mis au service du vivant, ils nous permettront d'oser inventer puis emprunter les nouvelles trajectoires que nos sociétés ne connaissent pas encore. Nous pourrions alors rejoindre cette invitation du Pape François : « Marchons en chantant ! Que nos luttes et notre préoccupation pour cette planète ne nous enlèvent pas la joie de l'espérance » (*Laudato Si*, n°244).

En route vers l'industrie décarbonée

Interview d'Erick Pelerin (98 ILI)



Erick Pelerin est CBDO (Chief Business Development Officer) chez ETIA / Groupe VOW ASA depuis Septembre 2020. Après un diplôme d'ingénieur Icam (Lille-98), il est parti en coopération avec la DCC au Maroc pendant 2 ans. Il a commencé sa carrière aux Chantiers de l'Atlantique où il a occupé différents postes en production, ingénierie et développement de nouveaux produits pour des navires plus propres. En 2010, il a rejoint la branche renouvelable d'Alstom Power pour s'occuper des activités Energies Marines Renouvelables.

Quel est le driver de vos activités chez ETIA ?

Erick Pélerin : En 2015, la réponse mondiale à la menace du changement climatique a fait un pas en avant lorsque 190 pays ont adopté l'Accord de Paris. D'abord sorti avec l'administration Trump, les Etats-Unis sont revenus dans l'accord. En 2019, les Nations Unies ont annoncé que plus de 60 pays - dont le Royaume-Uni et l'Union européenne (à l'exception de la Pologne) - s'étaient engagés en faveur de la neutralité carbone d'ici 2050. La demande des consommateurs citoyens vers des produits « carbon friendly » s'accélère. Celle du marché et des investisseurs prend le même chemin.

De grands groupes industriels ont annoncé leurs engagements vers une neutralité carbone d'ici à 2050. Par exemple, ArcelorMittal, leader mondial de la sidérurgie, a annoncé en 2020 son engagement d'être neutre en carbone à l'échelle du groupe d'ici 2050, renforçant ainsi son engagement pris en 2019 pour ses activités européennes de réduire les émissions de CO2 de 30 % d'ici 2030, et d'être neutre en carbone d'ici 2050.

Les compagnies Pétrolières comme REPSOL ou TOTAL ont pris le même type d'engagement. RESPOL vise à atteindre zéro émission nette d'ici 2050, ce qui en fait la première société pétrolière et gazière au monde à assumer cet objectif ambitieux. Total a également annoncé en 2020 son ambition d'atteindre le « zéro émission net » d'ici 2050 pour son activité mondiale sur ses produits de production et d'énergie utilisés par ses clients.

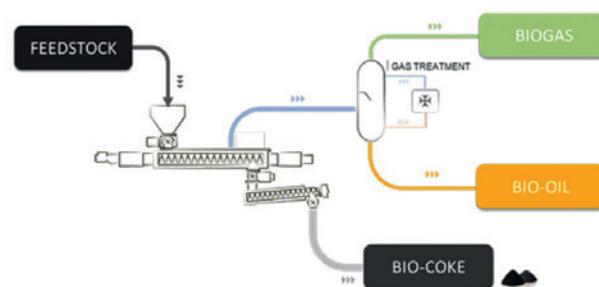
De nombreux autres entreprises ont pris des engagements dans ce sens et mettent en place les feuilles de route associées.

Comment votre entreprise est engagée dans la décarbonation de l'industrie ?

Erick Pélerin : ETIA, société française faisant partie du groupe Norvégien VOW ASA, développe des technologies et solutions qui aident les industriels à atteindre leurs objectifs de réduction de CO2 et de neutralité Carbone avec une technologie testée sur un grand nombre de types de biomasse et déchets.

ETIA a ainsi signé un accord avec ArcelorMittal pour la production de bio-gaz à partir de biomasse qui viendra remplacer l'utilisation de gaz fossile.

ETIA a également signé en 2020 un partenariat stratégique avec REPSOL en vue de la production de produits renouvelables pour ses installations industrielles.



A quoi ressemble votre technologie ?

ETIA possède une technologie de pyrolyse propriétaire qui permet de convertir, en les chauffant à des températures de 500 à 1000° en l'absence d'oxygène C, des résidus de biomasse ou déchets en gaz de synthèse, bio-huile et bio-carbone qui sont utilisables dans des process industriels. Environ 40 unités ont déjà été produites depuis un peu plus de 10 ans.

ETIA développe également des procédés complets allant jusqu'à méthanation du gaz de synthèse pour produire du gaz renouvelable injectable dans le réseau ou de l'hydrogène à partir de déchets et de biomasse.

ETIA possède des bureaux à Compiègne (60), des installations pilotes dans les Hauts de France et en Normandie, ainsi que des projets installés un peu partout dans le monde.

Quel est le rôle de l'ingénieur dans ces défis d'aujourd'hui ?

Petit souvenir de l'Icam : J'ai fait mon mémoire de formation humaine à Lille sur le développement durable et le Rapport Brundtland. C'était en 1998... Les équipes en place et les personnes qui nous rejoignent sont comme moi passionnées par le développement durable et la lutte contre le réchauffement climatique. C'est une aventure industrielle hors du commun. Innovation, industrialisation, esprit d'équipe sont les mots clés de notre travail au quotidien.

Quelques liens utiles :

<https://etia-group.com/>
<https://www.vowasa.com/>
<https://www.lemondedelenergie.com/arcelormittal-biogaz-luxembourg/2021/01/29/>