

Présentation du rapport de l'Académie des Sciences sur l'hydrogène par Marc Fontecave

Webinaire PNC du 03 octobre 2024

Synthèse par Jacques Simonnet

L'Académie des Sciences a publié, le 9 avril 2024 un rapport sur " L'hydrogène aujourd'hui et demain"¹ Ce rapport a été établi à la suite d'une demande spécifique de la Présidence de la République, demande qui est la première de ce type depuis des années, ce qui mérite d'être souligné car la valeur de l'Académie des Sciences est fortement sous-utilisée.

Marc FONTECAVE, un des auteurs de ce rapport, a présenté celui-ci lors d'un webinaire organisé par PNC. Marc FONTECAVE, professeur au Collège de France, est membre de l'Académie des Sciences et président de son comité de prospective en énergie qui a déjà émis un rapport sur la biomasse et plusieurs sur le nucléaire.

L'exposé a précisé les différentes sortes ("couleurs") d'hydrogène :

- Hydrogène blanc : l'hydrogène qu'on trouve non combiné dans la nature. Pour le moment on ne sait même pas s'il vient d'être généré ou s'il provient de poches accumulées, ni quelle quantité il pourrait y en avoir, ni comment le récupérer. C'est à explorer, ce pourrait être prometteur, mais ce ne pourra être qu'un sujet de plus long terme.
- L'hydrogène gris est obtenu par décomposition du méthane par vaporéformage. Peu cher, il constitue l'essentiel du million de tonnes consommé annuellement par l'industrie en France. Cette décomposition donne lieu à l'émission de 10 millions de tonnes de CO₂ qu'il s'agit d'éviter.
- L'hydrogène bleu est de l'hydrogène gris qui devient bleu si on capture le CO₂ émis par la décomposition du méthane, ce qui augmente le coût de l'hydrogène.
- L'hydrogène vert est de l'hydrogène produit par des technologies bas carbone, typiquement par électrolyse de l'eau avec de l'électricité bas carbone. L'Académie des Sciences ne retient pas la distinction faite par certains entre l'hydrogène jaune produit avec de l'électricité nucléaire et l'hydrogène vert produit avec de l'énergie solaire ou éolienne et n'utilise que le terme vert associé au bas carbone, quelle que soit son origine.

Aujourd'hui, l'hydrogène est utilisé pour le raffinage du pétrole, la production d'ammoniac et des engrais et produire des molécules pour la pétrochimie, comme le méthanol. On en aura besoin par ailleurs si on veut décarboner d'autres usages, tels que la production d'acier, de remplacer soit par utilisation directe, soit par synthèse, les carburant fossiles des mobilités légère, lourde, maritime ou aérienne.

Mais il y a une limite, parce que la production d'hydrogène nécessite beaucoup d'énergie, de l'électricité pour les électrolyseurs généralement utilisés. Les rendements de ceux-ci ne sont pas très élevés et on ne les a pas améliorés depuis 100 ans. On peut espérer le faire, mais actuellement, la production du million de tonnes consommées annuellement en France nécessiterait 55 TWh, soit à peu près 5 EPR fonctionnant à plein. Les scénarios allant jusqu'à 4 millions de tonnes avec les mobilités, le carburant synthétique, le stockage d'énergie intersaisonnier, qui nécessiteraient 22 EPR sont irréalistes. Deux millions de tonnes est un grand maximum raisonnable. Cela doit permettre la substitution à l'hydrogène gris, la décarbonation de l'acier, du ciment, etc. et la production de carburant synthétique pour les avions. Pour le reste, il faudra trouver autre chose. Il sera donc nécessaire de faire des arbitrages.

L'Europe consomme 10 millions de tonnes actuellement, gris à 95% et envisage 60 millions de tonnes en 2050. Il faudrait alors 1700 TWh pour une consommation actuelle de 2700 TWh. C'est irréaliste pour

¹ [L'hydrogène aujourd'hui et demain - Rapport de l'Académie des sciences \(academie-sciences.fr\)](https://www.academie-sciences.fr/fr/rapport-lhydrogene-aujourd-hui-et-demain)

l'Europe confrontée à des problèmes d'électricité. Il est envisagé d'importer 50% des besoins, ce qui serait passer d'une dépendance à une autre alors qu'on ne sait ni comment ni où. Mais c'est ça la politique de l'Union, tirée par l'Allemagne.

Pour arriver à l'objectif national de 2 millions de tonnes il faut augmenter nos capacités de production électrique mais aussi nos capacités d'électrolyse. Et là on est sur un problème économique. La demande en hydrogène vert est atone parce qu'il coûte entre 4 et 7 €/kg alors que le gris est à 1.5 €/kg. Or les investisseurs ne veulent pas investir dans des électrolyseurs si personne n'achète d'hydrogène vert. Donc, il faut résoudre ce problème de coûts en plus des arbitrages et des limites d'importation pour que le processus s'enclenche.

Mais il ne faut pas raconter d'histoires. Tout indique que même à l'horizon 2050, l'hydrogène vert restera plus cher que l'hydrogène gris. Et de toute façon, il y aura une disponibilité encore très grande des fossiles et des tas de pays continueront à les utiliser et continueront à faire de l'hydrogène gris. Et nous avons à faire très, très attention à ne pas nous embarquer trop vite dans des technologies trop coûteuses qui conduiront à dégrader notre industrie, dégrader notre compétitivité, comme on le voit déjà dans certains secteurs.

Côté production, il n'y a pas de technique de production plus prometteuse que celles connues. La plus mature est celle de l'électrolyse alcaline, découverte en 1800, utilisée industriellement depuis au moins 1920, son rendement de 60 à 65% a peu évolué et elle n'est pas compatible avec une alimentation électrique intermittente. Par contre, elle n'utilise que des matériaux peu nobles et peu coûteux.

Les électrolyseurs à membranes échangeuses de protons sont plus compatibles avec l'intermittence. Par contre, ils sont moins matures, nécessitent des métaux nobles (platine, iridium) et des membranes chères et fragiles pour des rendements qui ne sont pas meilleurs.

L'électrolyse à haute température permet d'atteindre des rendements de 85 à 90% mais elle n'en est qu'au stade expérimental. Procédé pas encore d'actualité mais prometteur, parce que le coût principal de l'électrolyse est celui de l'énergie et que c'est l'amélioration du rendement qui pourrait permettre de réduire la consommation d'énergie, donc le coût et de rendre l'hydrogène vert compétitif avec le gris.

L'hydrogène est gazeux en conditions normales. Son transport et son stockage sont conditionnés par sa très faible densité énergétique en masse et en volume. Un kg d'hydrogène gazeux occupe 11000 litres et contient 33 kWh d'énergie qui sont contenus dans 3 litres d'essence. L'hydrogène gazeux est inutilisable. On voit cinq possibilités pour rendre l'hydrogène plus utilisable mais aucune n'est simple et évidente :

- Le rendre liquide à basse température : 1 kg et 33kWh occupent 13 litres, c'est encore loin des 3 l de l'essence, et pour liquéfier, il faut dépenser 35% de l'énergie contenue, donc forte élévation du coût.
- Le comprimer : ça peut être à 350 bar ou 700 bar, et là aussi on perd de l'énergie, un peu moins, 15%. Et à 700 bar, qui est le maximum praticable, les 33 kWh occupent encore 23 litres.
- Le stocker dans des matériaux : les pores des zéolites ou des polymères de coordination peuvent stocker des quantités importantes de petites molécules d'hydrogène, recherches en cours.
- Le stocker sous forme d'hydrures, on sait faire, mais les températures d'utilisation sont hors des températures idéales, donc recherches à faire.
- Le transformer en une autre molécule, par exemple en hydrogénant l'azote de l'air pour obtenir de l'ammoniac qu'on peut liquéfier. On sait bien le faire, on sait moins bien revenir à l'hydrogène et le produit est corrosif.

Pour le transport, sous forme liquide, on sait faire avec l'ammoniaque, et sous forme gazeuse, on peut envisager des gazoducs, mais on n'a jamais fait, l'hydrogène est une toute petite molécule qui diffuse

énormément, les fuites sont donc beaucoup plus importantes et plus difficiles à éviter que pour le méthane par exemple. La faible densité réduit le débit surfacique.

L'Académie a trouvé nécessaire d'ajouter au sommaire du rapport un chapitre sécurité, qui ne figurait pas dans la commande. L'hydrogène est en effet une molécule très sensible, qui fuit facilement, et dès lors qu'il y a fuite, il peut y avoir une réaction très rapide avec l'oxygène, il peut y avoir des flammes, il peut même y avoir des explosions ou des détonations dans des endroits confinés. Les flammes ont des vitesses qui sont dix fois plus rapides que les flammes du pétrole ou du gaz. Donc il y a des vrais enjeux de sécurité. Les conditions dans lesquelles l'hydrogène est manipulé dans l'industrie sont efficaces mais de ce fait extrêmement strictes. On a du mal à imaginer que ces conditions puissent être facilement appliquées aussi strictement dès lors qu'on va exploiter de l'hydrogène à très grande échelle dans un milieu moins structuré. Il faut alerter sur cette question, à nouveau pour y travailler, mais en sous-entendant qu'on ne passera pas sans risque à des échelles beaucoup plus importantes hors industrie.

La stratégie française prévoit d'investir près de 9 mds€ dans la filière hydrogène, pour la recherche et pour développer une filière d'électrolyseur. C'est très conséquent, mais M. Fontecave considère que les objectifs en sont irréalistes. France 2030 vise 6.5 GW d'électrolyseurs installés en 2030 alors qu'on en est à 0.03 GW à fin 2023, un accroissement inatteignable. Il pense aussi que l'électrification des usages, transport, chauffage, industrie est beaucoup plus compliqué qu'on ne l'a dit, comme d'habitude d'ailleurs, et que ça va prendre plus de temps. Donc la demande électrique ne va pas augmenter aussi vite, parce qu'on ne va pas électrifier l'acier comme ça, on ne va pas électrifier l'hydrogène comme ça. Il faut travailler, on va progresser, mais pas aussi vite qu'envisagé.

Questions spécifiques :

Pour le ferroviaire, en dehors de cas très particuliers, l'hydrogène est beaucoup plus cher que l'électricité, même par batteries, donc peu d'avenir.

Pour le routier aussi bien lourd que léger, l'électrification par batteries a démarré, sans doute pas aussi vite que souhaité, mais l'infrastructure de recharge et la production de véhicules s'installent. On imagine mal, même si toutes les difficultés relatives à l'hydrogène étaient résolues et son prix accessible, que la planète soit recouverte de deux systèmes parallèles, un système de recharge électrique partout, sur toutes les voies, les autoroutes, etc., avec des voitures électriques, et à côté, en parallèle et en même temps dans les mêmes stations, de l'hydrogène massivement. Donc peu d'avenir prévisible.

Pour l'avion, le handicap du volume et du poids des réservoirs condamne l'utilisation de l'hydrogène et le poids des batteries condamne celles-ci pour leur généralisation en dehors de créneaux particuliers. Seuls les carburants de synthèse hydrogénés semblent avoir un avenir.

Pour le maritime, l'hydrogène peut être envisagé, s'il parvient à être compétitif.

La disponibilité de l'eau pour l'électrolyse n'est pas un problème de quantité, mais de pureté, d'autant que la combustion de l'hydrogène produit de l'eau qui retourne dans la sphère terrestre d'où elle provenait.

L'interdiction européenne de l'utilisation des polluants persistants est incompatible avec le développement des électrolyseurs à membrane puisque ces membranes sont constituées de polymères fluorés qui sont ou vont être interdits. La Commission Européenne qui pousse au développement de l'hydrogène devra résoudre cette contradiction.

Il existe des procédés alternatifs de séparation de l'hydrogène du méthane : pyrolyse du méthane qui donne du carbone solide par chauffage classique ou plasma (Sakowin) ou électrolyse à haute température avec chauffage par réacteur nucléaire. Tous ces procédés non matures présentent un intérêt et doivent continuer à être explorés. Ils pourront être retenus ultérieurement s'ils sont praticables et s'ils augmentent suffisamment le rendement pour être économiquement compétitifs.