

LA VOITURE À HYDROGÈNE : UNE SOLUTION POUR UN DÉVELOPPEMENT DURABLE DES TRANSPORTS ?

Arnaud Charles, Noël Baffier, Jean-Claude Bernier

D'après l'article Le stockage de l'énergie dans le monde des transports de Dominique Larcher et François Darchis publié dans l'ouvrage « *Chimie et transport* » EDP Sciences, 2014, ISBN : 978-2-7598-1075-8

INTRODUCTION

Réduire les émissions d'un gaz à effet de serre (GES) comme le dioxyde de carbone CO₂ [1], notamment dans le domaine du transport, est un des premiers objectifs pour un développement durable de notre Planète.

Pour cela, remplacer le moteur thermique classique (essence ou diesel) par des systèmes moins polluants comme le « moteur à hydrogène » serait une des solutions envisageables. En quoi les apports de la chimie peuvent-ils être décisifs pour atteindre un tel objectif ?

L'INDUSTRIE DU TRANSPORT FACE AU DÉFI DE LA CROISSANCE DE LA POPULATION MONDIALE

La société évolue et ses évolutions ont bien sûr une influence sur nos transports. Une des toutes

premières tendances est l'augmentation de la population mondiale qui pourrait atteindre neuf milliards d'habitants d'ici 2050. Or une population plus nombreuse implique une demande en transports croissante, d'autant que cette population sera surtout issue de pays en développement [2].

Ces prévisions anticipent donc un fort besoin de transports, en particulier individuels, dans des zones urbanisées : c'est l'indication d'une catastrophe assurée, si rien n'est fait [figure 1]:

- ▶ embouteillages géants et récurrents, bruit permanent,
- ▶ dégradation de la qualité de l'air,
- ▶ changement climatique.

L'Europe a été la première à chercher comment réduire les émissions de CO₂, à partir du protocole de Kyoto.



Figure 1. Changement climatique, embouteillage, dégradation de la qualité de l'air... l'industrie du transport de nos jours atteint ses limites. Source : licence CC-BY-2.0, NOMAD.

Les objectifs de l'Europe en termes de réduction des émissions de GES ont été lors de l'accord de Paris de 2015 de réduire de 40 % les émissions de CO₂ en 2030 par rapport à la référence de l'année 1990. Après le dernier sommet de Bonn en novembre 2017 la commission a forcé le trait en décidant d'une baisse de 30 % d'ici 2030 par référence non plus à 1990 mais à 2021 ce qui a provoqué en 2018 les protestations des constructeurs automobile jugeant l'objectif irréaliste.

LA VOITURE À HYDROGÈNE EST-ELLE UNE RÉPONSE POSSIBLE ?

La **figure 2** permet de comparer différentes motorisations de voitures en fonction de critères facilement compréhensibles pour chacun ; c'est-à-dire d'une part les émissions en gramme de CO₂ par kilomètre du puits à la roue (de l'extraction et de la synthèse du carburant ou vecteur d'énergie jusqu'à son utilisation dans le moteur) et d'autre part l'autonomie.

La moyenne des émissions des véhicules du parc automobile français (3) est d'environ 213 de CO₂/km. Pour encourager la baisse des consommations, le bonus-malus encourage l'achat de véhicules émettant moins de 119 g/km et dès 2021 moins de 95 g car les taxes commenceront dès ce seuil. Il n'y a pas de vrais objectifs pour les véhicules thermiques sauf les consommations 2 L/100 km qui pourrait correspondre à environ 40 g/km

En 2050, les véhicules hybrides (à propulsion mixte électrique-essence ou diesel) devraient être autonomes sur 1000 à 1200 km mais, au-delà de 200 km au plus, la propulsion se fait via le moteur

thermique (essence ou diesel), ce qui émet autant de CO₂ qu'un véhicule classique.

Le véhicule à batterie pourrait atteindre l'objectif de 10 g de CO₂/km mais les constructeurs estiment aujourd'hui que l'autonomie de ce véhicule sera limitée à environ 200 km (4). Or, il n'est pas possible de demander à l'utilisateur d'un véhicule de se limiter à deux cents kilomètres afin de respecter ce niveau d'émission. Les progrès sur les batteries Ion – Lithium permettent d'avoir des puissances de plusieurs dizaines de kWh et d'améliorer l'autonomie : la nouvelle Zoe de Renault approche les 300 km la Nissan presque 400 km et la Tesla 500 km

Une solution possible est l'hydrogène (figure 2) : les voitures à hydrogène actuellement fabriquées par les constructeurs ont une autonomie de 600 km environ pour un plein de trois minutes, et 5 kg d'hydrogène et des émissions de CO₂, de 20 à 30 % plus faibles que les véhicules à essence ou diesel (120 g de CO₂/km) (5).

Elles n'émettent que de l'eau au pot d'échappement, ce qui permet de régler le problème de la pollution par les particules fines, et sont aussi silencieuses que les voitures électriques puisqu'elles sont aussi équipées d'un moteur électrique. Ce moteur est alimenté en électricité via une pile à combustible qui assure la transformation de l'hydrogène en électricité. De plus, les 120 g de CO₂/km émis aujourd'hui proviennent de la production de l'hydrogène obtenu à partir de gaz naturel, procédé qui émet du dioxyde de carbone. Mais un certain nombre de projets sont en cours pour limiter, voire éliminer la formation de CO₂, lors de sa production.

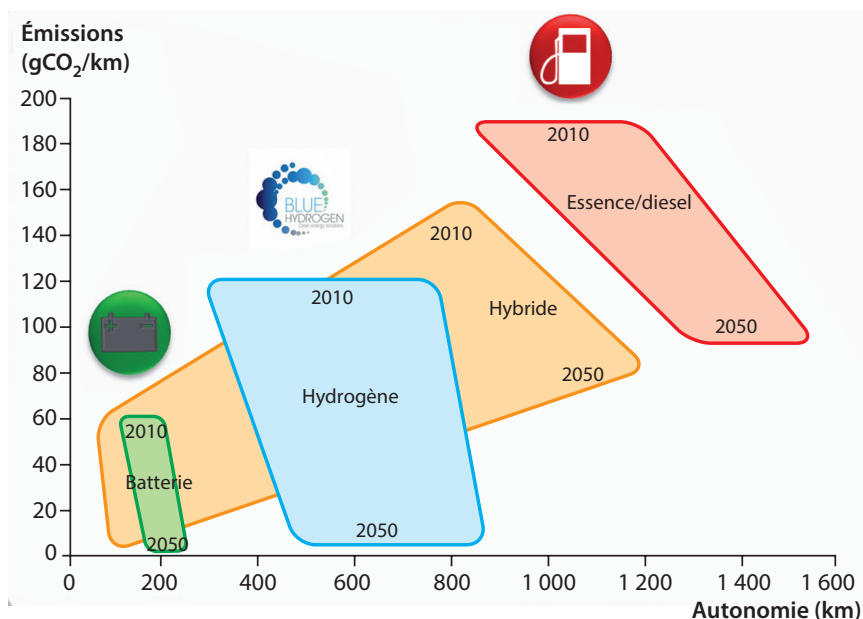


Figure 2. Diagramme de l'émission de CO₂ du puits à la roue en fonction de l'autonomie du véhicule. Source : rapport EU coalition.

La voiture à hydrogène a le potentiel d'atteindre l'objectif de réduction de 95 % des émissions en 2050 du puits à la roue (10 g de CO₂/km), tout en offrant une autonomie de l'ordre de 600 à 800 km. À condition d'imaginer la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau via une électricité décarbonée (éolien, photovoltaïque ou nucléaire).

Ainsi constate-t-on que l'on peut faire un lien entre le transport et la chimie bien au-delà des matériaux qui composent l'automobile puisque dès le moment où l'on parle d'hydrogène, on entre dans le domaine de la chimie.

PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ À PARTIR DE L'HYDROGÈNE

Comment obtenir du dihydrogène ?

Le gaz hydrogène H₂ est une molécule chimique ; il faut la produire, la stocker, la distribuer et la convertir (figure 3) en électricité.

L'atome d'hydrogène H est l'un des plus abondants de l'Univers, mais on le trouve très peu sous la forme de dihydrogène (H₂), molécule que l'on utilise pour faire de l'électricité dans une pile à combustible. Cette molécule est cependant facilement synthétisable. La production à partir du gaz naturel est la voie la plus classique mais un certain nombre d'autres solutions permettent de produire l'hydrogène (6) :

- ▶ la biomasse, qui peut être utilisée pour produire du dihydrogène,
- ▶ l'hydrogène peut être fabriqué à partir d'électricité grâce à un procédé que l'on appelle l'électrolyse de

l'eau. Elle consiste, à l'aide d'un courant électrique, à décomposer l'eau (H₂O), en dioxygène (O₂), d'un côté, et en dihydrogène (H₂) de l'autre, procédé coûteux en électricité.

Comment stocker le dihydrogène ?

Une fois la molécule produite, il faut la stocker, et deux options sont possibles : à l'état liquide ou à l'état gazeux. L'état liquide est un peu compliqué à gérer car il faut se placer à des températures extrêmement basses. Le stockage gazeux est la solution la plus simple, l'hydrogène se comprime assez bien à 700 bars (7).

L'hydrogène est distribué par pipeline (canalisation servant au transport) et camions.

La dernière étape est la conversion de l'hydrogène en électricité, et c'est le domaine de l'électrochimie que maîtrisent les fabricants de l'automobile qui sont à la recherche de la meilleure pile à combustible (8).

La pile à combustible est faite d'électrodes métalliques ou en carbone et d'une membrane semi perméable en Nafion avec de microparticules de catalyseur le platine.

À une électrode, l'hydrogène est dissocié :

$$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$$

Les électrons libérés circulent dans le circuit extérieur vers l'autre électrode, où ils réagissent avec l'oxygène de l'air : $\text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{O}_2^-$.

Dans la pile, le courant est assuré par les ions H⁺ qui migrent à travers une membrane et réagissent

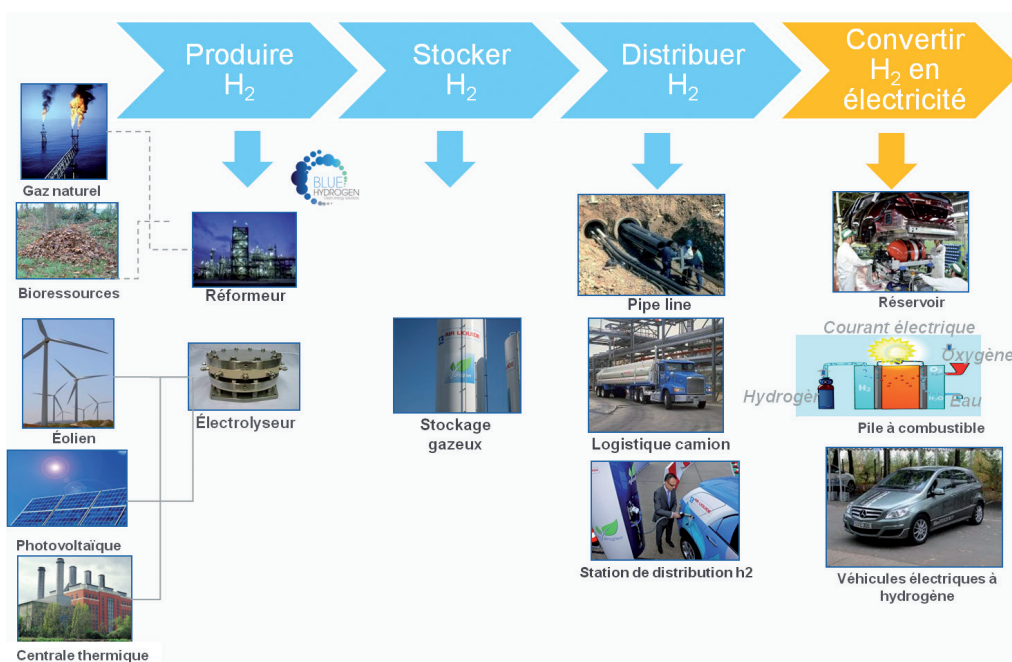


Figure 3 – Le cycle de production d'électricité à partir de l'hydrogène.
 Source : Air Liquide (sauf centrale thermique, réservoir et véhicule électrique à hydrogène).

à l'électrode alimentée en air pour former de l'eau :
 $4\text{H}^+ + 2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$.

Quelles perspectives pour le véhicule à hydrogène ?

Les véhicules équipés de pile à combustible sont encore très chers à ce jour car ils sont produits en petit nombre. Leur prix est notamment bien supérieur à celui d'un véhicule essence ou diesel. Le potentiel de réduction de coût est cependant de l'ordre de 90 % d'après les constructeurs. Les voitures commercialisées en France Hyundai ix 35 ou Mirai de Toyota coûtent respectivement 60 000 € et 66 000 € et la Tesla S 70 000 € mais d'après le président d' Air Liquide d'ici 2025 elles pourraient être au même niveau que des hybrides de cette catégorie (30 à 40 000 €)

En dehors du prix, le développement d'une nouvelle technologie dépend d'autres facteurs car les consommateurs ne veulent pas changer leurs habitudes :

- ▶ le premier point est la sécurité liée au stockage de l'hydrogène, qui est un gaz hautement inflammable et explosif,
- ▶ la fiabilité et la proximité : le développement d'un réseau de stations d'hydrogène (qui demande pour la France une modification du classement SEVESO) est nécessaire,
- ▶ la rapidité : le plein d'hydrogène doit pouvoir être fait en quelques minutes.

CONCLUSION

La chimie peut jouer un rôle essentiel dans le développement des transports automobiles durables comme

la voiture à hydrogène qui semble être une solution, mais comme pour le « Guépard » : pour que rien ne change, il faut que tout change !

Pour que ce mode de transport permettant une réduction des gaz à effet de serre se développe, il faudra que tout change :

- ▶ la perception des consommateurs face à cette nouvelle technologie,
- ▶ les politiques menés par les gouvernements en matière de réglementation et d'investissement pour le déploiement des stations à hydrogène,
- ▶ la baisse de coûts de production de ce moyen de transport.

Tous ces changements sont un énorme défi pour l'industrie mais ils sont essentiels pour les générations futures.

POUR EN SAVOIR PLUS

(1) Nom de code : C02

<http://www.mediachimie.org/node/991>

(2) Se loger, se déplacer : peut-on se libérer de l'addiction aux énergies fossiles ?

<http://www.mediachimie.org/node/272>

(3) Pétroles et essences commerciales

<http://www.mediachimie.org/node/655>

(4) La voiture électrique : virage ou mirage ?

<http://www.mediachimie.org/node/508>

(5) L'hydrogène bientôt dans vos automobiles

<http://www.mediachimie.org/node/473>

(6) L'hydrogène, vecteur de la transition énergétique

<http://www.mediachimie.org/node/1325>

(7) Et revoilà l'hydrogène

<http://www.mediachimie.org/node/1173>

(8) Fonctionnement de la pile à combustible

<http://www.mediachimie.org/node/1292>

Noël Baffier, professeur honoraire d'université, ancien directeur des Études de l'École d'Ingénieurs de Chimie Paristech

Jean-Claude Bernier, professeur émérite de l'Université de Strasbourg, ancien directeur scientifique des sciences chimiques du CNRS

Arnaud Charles, professeur de physique chimie

Grégory Syoën, professeur agrégé, chef de projet Mediachimie-Fondation de la maison de la chimie