



## REFLEXION CITOYENNE SUR LE RECHAUFFEMENT PLANETAIRE EN SAVOIR PLUS SUR L'HYDROGENE

Il est assez facile de comprendre la nécessité de diminuer l'usage des énergies d'origine fossile (charbon, pétrole, gaz naturel...) et d'origine nucléaire dès à présent. Les premières ne sont pas renouvelables et émettent du CO<sub>2</sub> (gaz à effet de serre, contributeur du réchauffement climatique) associé à d'autres polluants dus à la combustion. La seconde n'est pas éternelle en termes de ressources d'uranium et pose de sérieux problèmes avec les déchets à très longues durées de vie, sans solutions techniques satisfaisantes de retraitement à ce jour.

Cependant beaucoup de nos concitoyens semblent attendre de la technologie et de nos dirigeants des solutions énergétiques "propres", "vertes", ou "renouvelables" pour maintenir le statu quo de leur vie au quotidien. Il n'empêche que la meilleure énergie est celle que l'on ne consomme pas, donc avant d'espérer des solutions miraculeuses, le plus simple serait de vivre avec le moins de consommation énergétique possible. Comment faire alors ? En cherchant plus vers les ressources énergétiques humaines (marche à pied, vélo, appareils manuels...) mais là n'est pas notre réflexion principale ici.

Concernant l'énergie nécessaire aux déplacements des véhicules terrestres, l'électricité déjà très largement utilisée dans le ferroviaire, semble susciter un intérêt croissant pour les véhicules routiers (voitures, camions). Pour ces véhicules, certains pensent que l'électricité est une énergie "propre". Certes, à l'utilisation, le véhicule électrique émet peu de polluants, exceptées les particules fines dues à l'usure des pneumatiques et des freins, mais il n'est pas à l'abri non plus de certaines critiques comme l'exploitation des ressources en matériaux pour les batteries.

Cependant l'électricité n'est pas une énergie primaire, elle est toujours le résultat de la transformation d'autres sources d'énergie provenant du charbon, des éoliennes, des panneaux photo-voltaïques, des barrages, du nucléaire... Toutes ces sources ont leurs avantages et inconvénients en terme d'impact environnemental et doivent alors être pris en compte dans le bilan final de l'usage de l'électricité. Pour faire simple, le bilan environnemental d'une voiture électrique en France serait plutôt à rapprocher de la "filiale nucléaire" alors qu'en Chine et en Allemagne, il serait plus proche de la "filiale charbon" (voir tableau ADEME annexé). Derrière cette voiture électrique se cache donc bien des filières aux conséquences différentes sur notre environnement.

L'avenir de la **voiture électrique** se trouve donc vraisemblablement dans une source d'électricité d'origine renouvelable comme l'hydro-électrique des barrages et rivières, l'éolien, le photo-voltaïque ou autre à développer ou à redécouvrir ? Dans ce contexte, on imagine que si tout le parc automobile et poids-lourds adopte cette voie, il faudra garnir nos territoires d'éoliennes et de parcs photo-voltaïques pour la forte demande en mobilité. Une fois de plus, les déplacements routiers devront être revus avec beaucoup de modération, d'autant que cette technologie de véhicule présente encore quelques inconvénients comme l'autonomie, le temps de recharge et le recyclage des batteries...

Une autre filière semble être à la mode actuellement, notamment au sein de la classe politique, c'est **l'hydrogène**. Le Président de la République s'est engagé lors de son entretien journalistique du 14 juillet 2020 à soutenir "la filière industrielle à l'hydrogène". L'Allemagne qui souhaite devenir leader mondial investi 7 à 9 milliards d'euros selon plusieurs sources : L'Usine Nouvelle, Les Echos... La France, elle, essaye de rester dans le coup avec 100 millions d'euros (1). Localement on peut observer aussi l'entreprise Braley à Rodez qui développe une installation de production plutôt à vocation expérimentale.

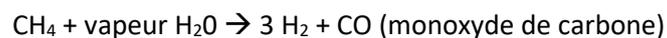
## La voiture à hydrogène, comment ça marche ?

Les informations élogieuses voire parfois lyriques déclarent que l'hydrogène a une puissance extraordinaire : pour preuve les fusées, 1kg d'hydrogène développe 4 fois plus d'énergie qu'un kg de gasoil... De plus, ça ne pollue pas puisque c'est de l'eau que l'on retrouve dans l'échappement. Sauf que pour les fusées, c'est une combustion thermique (l'hydrogène est brûlé comme l'essence dans l'air), solution qui avait été tentée il y a plusieurs années pour l'automobile mais abandonnée depuis pour plusieurs motifs dont certains environnementaux. En effet, avec ce type de motorisation on se rapproche du comportement des moteurs thermiques modernes à mélanges pauvres, gasoil ou essence, qui sont de forts émetteurs d'oxyde d'azote (NOx). Aujourd'hui la "voiture à hydrogène" est donc devenue, de fait, **une voiture électrique** grâce à une "pile à combustible" (PAC) ou "pile à hydrogène" (PAH) dans le cas considéré ici. Pour le voyageur, l'hydrogène à l'avantage d'un remplissage rapide du réservoir, à la différence du rechargement long d'une batterie sur le courant électrique.

### Rappel sur l'hydrogène :

C'est un gaz extrêmement léger constitué de 2 atomes d'hydrogène (H<sub>2</sub>) mais qui existe rarement à l'état naturel, il faut donc le synthétiser. Aujourd'hui les 2 principales sources s'obtiennent à partir :

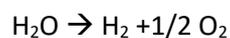
1. du reformage du gaz méthane dont les sources sont : charbon, gaz naturel, ou la bio-masse (méthaniseur) d'un point de vue théorique (voir encadré). Cette voie pétrolière représente actuellement près de 95% de la production d'hydrogène :



*On pourrait aussi partir d'un méthane renouvelable avec des méthaniseurs de boues en provenance des déchets agricoles ou des villes, mais d'une part il faudrait de très grandes installations pour amortir les coûts de production et il reste l'inconvénient des gaz résiduels comme le monoxyde de carbone (CO) qui empoisonnerait le catalyseur des piles à hydrogène. Sans rentrer dans la technique, la méthanisation est souvent aussi perturbée par de nombreux contaminants. C'est une filière qui mérite une réflexion particulière.*

Il est amusant de noter que l'abandon des sources pétrolières pourrait ainsi réveiller la vieille carbochimie des années 30. Durant la seconde guerre mondiale les véhicules à gazogène employaient une motorisation basée sur la chimie du charbon de bois, ressource renouvelable ! Voir en références plusieurs sites sur internet illustrant des véhicules modernes ou anciens, équipés de "gazo" (2) (3).

2. de l'électrolyse de l'eau :



Aujourd'hui pour des raisons économiques, l'hydrogène est obtenu majoritairement à partir du méthane d'origine fossile (pétrole ou gaz naturel), donc les voitures à hydrogène du moment ne sont pas idéales d'un point de vue environnemental.

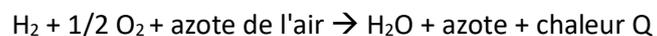
Ainsi, idéalement, il faudrait passer par la voie de l'électrolyse de l'eau (réaction ci-dessus), procédé connu depuis longtemps par les anciens élèves qui ont pratiqué ce genre de manip au collège. Il existe aujourd'hui des procédés plus adaptés aux conditions industrielles mais conservant le même principe. Si le procédé est simple, il consomme énormément d'énergie car la molécule d'eau est très solide. Ce procédé exigera donc d'énormes quantités d'électricité si l'on souhaite faire évoluer le parc automobile actuel et à venir, ce qui devra se traduire par une extension des parcs éoliens et photo-voltaïques, pas toujours bien acceptés sur le plan sociétal.

Certains affirment que l'électricité produite par les éoliennes de nuit n'est pas complètement utilisée et que l'obtention de l'hydrogène par électrolyse de l'eau pourrait être un bon moyen de "stocker" l'énergie électrique non consommée. Cette idée n'est pas nouvelle, il y a plus de 40 ans on parlait déjà de "l'hydrogène électro-nucléaire des heures creuses" (4) !

Une particularité souvent oubliée de l'hydrogène est sa taille moléculaire et sa légèreté. En conséquence pour transporter un peu d'hydrogène et non pas beaucoup de vide, il faut dépenser pas mal d'énergie pour le comprimer. Déjà avec de l'air plus dense, le cycliste sait l'énergie musculaire qu'il faut développer pour gonfler un pneu à 2 ou 2,5 bars avec une pompe à main. Pour transporter de l'hydrogène, il faut mettre sous pression des réservoirs à 350 voire 700 bars, avec des matériaux particulièrement étanches et solides pour éviter la diffusion de la petite molécule. Pour preuve, le Kangoo ZE à hydrogène de Renault est équipé d'un réservoir généreux de 75 l sous 350 bars de pression et cette réserve n'est là que pour alimenter une petite pile à hydrogène destinée seulement à compléter le dispositif : batterie/moteur électrique. Au passage, ce véhicule pèse 150 kg de plus que la version gasoil. Aujourd'hui, il est admis qu'il faut environ 1kg d'hydrogène /100km, or 0,9kg d'hydrogène sous 200 bars exige déjà un réservoir d'une capacité de 50 l, comme la majorité des voitures à "pétrole". Pour ceux qui souhaiteraient rentrer dans les comparaisons chiffrées se reporter au site contrepoints (6).

### **La pile à hydrogène (PAH) :**

Pour faire simple, c'est un système où d'un côté l'hydrogène arrive et de l'autre l'air. Rappelons que l'air est constitué majoritairement de 78% d'azote. Ce gaz neutre (5) est souvent oublié par les publicitaires et la classe politique ! On peut considérer que la PAH reproduit une électrolyse inverse de celle décrite plus haut. Il y aura donc une cuve avec des électrodes, un électrolyte (liquide conduisant les charges électriques) et des membranes pour séparer les différents composés. La réaction entraîne aussi un dégagement de chaleur important à évacuer ou utilisable pour chauffer le véhicule :



Tout ça est assez simple pour le physico-chimiste mais reste complexe pour l'art de l'ingénieur. Pour preuve cette pile à hydrogène, a été développée pour les vols spatiaux de la NASA avec des matériaux nobles et coûteux. On trouve ainsi du platine dans les électrodes et des feuilles en polymères fluorés pour les membranes séparatrices. Pour mémoire, ces polymères fluorés très coûteux, comme le Nafion, sont maîtrisés par une célèbre société américaine de vieille origine française, appelée Du Pont de Nemours (voir le récent film Dark Waters - 2020).

On imagine alors mal des milliards de véhicules sur la planète avec cette technologie issue de l'aérospatiale. C'est pourquoi depuis plusieurs années de nombreux laboratoires universitaires et privés recherchent des matériaux pour élaborer des membranes en polymère recyclable plus économique, moins nuisible pour l'environnement et des électrodes sans platine ou à très faible taux car ce métal précieux n'est pas inépuisable. De plus, l'hydrogène actuel obtenu à partir du méthane contient des traces de monoxyde de carbone qui pollue assez rapidement le catalyseur à base de platine ce qui impose une fréquence de maintenance. L'hydrogène obtenu à partir de l'électrolyse de l'eau serait plus pur, donc plus adapté pour la PAH mais l'ensemble de la filière semble présenter de nombreux défis techniques et économiques à résoudre, selon les informations accessibles sur le net pour le citoyen lambda.

Sur le schéma annexé, on pourra constater que pour se déplacer à l'hydrogène il faut tout de même 2 conversions énergétiques en électricité et de sacrées dépenses énergétiques tant pour casser la molécule d'eau que pour comprimer l'hydrogène et le transporter.

## Tentative de conclusion et réflexion un brin philosophique

Si l'hydrogène fait parler de lui depuis quelques temps, et notamment au sein de la classe politique, en nous présentant ce gaz comme une alternative écologique aux carburants d'origine pétrolière employés dans les moteurs thermiques, il semble utile de tempérer cet enthousiasme :

- d'une part l'hydrogène produit aujourd'hui provient à 95% des gaz d'origine pétrolière et sa production par électrolyse de l'eau avec de l'électricité d'origine "renouvelable" serait probablement difficilement généralisable à l'ensemble du parc de véhicules routiers d'aujourd'hui et futur, tant pour des raisons économiques que d'acceptation sociétale.
- d'autre part l'utilisation des PAH semble encore poser de sérieux problèmes techniques tant par la manipulation du gaz que par les contraintes de durabilité et de recyclabilité des matériaux employés (quantité de H<sub>2</sub> transporté, membranes polymères, catalyseurs...)
- la faible densité de ce gaz entraîne de nombreux problèmes dans le domaine de la distribution. Il faudra donc attendre plusieurs années pour disposer d'un réseau de stations sur le territoire. De plus, la faible quantité d'hydrogène embarquée sur les véhicules légers devrait en limiter l'autonomie en zones urbaines et périurbaines, mais qui sont les espaces les plus demandeurs sur le plan de la qualité de l'air.
- enfin pour parvenir à un véhicule avec moteur électrique alimenté par une PAH qui ne relargue que de la vapeur d'eau et de l'azote, il aura fallu passer par pas mal de conversions énergétiques, dont 2 électriques ! Le rendement mécanique final de ce genre de véhicule devra ainsi être calculé depuis la force du vent sur l'éolienne ou l'énergie solaire sur les capteurs photo-voltaïques. A ce titre, le char à voile qui transforme directement la force d'Eole en déplacement mécanique semble faire preuve d'une grande sobriété de moyens.

Notre classe politique utilise parfois un discours flou comme celui de Bruno Lemaire, ministre du budget, sur France Inter le 16/07/2020 : "Nous voulons de l'hydrogène vert à partir de l'électrolyse, ça coûte cher, mais nous ne voulons pas d'hydrogène gris". Certes, l'hydrogène venant du reformage de gaz fossile peut être taxé de "gris", mais l'électrolyse ne produira pas de l'hydrogène "vert" si l'électricité employée provient des ressources fossiles non renouvelables.

Dans l'état actuel des choses, le véhicule routier électrique alimenté par une PAH avec de l'hydrogène extrait de l'eau devrait rester extrêmement coûteux à l'usage avec des conséquences aussi sur l'environnement et ne devrait pas être accessible à toutes les bourses. D'ailleurs serait-ce bien souhaitable ? Après perfectionnement, on pourrait davantage envisager ce type de véhicule de manière partagée. Ce pourrait être, par exemple, une sorte de retour à l'autocar de nos campagnes d'autrefois mais sous forme de navettes autonomes à fréquence de circulation adaptée aux besoins de la population.

En revanche, le développement de l'hydrogène pour les trains régionaux semble plus prometteur, à ce jour, et se rapprocherait un peu des rêves de mobilités décrits précédemment. En effet, le matériel ferroviaire permet d'embarquer des réservoirs de plus grandes capacités que sur les petits véhicules routiers et la résistance au roulement est bien plus faible que sur nos automobiles équipées de pneumatiques. Dans des épreuves de courses technologiques pour les automobiles où l'on réduit le poids et où l'aérodynamique est travaillée, la résistance au roulement provient à 70% des pneumatiques, selon Michelin. La voie ferrée devrait donc rester plus performante que la route ! Combien de villes ayant arraché leurs rails de trams durant les années 50 et 60, les ont réimplantés depuis le début des années 2000 ?

Cette transition écologique va donc bousculer nos habitudes. Pour nous aider, on pourra repenser à une phrase de Jean-Marie Pelt (7) citée lors de sa conférence au Causse Comtal en 2010 : " *Il faut trouver son bonheur autrement que dans la possession intensive*". Canopée préconise donc de se préparer volontairement à ce bouleversement afin de moins le subir, en adoptant un style de vie nettement plus sobre dans tous nos domaines d'activités. Pour peupler les 8 à 10 milliards d'habitants attendus pour la fin du siècle, notre planète ne pourra probablement pas se couvrir d'éoliennes et de panneaux photo-voltaïques pour répondre à tous les besoins électriques en croissance car il faudra aussi conserver des surfaces cultivables et habitables.

Association Canopée

BP 13/08/2020

### Références des sources et informations complémentaires :

1-Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition écologique - Nicolas Hulot-Ministère de la transition écologique (2018)

2- <https://www.instructables.com/id/Convert-your-Honda-Accord-to-run-on-trash/>

3-Gazo français sur GMC : le passé ou l'avenir? : <https://www.youtube.com/watch?v=XWROJkqRSB4>

4- Valorisation des déchets et sous-produits industriels- Michel Murat- Ed Masson1981-p135

5- L'azote (N<sub>2</sub>) est un gaz neutre, sans toxicité, mais il ne faudrait pas faire fonctionner une PAH dans un local fermé pour se chauffer, comme certains le font l'hiver avec un groupe électrogène, pour disposer d'électricité. L'asphyxie par l'azote serait assurée, bien que moins grave qu'avec le monoxyde de carbone issu de combustion.

6- Pour les comparaisons chiffrées : <https://www.contrepoints.org/wp-content/uploads/2015/07/Lhydrog%C3%A8ne-cet-hallucinog%C3%A8ne-Annexe-1.pdf>

7-Jean-Marie Pelt : pharmacien, botaniste et écologue, longtemps chroniqueur sur France Inter, fondateur du CRIIGEN avec Corinne Lepage. Vidéo conf. du Causse Comtal visible sur : <http://biodiversite.aveyron.fr/conference-la-biodiversite-et-nous/>

Scénario 2012	français	allemand
Nucléaire	76,6 %	23,3 %
Charbon	4,1 %	44,1 %
Pétrole	1,0 %	1,4 %
Gaz	4,5 %	15,2 %
Biomasse & déchets	1,0 %	4,6 %
Hydrolien	11,9 %	4,2 %
Eolien	1,0 %	6,4 %
Solaire	0,0 %	0,7 %
Géothermie et autres	0,0 %	0,0 %

ADEME 2013 : énergies primaires des véhicules électriques en France et en RFA