

MOTEURS THERMIQUES À HYDROGÈNE

Sommaire

Introduction

1. *Rappel du principe du moteur thermique, application à l'hydrogène*
2. *Moteurs de un à quelques kW*
3. *Moteurs de quelques dizaines de kW et au-delà*
4. *Automobile et transport routier*
5. *Transport ferroviaire*
6. *Transport maritime*
7. *Conclusion*

Le couplage d'une pile à combustible à hydrogène à un moteur électrique correspond, de toute évidence, à la situation idéale pour obtenir de l'énergie mécanique sans émission de gaz à effet de serre ni d'autre forme de pollution ... sous réserve que l'hydrogène soit d'origine renouvelable.

Mais au début des années 2000, ce système en était encore au stade de la R&D avec ses premières démonstrations. Les espoirs de commercialisation paraissaient bien hypothétiques à court-moyen terme si bien qu'une solution de transition crédible était apparue en découplant l'apparition des deux technologies "futuristes" considérées: l'hydrogène d'une part et la pile à combustible, d'autre part. On commencerait donc par l'hydrogène en l'utilisant avec une technologie mature (le moteur thermique) et on valoriserait, dans un deuxième temps, la maîtrise de la technologie hydrogène dans la pile à combustible dès qu'elle serait à son tour mature, une vingtaine d'années plus tard, pensait-on.

Le moteur thermique (ou moteur à combustion interne) peut, dans son principe et sans modifications importantes, fonctionner à l'hydrogène pour produire de l'énergie mécanique en ne rejetant que de la vapeur d'eau ... et des oxydes d'azote (NO_x). De ce fait, le moteur à combustion interne à hydrogène pouvait contribuer à relever le double défi déjà identifié à l'époque : remédier à la raréfaction croissante des ressources pétrolières et diminuer les émissions de gaz à effet de serre ... dès lors que l'hydrogène utilisé n'est pas fabriqué à partir de combustibles fossiles!

Les moteurs thermiques les plus courants sont de type alternatif à pistons: ils fonctionnent suivant le cycle de Beau de Rochas-Otto à allumage commandé ou le cycle de Diesel à allumage par compression. Il existe aussi le moteur à piston rotatif de type *Wankel*. Les moteurs thermiques se distinguent également par la nature des carburants qu'ils brûlent: essences de pétrole légères, alcools, distillats de pétrole plus ou moins lourds, gaz de houille ou de pétrole ou issus de la fermentation de matières organiques.

Un autre type de moteur à combustion interne est la turbine à gaz dont l'énergie mécanique est générée par l'action, sur les ailettes d'une turbine, des gaz expulsés par la combustion. Si ce type de moteur est totalement dominant en aéronautique, il est également utilisé dans les centrales électriques à gaz à cycle combiné. Dans ce cas, les gaz très chauds expulsés par la turbine à combustion produisent, via un échangeur thermique, de la vapeur d'eau qui, par détente, actionne une turbine simple (sans combustion) qui, comme la première, actionne un alternateur.

Par principe, ces moteurs peuvent fonctionner avec tout combustible donc peuvent fonctionner avec l'hydrogène, notamment dans le cas des moteurs à pistons à allumage commandé et celui des turbines à gaz.

On examine dans ce qui suit les solutions possibles par rapport aux classes de puissance et aux applications telles que l'automobile et le transport routier, les transports ferroviaires, le transport aérien et le transport maritime.

1 - Rappel du principe du moteur thermique, application à l'hydrogène

Dans un moteur d'automobile, l'énergie mécanique transmise par les pistons, provient de la combustion du carburant, essence ou gazole, avec l'oxygène de l'air auquel s'ajoute l'azote, inerte, présent, pour les quatre cinquièmes, dans l'air aspiré.

Ces moteurs sont dits à combustion interne, car la combustion du carburant et la détente des gaz produits ont lieu dans chaque cylindre à l'intérieur même du moteur contrairement à ce qui se passait autrefois dans la machine à vapeur pour laquelle ces deux phases avaient lieu dans deux organes séparés : chaudière et cylindre. Suivant le cycle de Beau de Rochas-Otto, le moteur à combustion interne fonctionne suivant un cycle à quatre temps :

- L'admission du mélange air – carburant aspiré par le mouvement du piston vers le bas du cylindre,
- La compression par le mouvement du piston vers le haut du cylindre,
- La combustion instantanée (déflagration) déclenchée par l'étincelle électrique de la bougie, et la brusque expansion des gaz brûlés qui s'en suit repousse le piston vers le bas du cylindre : c'est la phase motrice du cycle. Dans le cas du moteur Diesel, l'allumage est obtenu sans étincelle par la seule compression du mélange qui est introduit sous pression dans le cylindre grâce à un injecteur,
- L'échappement des gaz brûlés repoussés par le mouvement du piston vers le haut du cylindre. Le moteur est alors prêt pour le cycle suivant. Une soupape assure l'ouverture du cylindre durant l'admission, une autre durant l'échappement, elles sont toutes les deux fermées durant la compression et la détente. Le mouvement linéaire du piston est converti en rotation par un ensemble bielle – manivelle. Un moteur d'automobile comporte couramment quatre ou six cylindres dont les cycles sont décalés dans le temps afin d'assurer une rotation régulière.

Convertir un tel moteur à l'hydrogène ne change rien au principe, seules quelques modifications deviennent indispensables car:

- Le carburant introduit dans les cylindres étant gazeux, il y a nécessité d'injecteurs adaptés dont la technologie est à développer,
- Pour un moteur atmosphérique à prémélange et à allumage commandé, l'hydrogène occupe un relativement grand volume, ce qui diminue la quantité de fluide de travail à chaque cycle et réduit de manière importante (au moins 20 à 25%) la puissance spécifique du moteur, mais en raison de la possibilité d'un taux de compression élevé¹, 13 à 14, le rendement énergétique peut atteindre 36 % alors que celui des moteurs classiques à taux de compression plus bas (8 à 9) ne dépasse pas 30 %. La limitation en puissance spécifique peut être éliminée via des dispositifs d'injection appropriés (injection directe haute pression) et la suralimentation en air donc en oxygène (adjonction d'un compresseur ou d'un turbocompresseur). On peut alors aboutir à des moteurs à très hauts rendements (plus de 40%), pouvant même dépasser ceux des meilleurs moteurs Diesel,
- L'hydrogène est très sensible à l'autoallumage et aux retours de flamme vers le collecteur d'admission (cas des moteurs à injection indirecte). En outre, le moteur doit être propre, en particulier exempt de dépôts de carbone qui, à leur tour, pourraient être à l'origine d'auto-allumage. C'est pour remédier à ces inconvénients que le moteur rotatif avait été adopté par la firme japonaise Mazda lors de la mise au point de ses véhicules à moteur à hydrogène à combustion interne, en 1991 (cf. [Fiche 9.1.8](#)),
- La combustion de l'hydrogène étant environ six fois plus rapide que celle de l'essence, un réglage précis du moteur est indispensable comme il l'est également pour minimiser les émissions d'oxydes d'azote.

¹ En termes techniques cette possibilité se dit « avoir un indice d'octane élevé ».

Quant aux matériaux constituant le moteur ils doivent être choisis résistants à l'hydrogène, en particulier pour éviter les risques de corrosion fissurante.

Les émissions d'un tel moteur à hydrogène mesurées dans un centre d'essais canadien sur un prototype de 4,9 litres de cylindrée tournant à 2 200 tours/minute et développant une puissance de 80 kW ont été ainsi mesurées :

- En hydrocarbures (dus à l'huile de lubrification) : 2,6 ppm, soit 1,4g par heure de fonctionnement,
- En oxyde de carbone : 0,0 ppm
- En oxydes d'azote : 7,1 ppm soit 5,3 g/heure,
- En oxygène : 13,8 %.

2 - Moteurs de un à quelques kilowatts

Ce domaine recouvre des usages allant des vélomoteurs, motos, scooters, engins de jardinage, de bricolage ou de loisirs, à la motopompe d'un village reculé d'une zone quasi désertique. La conversion à l'hydrogène de certains de ces moteurs thermiques est théoriquement possible mais il faut bien garder à l'esprit que les stations d'alimentation d'un réservoir de stockage d'hydrogène et le réseau de distribution associé restent encore à développer. En Inde plusieurs initiatives de recherche et développement avaient été prises au début des années 2000 pour mettre au point des vélomoteurs et tricycles à moteur à combustion interne à hydrogène d'une autonomie de 60 à 80 km destinés aux déplacements urbains, mais apparemment, faute d'information nouvelle, on peut penser que cette idée a été abandonnée.

3 - Moteurs de quelques dizaines de kW et au-delà

Il s'agit de moteurs fixes ou relativement peu mobiles entraînant un groupe électrogène et utilisés dans des lieux non desservis par un réseau électrique. Ils peuvent théoriquement être convertis à l'hydrogène comme ceux que produit la société américaine *Hydrogen Engine Center*².

Au niveau du mégawatt, ce sont des installations industrielles importantes, voire des centrales électriques, qui peuvent en particulier être associées à des unités produisant de l'hydrogène par électrolyse de l'eau à partir d'énergies renouvelables par l'intermédiaire de capteurs solaires photovoltaïques ou d'éoliennes. En fait, ces dispositifs génèrent de l'électricité mais qui est difficilement utilisable car produite de manière intermittente et instable puisque liée à l'ensoleillement ou à la présence du vent et surtout obtenue sous forme de courant continu³ qui demande à être converti en courant alternatif (par des onduleurs) pour être utilisable. En revanche, ce courant continu directement issu des énergies renouvelables est adapté à l'électrolyse qui, en dissociant de l'eau, produit de l'hydrogène qui peut être stocké.

Les moteurs thermiques fonctionnant avec cet hydrogène entraînent des alternateurs dont le courant peut, alors, être directement utilisable ou distribué sur le réseau.

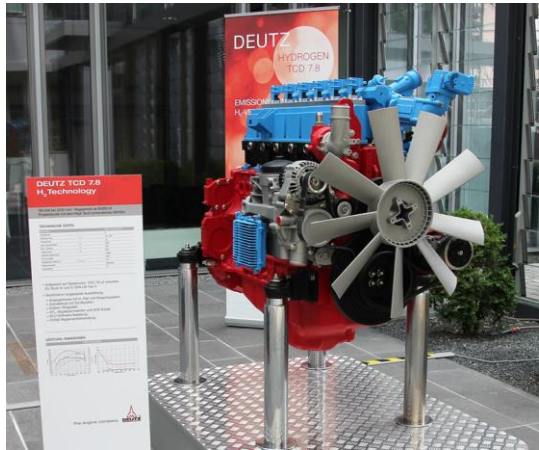
Nota : si ce type de groupe électrogène (moteur thermique à hydrogène couplé à un alternateur) peut être comparé à un générateur à PAC il faut noter que ce dernier présente non seulement l'avantage d'un rendement légèrement supérieur mais surtout celui d'être totalement silencieux.

Quelques exemples récents

- En mars 2019, les sociétés allemandes **Deutz** et **Keyou GmbH** ont présenté le premier prototype d'un moteur alimenté en hydrogène qu'ils ont codéveloppé (cf. Fig. 1) sur la base d'un moteur Diesel 6 cylindres existant d'une cylindrée de 7,8 l. En mars 2020 ces sociétés annoncent que le développement se poursuit normalement et que ce moteur devrait bientôt intégrer des premiers engins (bus, tracteurs routiers). L'objectif annoncé est de lancer, chez Deutz à Cologne, une production en série en 2021 ou courant 2022 au plus tard.

² <http://www.hydrogenenginecenter.com/>

³ En fait, les éoliennes produisent du courant alternatif à fréquence variable, lequel est transformé sur place en courant continu grâce à un jeu de thyristors et transistors de puissance.



KEYOU
emission-free technology.

Figure 1 – Le prototype Deutz-Keyou (2019)

- En 2019, la société britannique **ULEMCo**⁴, qui propose de convertir des véhicules commerciaux classiques en véhicules thermiques à hydrogène, a annoncé le prochain lancement d'un groupe électrogène composé d'un moteur de 50 kW couplé à un alternateur (cf. Fig. 2).



Figure 2 – Le prototype de groupe électrogène ULEMCo 50kW (2019)

- En août 2019, la société **BeHydro**, « joint-venture » entre les sociétés belges **ABC** (Anglo Belgian Corporation) et **CMB** (Compagnie Maritime Belge), annonce un lancement commercial prévu en septembre 2020 d'une série de moteurs alimentés en hydrogène de puissance dans la gamme 0,8 – 2,8 MW (cf. Fig. 3), en configuration 6, 8, 12 et 16 cylindres, pour des applications aussi bien terrestres que marines. En septembre 2020, cette société annonce le lancement commercial de cette machine.

⁴ <http://ulemco.com/>



Figure 3 – Le moteur thermique à hydrogène BeHydro (2019)

- En septembre 2020, la société autrichienne **INNIO** (groupe *General Electric*) annonce qu'elle a développé et testé un moteur (Class 1 MW) dérivé d'un moteur à gaz naturel et fonctionnant en mélange gaz naturel/hydrogène et à l'hydrogène pur, sous la marque *Jenbacher*. Le projet est mené en collaboration avec **HanseWerk Natur**.
- En octobre 2020, la société allemande **MAN Truck & Bus** (filiale de MAN) annonce s'intéresser à l'hydrogène comme combustible pour ses bus et camions, pour une application en 2023.
- En janvier 2021, **MHIET** (*Mitsubishi Heavy Industries Engine & Turbocharger*), Ltd. et **AIST** (*Advanced Industrial Science and Technology*) annoncent qu'ils mènent un projet commun d'un moteur alimenté à 100% en hydrogène sur la base d'un moteur Diesel existant et qu'ils ont achevé une série d'essais sur un monocylindre.
- En février 2021, **IFPEN** (*IFP Energies Nouvelles*) annonce qu'il va accroître ses efforts de recherche et innovation autour du moteur thermique hydrogène pour lequel il s'est équipé d'un banc d'essais dédié. Pour un tel moteur destiné à des poids lourds il voit l'avantage de pouvoir utiliser un hydrogène qui ne soit pas de grande pureté.
- En février 2021, le constructeur autrichien **AVL** annonce développer un moteur à combustion interne de 12,8 l de cylindrée (puissance de 350 kW) alimenté en hydrogène pour des poids lourds.
- En février 2021, la société canadienne **Westport Fuel Systems** annonce avoir achevé avec succès le développement initial d'un moteur à combustion interne alimenté en hydrogène de type HPDI (High Pressure Direct Injection).
- En mars 2021, la société écossaise **2G Energy UK** annonce le développement d'un cogénérateur énergie-chaaleur sur la base d'un moteur à combustion interne alimenté en hydrogène à 100% destiné à l'aéroport de Kirkwall, dans la gamme 50-550 kW.
- En mai 2021, le constructeur britannique de moteurs thermiques **Ricardo** annonce des tests d'un monocylindre *Proteus* alimenté en hydrogène, en collaboration avec l'Université de Brighton.
- En mai 2021, le constructeur anglais de moteurs Diesel **JCB** annonce le développement d'une version hydrogène de son moteur Diesel max 4484.

- En mai 2021, suite à l'annonce de AVL (voir ci-dessus) l'entreprise israélienne **Aquarius Engines** annonce une version hydrogène (100%) de son moteur à deux pistons/cylindres en ligne (cf. Fig. 4) d'un poids de 10 kg.

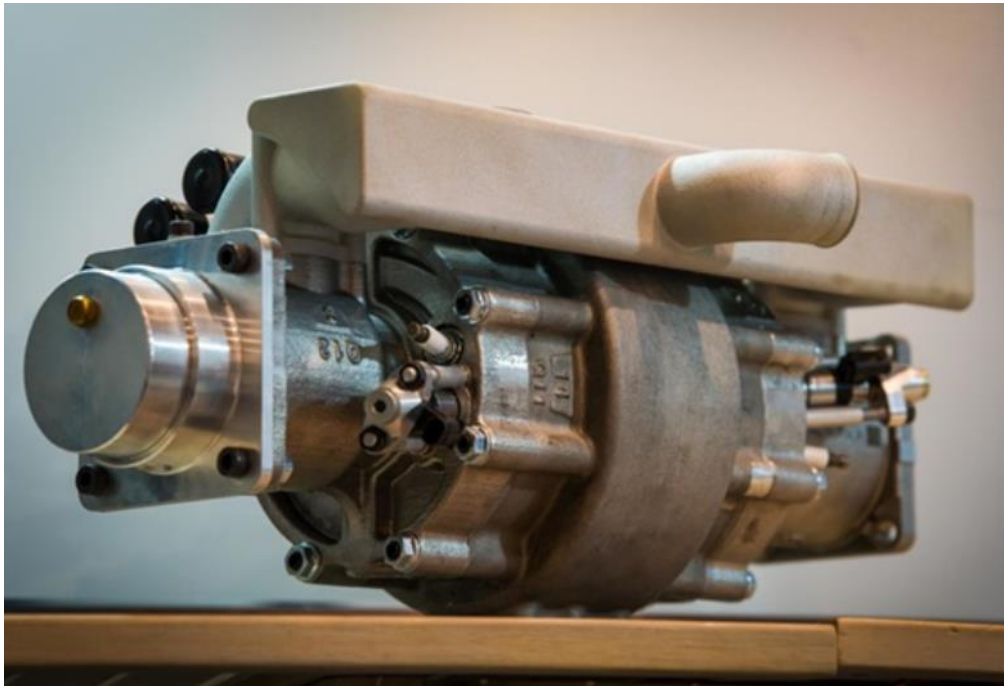


Figure 4 – le prototype Aquarius (2021)

4 - Automobile et transport routier

Dans le passé, certains constructeurs automobiles avaient développé des versions spéciales de leurs modèles, équipés de moteurs thermiques convertis à l'hydrogène.

Ainsi, Peugeot s'y était intéressé dès le début des années 1970 et avait présenté, en 1981, un prototype de son modèle 505 (cf. Fig. 5). L'hydrogène alimentant le moteur était stocké dans des hydrures ; mais leur poids élevé devant la masse d'hydrogène stocké ne permettait pas de disposer de ce dernier en quantité suffisante pour assurer une autonomie acceptable. Le projet a alors été abandonné.



Figure 5 – Prototype Peugeot 505 à moteur thermique à hydrogène (1981)

Pour éviter les inconvénients liés à la fois à la faible autonomie du réservoir d'hydrogène et au faible nombre de stations-service à hydrogène, les constructeurs avaient conçu des véhicules bicarburant fonctionnant à l'essence et à l'hydrogène. C'est le cas par exemple de la firme allemande *BMW* avec son modèle haut de gamme 745 H (cf. fiche 9.1.3) ou de la firme japonaise *Mazda* qui avait mis au point et commercialisé la voiture RX-8, équipée d'un moteur thermique rotatif, les deux fonctionnant soit à l'hydrogène, soit à l'essence (cf. fiche 9.1.8) (cf. fig. 6 et 7). Le passage d'un mode à l'autre était automatiquement géré par l'ordinateur de bord. Dans le même esprit, des prototypes de camionnettes de démonstration bicarburant hydrogène-essence ont été construits au Canada à l'initiative du *Saskatchewan Research Council*. Ces véhicules avaient été réalisés à partir de structures (châssis et carrosserie) *General Motors* et *Chevrolet* avec l'idée de développer, à un coût moindre, l'alternative hydrogène pour les transports de proximité les plus courants.

D'autres véhicules à moteur thermique à hydrogène ont été imaginés sur le modèle des voitures hybrides actuellement commercialisées. Ces dernières disposent d'un moteur thermique conventionnel, à essence ou gazole, associé à un moteur électrique alimenté par une batterie que recharge le moteur thermique. Ce moteur électrique fonctionne, soit seul sans aucun rejet ni aucun bruit (situation particulièrement intéressante en ville) soit, si nécessaire, apporte un supplément de puissance au moteur thermique. Ainsi, la voiture hybride à moteur thermique à hydrogène serait-elle une voiture propre dans ces deux modes de fonctionnement ! Plusieurs dizaines de tels véhicules ont été construits (*Ford*, *Mazda*, *Quantum*, bus *MAN* dans le cadre du programme *HyFleet-CUTE*, en particulier) et testés en conditions réelles (cf. fig. 8), mais cette technologie n'a pas fourni aux constructeurs les satisfactions voulues et leurs développements ont été arrêtés au début des années 2010.



Figure 6 - La BMW 745 H reçue à l'Elysée en 2007



Figure 7 - La Mazda Premacy Hybrid en 2009



Figure 8 - La Toyota Prius modifiée par Quantum en 2008

Malgré tous ces développements décourageants, la société britannique *ULEMCo*⁵ a relancé ce mode d'alimentation en avril 2018 en présentant un poids lourd équipé d'un moteur VOLVO FH16 modifié pour être alimenté en hydrogène (cf. fig. 9). Les avantages mis en avant par cette société sont une très faible pollution (faibles émissions de NOx) et un faible surcoût comparé à un poids lourd équivalent à pile à combustible. D'une puissance disponible de 300 CV et équipé d'un réservoir de 17 kg d'hydrogène, son autonomie annoncée était de 300 km.



Figure 9 – Le prototype de poids lourd *ULEMCo* à moteur thermique à hydrogène (2018)

En juillet 2020, *Renault Trucks* propose d'intégrer l'hydrogène dans le poids-lourd avec un moteur à allumage commandé, une solution avantageuse pour répondre aux différentes contraintes environnementales à court terme. Son utilisation dans un moteur à allumage commandé est une solution avantageuse pour répondre aux différentes contraintes environnementales à court terme. Le développement de cette solution se distingue par un coût très compétitif par rapport aux solutions actuelles et répondant aux normes environnementales les plus contraignantes. Elle s'appuie sur la compétence des équipes de R&D et sur le tissu industriel existant en France dans le domaine du

⁵ www.ulemco.com

moteur à allumage commandé. A noter que *Renault Trucks* souhaite aussi développer un concept de pont électrique qui améliorera de façon significative les performances des futurs camions zéro émission à batterie ou à pile à combustible.

En juillet 2020, le constructeur allemand *MAHLE* annonce souhaiter utiliser l'hydrogène dans ses camions (cf. Fig. 10) équipés de moteurs thermiques.



Figure 10 - Camions MAHLE (2020)

5 - Transport ferroviaire

Les turbines à gaz ont suscité un certain engouement dans le passé mais peu de motrices en ont été équipées, le bruit émis n'étant pas le moindre de leurs inconvénients. Les lignes électrifiées sont peu fréquentes hors des pays européens et c'est le Diesel qui équipe la grande majorité des motrices. Là où la traction électrique n'est guère envisageable du fait du coût de l'électrification (caténaires), il n'y a pas de raison de penser que le train, économe en énergie, disparaîtra en même temps que le pétrole. La locomotive à moteur thermique à hydrogène pourrait être un recours valable et ce d'autant plus qu'il est relativement simple d'ajouter un wagon citerne d'hydrogène liquide derrière la motrice, à l'image de ce qu'était autrefois le tender contenant le charbon et l'eau des machines à vapeur... mais cette solution est lourde et serait à comparer à l'initiative récente d'Alstom (2014) qui développe le train à pile à combustible CORADIA (cf. [Fiche 9.4.5](#)), solution techniquement plus séduisante.

6 - Transport maritime

Si utiliser de l'hydrogène énergie dans les transports présente la difficulté du stockage de l'hydrogène à bord du véhicule, force est d'admettre que celle-ci est moindre dans le cas d'un bateau. En effet que ce soit à bord de navires, et même de péniches, disposer de volumes et de charges supplémentaires n'est pas trop problématique. Il est pour cela imaginable que ces bateaux soient équipés de réservoirs à hydrogène liquide, le seul adapté à des stockages de grandes quantités (cf. [fiche 4.3](#)). Cet hydrogène ferait alors fonctionner de puissants moteurs thermiques assurant la propulsion ou pourrait même alimenter des piles à combustible qui fourniraient l'électricité nécessaire à la propulsion et/ou l'alimentation des auxiliaires du bateau..

Ce remplacement des hydrocarbures par l'hydrogène dans les moteurs marine conduirait à prévoir une hausse des coûts d'exploitation qui, aujourd'hui, sont particulièrement bas avec les motorisations à fuels lourds.... particulièrement polluants. Le coût de l'utilisation de l'hydrogène serait d'autant plus élevé que son stockage à bord entraînerait aussi des investissements coûteux à la fois du fait des nécessaires modifications sur l'architecture des navires et des mesures de sécurité. Le problème est connu avec les méthaniers mais dans le cas de l'hydrogène liquide la température de stockage est encore plus basse (20 K contre 110 K) ! Il faut néanmoins prendre en compte le cas particulier des cargos transporteurs d'hydrogène, comme c'est le cas du projet actuel de transport d'hydrogène

liquide entre l'Australie et le Japon ([cf. Fiche 4.3](#)), qui pourraient utiliser l'hydrogène gazeux qui s'évapore fatalement et qui pourrait alimenter soit un moteur thermique, soit des piles à combustible.

7 - Conclusion

Si l'utilisation de l'hydrogène comme combustible dans un moteur thermique a pu, un temps, apparaître comme une solution intéressante, tant sur le plan technique qu'économique du fait de l'utilisation d'une technologie mature (le moteur thermique), elle se heurte à plusieurs difficultés :

- Nécessité de développer une technologie spécifique (injection haute pression d'hydrogène, suralimentation), qui soit adapté à l'usage de ce nouveau combustible qu'est l'hydrogène, ce qui reste très coûteux pour aboutir à un moteur commercialisé à un coût raisonnable,
- Performances environnementales intéressantes (absence de CO₂) mais limitées (émissions de NOx), et donc nécessité d'ajouter un système de dépollution,
- La concurrence croissante de développements encourageants de la pile à combustible ([cf. Fiche 9.4.6](#)).

Cela avait conduit tous les constructeurs à abandonner progressivement cette voie à partir de 2010. Mais, depuis 2019, un regain d'intérêt est apparu au travers d'initiatives de sociétés étrangères européennes (ULEMCo, Deutz-Keyou, BeHydro, MAN ...).

Une renaissance de cette filière ?