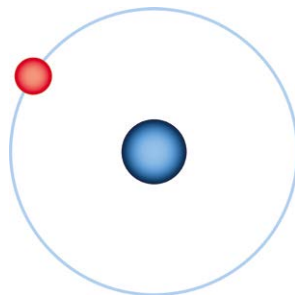


# La propulsion des fusées et des futurs avions chez Air Liquide !

*Ingénieur en aérodynamique, docteur en mécanique des fluides, après un postdoc à la NASA, Pierre Crespi est actuellement directeur de l'innovation de la Société Air Liquide advanced Technologies<sup>1</sup>.*

L'élément le plus léger de l'univers, l'hydrogène, a de nombreuses applications actuelles et potentielles dans la propulsion automobile avec les piles à combustible, dans les futurs lanceurs spatiaux, dans les projets d'exploration spatiale, ainsi que dans l'aéronautique.

un électron, **Figure 1**), existe sous la forme de la molécule de dihydrogène notée  $H_2$



**Figure 1**

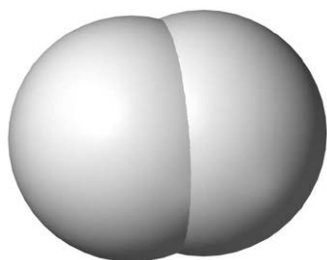
*Structure de l'hydrogène, atome constitué d'un proton autour duquel gravite un électron.*

## 1 L'hydrogène

### 1.1. Un peu d'histoire

L'hydrogène, l'atome le plus simple noté H (un proton et

1. [www.airliquide.com](http://www.airliquide.com)



**Figure 2**

Le dihydrogène, molécule la plus abondante dans l'Univers, dite « hydrogène » dans le langage courant.



**Figure 3**

La Nébuleuse du Cygne est un gigantesque nuage d'hydrogène.



**Figure 4**

Henry Cavendish (1731-1810) a découvert le dihydrogène un gaz inodore, incolore mais inflammable, nommé alors air inflammable.

(**Figure 2**) contenant deux électrons qui gravitent autour de deux protons.

Cette molécule, la plus abondante dans l'Univers puisque c'est la plus simple, constitue environ 75 % de la masse connue de l'Univers (en dehors de la matière noire). Par exemple le merveilleux nuage de la constellation du Cygne (**Figure 3**) est un nuage d'hydrogène très froid qui est rétroéclairé par les étoiles situées derrière ou à l'intérieur. Notre Soleil consomme 600 millions de tonnes d'hydrogène par seconde pour les transformer en un peu moins de 600 millions de tonnes d'hélium, ce qui fournit l'énergie solaire ; remarquons qu'à chaque seconde, le Soleil consomme l'équivalent de dix fois la production annuelle mondiale d'hydrogène.

L'hydrogène est connu depuis longtemps ; le premier à

l'avoir étudié est un chimiste anglais, Henry Cavendish (**Figure 4**), qui avait remarqué qu'en versant de l'acide sur du fer ou du zinc, on obtenait un gaz, inodore et incolore mais inflammable, qu'il avait appelé de l'air inflammable.

C'est Lavoisier (**Figure 5**) qui, au XVIII<sup>e</sup> siècle, a caractérisé



**Figure 5**

Antoine Lavoisier a découvert l'une des caractéristiques du dihydrogène, celle de générer de l'eau (en grec hydrogène signifie longtemps ; le premier à

l'hydrogène. Il avait remarqué que dans certaines conditions, quand on mélangeait une masse d'hydrogène avec huit masses d'oxygène, on obtenait de l'eau, donc il a déclaré que ce gaz était un générateur d'eau. Et générateur d'eau en grec se dit hydrogène. Cette molécule est très petite donc très légère :  $1 \text{ m}^3$  d'hydrogène gazeux à la pression ambiante pèse 85 grammes donc c'est difficilement utilisable dans une fusée, on préfère le liquéfier à très basse température où dans ces conditions,  $1 \text{ m}^3$  de liquide correspond à 70 kg d'hydrogène, soit presque 1 000 fois plus. Mais pour cela, il a fallu d'abord inventer le procédé pour refroidir l'hydrogène de la température ambiante jusqu'à  $-253 \text{ }^\circ\text{C}$ .

C'est encore un chimiste anglais, James Dewar (**Figure 6**), inventeur de la fameuse bouteille thermos isolée sous vide, qui a trouvé le procédé pour liquéfier cet hydrogène : avec sa bouteille thermos, il a pu ainsi le conserver pendant de longues minutes.

Celui qui démarré la production industrielle d'hydrogène liquide, à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, est Georges Claude (**Figure 7**), un chimiste français diplômé de l'École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielle de Paris (ESPCI). Il avait déjà liquéfié l'air pour séparer l'oxygène de l'azote vers  $-196 \text{ }^\circ\text{C}$ . En descendant la température de l'hydrogène gazeux jusqu'à  $-253 \text{ }^\circ\text{C}$  (20 K), qui est sa température de liquéfaction à la pression ambiante, il a obtenu de l'hydrogène liquide et il en a profité pour fonder une société

qui perdure, la société Air Liquide, aujourd'hui le leader mondial des gaz industriels et médicaux. Cette société génère aujourd'hui un chiffre d'affaires de 20 milliards et emploie près de 70 000 personnes.

## 1.2. L'hydrogène et la conquête de l'espace

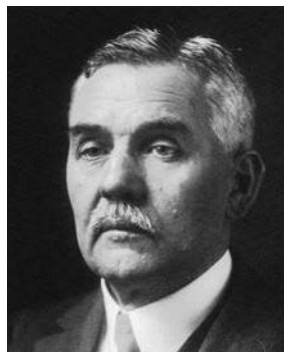
Le spatial est le plus gros consommateur mondial d'hydrogène liquide : la navette spatiale est propulsée par l'hydrogène liquide, de même que la fusée Ariane depuis 1979. La **Figure 8** représente une coupe de la fusée Ariane 5 ECA, qui mesure environ 55 mètres de haut et 5,40 mètres de diamètre. Cette fusée possède dans son premier étage une énorme réserve de 160 tonnes d'oxygène et d'hydrogène liquides, contenus dans des réservoirs de 5,40 mètres de diamètre et 26 mètres de long (**Figure 8A**).

À la base de la fusée, se trouve comme une toute petite bouteille thermos qui contient environ  $1 \text{ m}^3$  d'hélium liquide, encore plus froid, à  $-269 \text{ }^\circ\text{C}$  (4 K). Cet hélium est vaporisé pour pressuriser le réservoir d'oxygène, de manière à bien alimenter les turbopompes du lanceur (**Figure 8B**). Le second étage contient aussi un moteur à hydrogène ; deux réservoirs : un d'hydrogène (**Figure 8C**) et un d'oxygène (**Figure 8D**). Ces réservoirs sont fabriqués par Air Liquide (**Figure 8E**) et sa filiale Cryospace, qui est une joint-venture avec Ariane Group. Plus de 500 réservoirs ont été fabriqués et utilisés sans aucun problème, alors qu'en



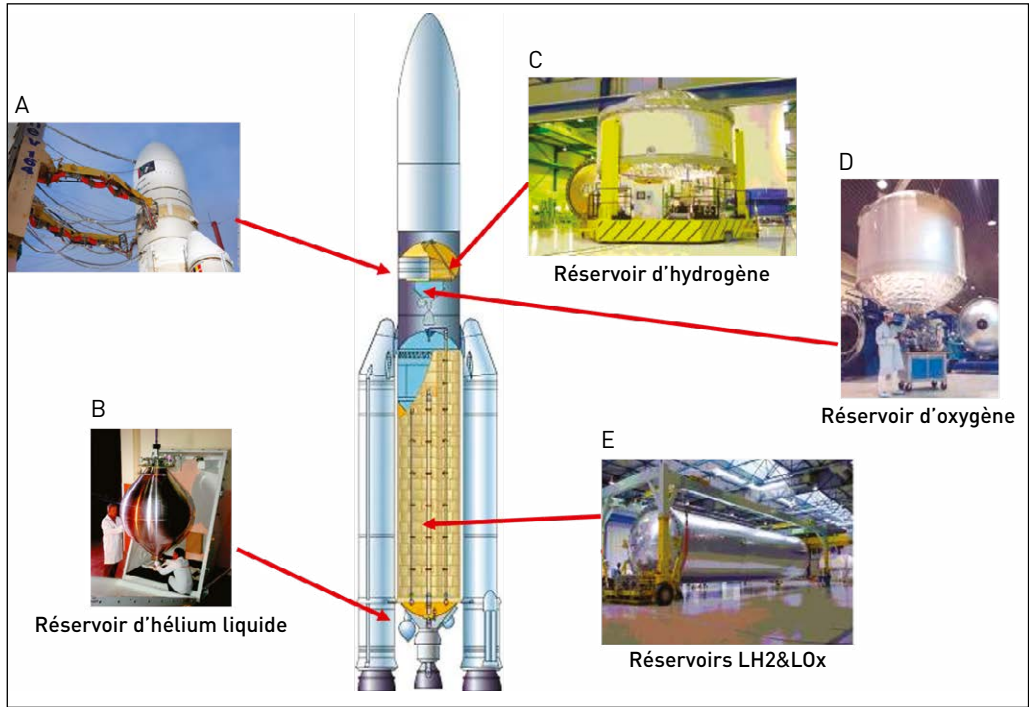
**Figure 6**

James Dewar, inventeur de la bouteille thermos isolée sous vide et du procédé de liquéfaction de l'hydrogène à  $253 \text{ }^\circ\text{C}$  (1898).



**Figure 7**

Georges Claude (1870-1960), inventeur du procédé industriel, diplômé de l'ESPCI et fondateur d'Air Liquide.



**Figure 8**

Plan de coupe de la fusée Ariane 5 ECA. A) réservoirs LH2&LOx au 1<sup>er</sup> étage de la fusée contenant 160 tonnes d'oxygène et d'hydrogène, de 5,40 mètres de diamètre et 26 mètres de long ; B) bouteille thermos à la base de la fusée contenant environ 1 m<sup>3</sup> d'hélium liquide à -269 °C ; C) réservoir d'hydrogène à l'étage supérieur ; D) réservoir d'oxygène à l'étage supérieur ; E) plus de 500 réservoirs ont été fabriqués par Air Liquide et Cryospace.

Source : Air Liquide.

2015 et 2016, deux lanceurs Falcon 9 de la société Space X ont explosé pour un problème de pressurisation du réservoir d'oxygène.

La fusée Ariane 5 ECA (qui n'est pas une bouteille de thermos) est très froide : -253 °C pour l'hydrogène et -183 °C pour l'oxygène. Comme elle est simplement isolée par 2 cm de mousse en polyuréthane, évidemment elle se réchauffe dès que la fusée est remplie 4h avant le vol, et l'hydrogène bout en permanence quand le lanceur est sur le pas de tir. Si un retard de 8 à 10h est anticipé, il vaut mieux vidanger le lanceur pour ne pas se retrouver avec un bloc de glace sur les parois extérieures.

Comme l'hydrogène bout en permanence, il faut évacuer les vapeurs : elles sont

récupérées par des bras ombilicaux pour les brûler dans une piscine loin du pas de tir. Mais en même temps, il faut faire un complément de plein en permanence de sorte qu'au moment de partir il y ait exactement la quantité nécessaire pour alimenter les moteurs du lanceur. Les réservoirs en aluminium sont très fins, environ 1,8 mm d'épaisseur, c'est-à-dire plus fins qu'une bouteille de Coca Cola si on se ramène à la même échelle.

On peut dire que la fusée Ariane 5, tout comme son futur successeur Ariane 6 (Figure 9), est une fusée à eau puisque finalement on éjecte rapidement de la vapeur d'eau à très grande vitesse en combinant oxygène et hydrogène, et qu'elle est gonflée comme un pneu à la pression de 2 à 3 bars.



### 1.3. Le comportement de l'hydrogène liquide en apesanteur

Air Liquide travaille actuellement sur la prochaine génération d'Ariane 6, qui devrait être plus performante et moins coûteuse qu'Ariane 5. Sur Ariane 5, le moteur pousse le lanceur pendant toute la durée du vol, le maintenant ainsi en permanente accélération, ce qui tasse tous les fluides au fond des réservoirs. Tandis que lorsqu'Ariane 6 arrive en orbite de transfert, le moteur est coupé, la fusée effectue alors plusieurs tours en orbite puis le moteur est rallumé au bon moment pour placer le satellite sur la bonne orbite géostationnaire. Ainsi, pendant 4, 5, et jusqu'à 6 heures, l'hydrogène et l'oxygène liquides sont en apesanteur dans des réservoirs qui sont à moitié voire au trois quart vides, et la question est donc de savoir quelles vont en être les conséquences ? Pourra-t-on par exemple rallumer le moteur sans risque

en ne lui fournissant que du liquide, alors qu'un mélange gaz/liquide pourrait le faire exploser ?

Dans la fusée de Tintin, Hergé nous suggère une petite idée, puisqu'il dit que le whisky se met en boule quand on coupe le moteur de la fusée. Et la question que nous a posée Airbus est : est-ce qu'en apesanteur l'hydrogène d'Ariane 6 va aussi se mettre en boule ?

Pour répondre à cette question, nous avons étudié, en partenariat avec le Centre National d'Études Spatiales (CNES), le comportement de l'hydrogène liquide dans le cadre d'un vol parabolique en apesanteur sur une fusée sonde lancée il y a trois ans au nord de la Suède. Au départ, l'accélération est de 15 G au minimum, ensuite la fusée tourne sur elle-même pour se stabiliser comme une toupie afin d'éviter qu'elle parte en travers. Au bout d'environ une minute, le moteur et la rotation de la fusée sont

Figure 9

Ariane 6.

Source : ESA - David Ducros.



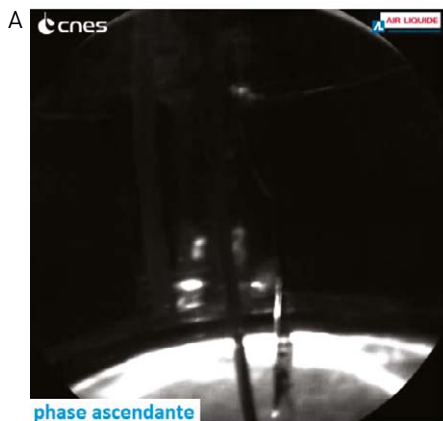
Figure 10

Hergé a représenté le whisky se mettant en boule quand on coupe le moteur. Qu'en est-il du dihydrogène ?

© Hergé/Moulinsart 2018.

Figure 11

A) Réservoir d'hydrogène de chez Air Liquide ; B) l'expérience CryoFénix a permis d'étudier le comportement mécanique de l'hydrogène en apesanteur simulée. En rouge, l'accumulation d'hydrogène au fond du réservoir pendant la phase d'accélération. Des bulles d'hydrogène (en bleu) vont se former en apesanteur.



permet désormais d'envisager de l'utiliser dans l'aéronautique. En effet, l'avion électrique existe déjà. Nous connaissons Solar Impulse (Figure 12A), qui a réalisé le tour du monde avec quatre moteurs électriques dont l'énergie est tirée du Soleil. Nous connaissons aussi l'E-Fan d'Airbus (Figure 12B) (voir le [Chapitre de D. Chapuis](#) dans cet ouvrage *Chimie, aéronautique et espace*, EDP Sciences, 2018), qui est un avion électrique à batterie très silencieux. En 2016, Siemens a aussi construit un avion classique d'acrobatie (Figure 12C) dans lequel le moteur à piston a été remplacé par un moteur électrique révolutionnaire qui fait 330 chevaux mais juste 50 cm de diamètre, 20 cm d'épaisseur et pèse 50 kg, alors qu'un moteur classique ayant la même puissance pèse près de 300 kg et occupe au minimum un volume d'un demi mètre cube. Enfin en 2016, la NASA a présenté un avion à propulsion hydrogène existe déjà à titre expérimental. Par

stoppés, et celle-ci reste en apesanteur tout en continuant à monter dans l'espace jusqu'à 230 km d'altitude. On dispose alors de 6 minutes d'apesanteur parfaite pour étudier ce qui se passe dans le réservoir d'hydrogène, qui est bardé de caméras et de capteurs (Figure 11A). Les résultats montrent que Hergé avait raison, l'hydrogène fait bien des bulles en apesanteur, mais ce sont des bulles de gaz et non pas des bulles de liquide. Cette étude a permis de valider les modèles de simulation des fluides sur lesquels nous travaillons depuis une quinzaine d'années (Figure 11B). Dans la phase d'accélération, l'hydrogène s'accumule au fond du réservoir alors qu'il fait des bulles de gaz en apesanteur. Ce vol CryoFénix du CNES a aussi permis de valider les codes de calculs avec lesquels nous concevons les réservoirs de la fusée Ariane 6.

#### 1.4. L'hydrogène et l'avion électrique

Cette maîtrise de l'hydrogène dans le spatial nous



Figure 12

A) Solar Impulse a fait le tour du monde avec quatre moteurs électriques à énergie solaire. ; B) E-Fan d'Airbus, avion silencieux électrique à batterie ; C) E-330 de Siemens, avion d'acrobatie à moteur électrique de 330 chevaux et miniaturisé ; D) Grease Lightning de la NASA, avion américain hybride (diesel - électrique) ; E) HY4 de DLR, 1<sup>er</sup> avion à hydrogène entièrement électrique dont l'énergie est produite par une pile à combustible.

Sources : A) Solar Impulse ; E) www.dlr.de

exemple, sur la **Figure 12E**, ce sont deux planeurs Pipistrelle qui ont été réunis entre eux par des ingénieurs allemands pour former le HY4 avec au milieu une hélice entraînée par un moteur électrique dont l'énergie est produite par une pile à combustible utilisant l'hydrogène et l'oxygène de l'air. C'est le premier avion à hydrogène entièrement électrique.

La miniaturisation des moteurs électriques autorise absolument toutes les fantaisies ! La NASA, par exemple, développe un programme expérimental d'avion électrique (le LEAP tech Project) multiroteurs, faisant intervenir une dizaine de très petits moteurs que l'on peut mettre aux meilleurs endroits du point de vue aérodynamique (**Figure 13**). L'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA) est aussi très avancé dans l'aérodynamique des avions à propulsion électrique. Un constructeur allemand a aussi réalisé un moto-planeur motorisé avec un petit moteur mis sur l'empennage, ainsi l'hélice est complètement en dehors du sillage de l'avion et l'on gagne 40 % de traînée (**Figure 13C**). Airbus développe un programme (**Figure 13D**) avec d'ici fin 2018 un quadcoptère quatre places, avec

des moteurs électriques de 100 kW fournis par Siemens, capable d'emmener quatre personnes à bord. Chez Air Liquide nous travaillons déjà sur le projet de l'E-Thrust d'Airbus présenté dans le **Chapitre de D. Chapuis**, où l'on a carrément six moteurs de 10 MW qui sont prévus pour l'avenir.

Ces moteurs électriques permettent la réalisation d'architectures extrêmement performantes au niveau aérodynamique offrant ainsi un bien meilleur rendement. Comme les moteurs plus petits sont nombreux, les avions sont aussi beaucoup plus sûrs : si un moteur tombe en panne l'avion peut continuer à voler ; enfin ils sont beaucoup plus silencieux et sans pollution.

L'électricité ne sert pas uniquement à propulser les petits avions mais également à fournir l'énergie à bord des gros avions de ligne (**Chapitre de D. Chapuis**), que ce soit pour les cuisines ou pour l'Auxiliary Power Unit (APU), qui est une turbomachine générant l'électricité nécessaire à bord de l'avion pour l'énergie dite non-propulsive. Pour un Airbus A320, la puissance de l'APU est d'une centaine de kW. En cas de panne totale des moteurs, une petite éolienne de quelques dizaines de

**Figure 13**

A) LEAPTech de la NASA, avion multiroteur comportant une dizaine de moteurs miniaturisés dont les emplacements influent sur l'aérodynamique ; B) EGenius, avion biplace électrique allemand avec un moteur électrique synchrone à aimant permanent ; C) CityAirbus, quadcoptère à quatre places et huit moteurs de 100 kW de Siemens.

Source : A) NASA Graphic ; B) wikipédia, licence cc-by-sa-3.0, Andreas Doerr, C) licence cc-bt-sa-4.0, Marc Lacoste.





kW, qu'on appelle la RAT, se déploie sur le côté de l'avion afin de produire juste l'électricité nécessaire pour les commandes de vol.

Notons que la puissance nécessaire pour propulser un petit avion de quatre places est d'environ 60 à 80 kW. Cela signifie qu'il faut pouvoir stocker environ 0,5 MWh (soit environ 30 kg d'hydrogène ou encore 450 litres de liquide) afin d'assurer une autonomie de vol de 5 à 6 h avec un peu de marges de sécurité.

## 2 L'avenir de la propulsion électrique à l'hydrogène liquide

### 2.1. La pile à combustible

La pile à combustible permet de réaliser la réaction inverse de l'électrolyse de l'eau en combinant l'hydrogène et l'oxygène. Dans l'électrolyse, lorsqu'on plonge deux électrodes dans de l'eau salée, qu'on appelle l'électrolyte, et qu'on fait passer un courant électrique, de l'oxygène se dégage sur une électrode et de l'hydrogène sur l'autre. Dans la pile à combustible<sup>2</sup> (Figure 14), l'eau est remplacée par une membrane<sup>3</sup>, la partie rouge au milieu qui fait office d'électrolyte, une fine

paroi de quelques dizaines de microns d'épaisseurs placée entre deux électrodes, une anode et une cathode, qui sont en général en carbone. L'anode (contenant un catalyseur) est balayée par de l'hydrogène pur (partie bleue), qui perd ses électrons qui partent vers l'anode *via* le circuit électrique. Les protons produits traversent la membrane et se recombinent avec l'oxygène de l'air, qui arrive sur la cathode, en recaptant les électrons du circuit électrique et produisent de l'eau (partie verte). Cette réaction électrochimique génère une tension de 0,7 volt par membrane. Afin d'obtenir 70 volts par exemple, il faut placer cent membranes en série. Ce faisant, on appauvrit l'air en oxygène et à la sortie, on obtient de l'eau, de la chaleur, de l'électricité et de l'azote contenant encore des restes d'oxygène. Le rendement est très bon, entre 45 et 60 %.

Air Liquide sait maintenant fabriquer des piles à oxygène pur travaillant à 60 % d'efficacité, avec lesquelles 1 kg d'hydrogène dans une pile à combustible génère entre 15 et 20 kWh d'électricité.

### 2.2. Le stockage de l'hydrogène liquide

Pour utiliser une pile à hydrogène dans un avion, il faut pouvoir stocker l'hydrogène sous forme gazeuse ou liquide (et parfois solide), l'oxygène pouvant être pris dans l'air. En utilisant la technologie de la petite bouteille thermos (Figure 15A), qui est au pied de la fusée Ariane et dans laquelle on met 145 kg

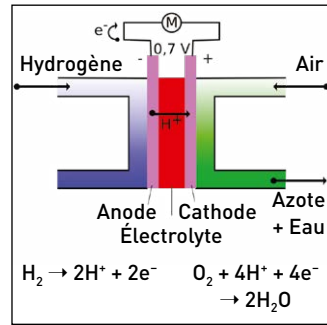
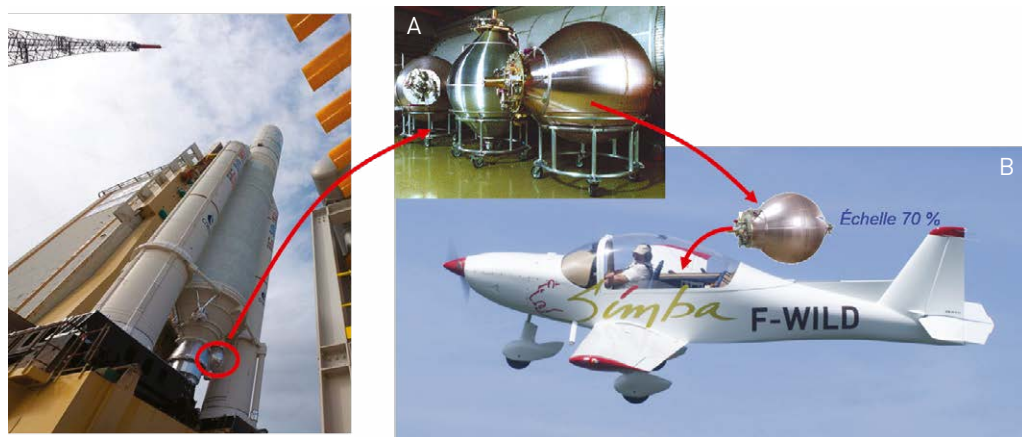


Figure 14

Principe de la pile à combustible : à l'anode, l'hydrogène libère un électron qui traverse le circuit électrique, le proton H<sup>+</sup> alors formé traverse la membrane électrolytique (en rouge) ; à la cathode, le dioxygène de l'air (O<sub>2</sub> + N<sub>2</sub>) réagit avec le proton pour donner de l'eau. La circulation d'électron aboutit à la production d'un courant électrique.

2. Pile à combustible : pile dans laquelle la génération d'une tension électrique se fait grâce à l'oxydation sur une électrode d'un combustible réducteur (par exemple l'hydrogène) couplée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant, tel que l'oxygène de l'air. La réaction produit de l'électricité, de la chaleur et de l'eau.

3. Membrane : paroi fine perméable qui conduit les protons.



**Figure 15**

A) Réservoir d'hélium d'Ariane 5 contenant 145 kg d'hélium liquide et pouvant contenir 84 kg d'hydrogène soit 1,2 MW ; B) Zimba F-WILD : on pourrait envisager de réduire davantage ces réservoirs pour les placer dans des avions huit places.

d'hélium liquide à 4 K, on pourrait, à la place, stocker 84 kg d'hydrogène liquide à 20 K. Ces 84 kg d'hydrogène permettent de produire environ 1,2 MW de puissance mécanique sur l'arbre de l'hélice (en tenant compte des rendements de la pile, du moteur électrique ainsi que des convertisseurs de puissance), et nous avons vu que l'énergie nécessaire pour faire voler un petit avion 5 à 6h est de l'ordre de 0,51 MWh. Air Liquide travaille à diminuer la taille du réservoir et sa forme afin de pouvoir l'utiliser dans un petit avion (Figure 16). Si on réalise le réservoir à l'échelle 0,7, on peut stocker 30 kg d'hydrogène, qui permettent d'alimenter une pile à combustible de 70 kW (qu'on trouve déjà dans l'industrie automobile), qui peut faire voler 6h un avion de quatre places en complète autonomie.

La Figure 16 présente quelques exemples de ce type de réservoir. La Figure 16A est un réservoir cylindrique d'hydrogène liquide pour une voiture de formule 1. Il y a des réservoirs plats (Figure 16B) pour aller dans un coffre mais

ils sont un peu moins efficaces que la sphère (Figure 16C). Il faudra savoir s'adapter à toutes les architectures, notamment si on veut mettre ce type de réservoir dans une aile d'avion.

Comparons les poids d'une chaîne de traction électrique à hydrogène à celui d'une chaîne de propulsion par moteur à combustion interne. Prenons l'exemple de ce petit avion français (Simba) qui a deux réservoirs de 75 l (Figure 17A) pesant à peu près 140 kg une fois plein. Son moteur continental (Figure 17B), qui fait 125 chevaux, pèse 125 kg. Au total, le poids de la chaîne de propulsion de cet avion est de 265 kg pour un volume d'un peu moins d'un demi mètre cube. Si on utilise une pile à hydrogène liquide permettant de voler six heures, pour avoir les mêmes caractéristiques, il faut un réservoir qui fasse 90 cm de diamètre et pèse 130 kg, et stocker 30 kg d'hydrogène à bord (Figure 17C). Il faut ajouter le poids d'une pile à combustible, d'un convertisseur de puissance pour alimenter



Figure 16

Exemples de réservoirs pour le stockage de l'hydrogène liquide : A) réservoir LH2 cylindrique, pour formule 1 ; B) réservoir LH2 plat ; C) réservoirs sphériques.

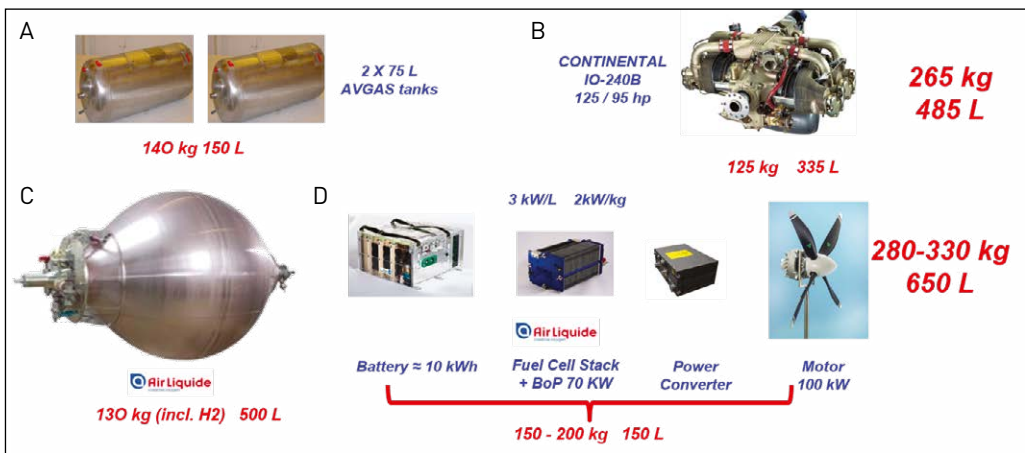


Figure 17

Comparaison des poids des chaînes de traction : A) moteur à combustion interne : deux réservoirs AVGAS de 75 l pesant 140 kg pleins, moteur continental IO-240B de 125 chevaux pesant 125 kg ; B) chaîne de traction électrique à hydrogène liquide : réservoir sphérique de 90 cm de diamètre pesant 130 kg avec 30 kg d'hydrogène, pile à combustible BoP 70 kW, batterie de 10 kWh, convertisseur de puissance et un moteur de 100 kW, le tout pesant entre 280 et 330 kg.

le moteur électrique, et l'ensemble de cette chaîne de traction électrique pèse entre 280 et 330 kg. C'est donc presque comparable à une chaîne de propulsion par moteur à combustion interne (**Figure 17D**).

### 2.3. Les infrastructures et réseaux de distribution de l'hydrogène liquide

Depuis plusieurs années, Air Liquide investit dans les stations de recharge à hydrogène pour les automobiles à pile à combustible. Le marché de l'hydrogène pour l'automobile commence à démarrer : 4 000 Toyota Mirai étaient en circulation en Californie à la fin 2017, alors qu'il n'y en avait aucune au mois de janvier de la même année.

Si le marché se développe, il faudra mettre en place des milliers de stations de recharge en hydrogène et des réseaux de distribution nationaux. Actuellement, ces stations sont ravitaillées avec du gaz qui est ensuite comprimé jusqu'à 700 bars au moment de la recharge de la voiture. Avec le développement prévisible du marché des automobiles à piles à combustible, la taille des stations va s'accroître et il sera alors préférable de les ravitailler avec de l'hydrogène liquide. Beaucoup de sociétés comme Air Liquide prévoient d'investir massivement dans d'énormes usines de liquéfaction d'hydrogène, ce qui veut dire que d'ici cinq à dix ans, l'hydrogène liquide va devenir une commodité. Dès lors, si des avions à hydrogène voient le jour, les aéroports pourront bénéficier de toute

cette infrastructure développée pour l'automobile.

Cependant, quand on laissera l'avion avec son réservoir à hydrogène à moitié vide sur le parking, l'hydrogène liquide continuera à bouillir. Il suffira alors que ces vapeurs d'hydrogène soient envoyées dans la pile à combustible de l'avion pour produire 1 à 2 kW, qui serviront soit à recharger ses batteries, soit à renvoyer de l'électricité vers l'aéroport (en connectant l'avion à une prise de courant comme on le fait pour recharger les batteries d'une voiture électrique). Il n'y aura donc absolument aucun problème de dégazage d'hydrogène dans l'environnement de l'avion.

Les équipes d'Air Liquide travaillent aussi sur la conception des stations d'hydrogène liquide pour les aéroports. La différence avec l'automobile est que l'avion n'ira pas à la station : c'est la station qui devra aller vers l'avion (**Figure 18A**). Sur la **Figure 18B** est présenté un concept de station à hydrogène liquide mobile. Pour remplacer l'APU d'un A320 par exemple, il faudrait environ une cinquantaine de kg d'hydrogène afin d'assurer les 8h de vol quotidiennes, et cela prendrait 5 à 10 minutes au maximum pour faire le plein avec des petits camions.

L'avenir qu'on espère entrevoir pour l'aviation électrique devrait bénéficier maintenant des développements incroyables qui commencent à démarrer dans le domaine de l'automobile.

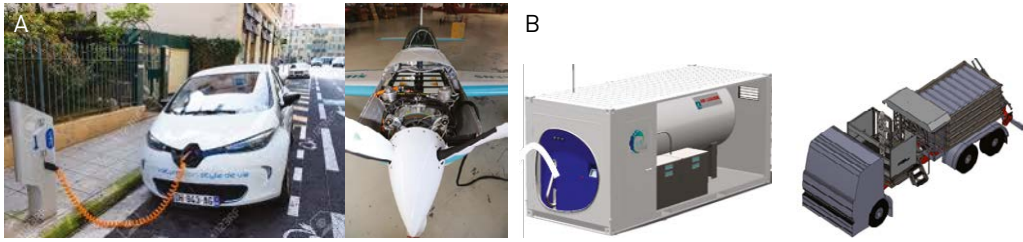


Figure 18

*Distribution de l'hydrogène liquide : A) l'automobile va à la station d'hydrogène liquide mais pas l'avion ; B) concept de station mobile d'hydrogène liquide aéroportuaire d'Air Liquide constitué d'un réservoir transporté par un camion pour effectuer des vols quotidiens de 8 h.*

### 3 Les prémices d'une nouvelle ère

#### La pile à combustible et le stockage de l'énergie solaire

Si on veut retourner sur la Lune dans les prochaines décennies (voir le **Chapitre de R. Bonneville**), fournir l'énergie sur la base spatiale sera fondamental car il faudra y rester non pas quelques jours mais de nombreux mois, voire des années. La seule source d'énergie utilisable est probablement celle du Soleil. Or la Lune tournant autour de la Terre en environ 28 jours en lui présentant toujours la même face, il en résulte que la durée du jour lunaire est de 28 fois celle du jour terrestre, et il en est de même pour la nuit. Dans la journée, il n'y a pas de problème avec l'énergie solaire, mais comment fait-on la nuit pour alimenter une base lunaire pendant vingt-huit fois 12h avec des températures extrêmement basses ?

Les astronomes pensent qu'il y a de l'eau, de l'hydrogène et de l'oxygène sur la Lune. S'il en est ainsi, cela est parfait parce que durant le jour

l'électricité solaire permettra par l'électrolyse de cette eau de produire l'hydrogène et l'oxygène, qui seront stockés (probablement sous forme liquide) en quantité suffisante pour, lorsqu'arrive la nuit, vaporiser cet oxygène et cet hydrogène liquides, et les renvoyer dans la pile à combustible en vue de produire de l'électricité et de la chaleur. Avec  $9 \text{ m}^3$  d'eau, on peut ainsi produire 50 kW non-stop pendant vingt-huit fois 12h, et la ressource sera trouvable sur place. En fait, l'eau tournera en circuit fermé, à chaque cycle jour-nuit lunaire, l'eau se dissocie en oxygène et hydrogène, et la nuit on refait de l'eau et de la chaleur dont on aura besoin.

Les travaux de recherche se développent sur le stockage de l'énergie solaire, que ce soit sur Terre ou dans l'espace. À n'en pas douter, les développements technologiques liés à l'exploration spatiale bénéficieront aux applications terrestres. L'hydrogène est en effet une technologie très prometteuse pour stocker les énergies renouvelables intermittentes, comme le solaire ou l'éolien.

## L'hydrogène liquide : un vecteur d'énergie propre et durable

La chimie du couple oxygène/hydrogène propulse Ariane depuis maintenant près de quarante ans ; l'électrochimie de ce couple commence aussi à propulser les voitures et pourrait bientôt propulser de petits avions, on parle même d'avions régionaux. Pour les avions de ligne, elle servira plutôt à fournir l'énergie à bord. Cette évolution de l'aéronautique bénéficiera des développements que l'on constate dans le secteur de l'automobile, que ce soit en Californie, en Allemagne ou au Japon, et bientôt en France, où les automobiles à pile à combustible (pour lesquelles l'hydrogène est l'élément central de stockage de l'énergie) commencent réellement à arriver.

La société Air Liquide croit beaucoup en cette évolution car il est probable que d'ici quelques années, il sera aussi facile de recharger un avion électrique à hydrogène que de recharger une voiture à pile à combustible comme on le fait aujourd'hui en trois minutes, avec un plein de 6 kg d'hydrogène à 700 bars, permettant de rouler 600 km (**Figure 19**).

Figure 19

*Certaines voitures peuvent déjà être rechargées très facilement à l'hydrogène. D'ici quelques années, les avions pourront sans doute profiter de cette même facilité.*

