LES APPLICATIONS SPATIALES ET AERONAUTIQUES DE L'HYDROGENE

Sommaire

1 – Un peu d'histoire : l'hydrogène et les ballons
2 – L'hydrogène et la propulsion spatiale
3 – L'hydrogène et les systèmes propulsifs d'avions
3.1 – Les GAP (ou APU)
3.2 – La propulsion de petits aéronefs
3.2.1 – UAV (Avions, drones, hélicoptères)
3.2.2 – aéronefs habités

1- Un peu d'histoire : l'hydrogène et les ballons

L'intérêt du monde de l'aéronautique pour l'hydrogène est ancien. A la fin du 18ième siècle, plus précisément en 1782, les frères *de Montgolfier* gonflèrent des petits ballons en papier avec de l'hydrogène pour les voir s'envoler. Mais à cause de la porosité des enveloppes utilisées, ces premières tentatives furent rapidement interrompues et ils remplacèrent l'hydrogène par de l'air chaud : ainsi naquirent les « montgolfières ». Malgré ces déboires, l'année suivante, le physicien Jacques Charles poursuivit ces travaux et, le 1er décembre 1783, décolla du Champ-de-Mars (cf.Fig. 1) avec un ballon gonflé à l'hydrogène et parcourut 35 km. Ce résultat impressionna l'Etat Major des Armées Révolutionnaires qui, en juin 1794, au cours de la bataille de Fleurus, utilisa un ballon captif gonflé à l'hydrogène (baptisé *la charlière,* du nom de son concepteur), pour surveiller les mouvements de l'armée autrichienne qui, grâce à cela, fut vaincue (cf. Fig. 2) : l'hydrogène permit-il de changer le cours de l'histoire de France ?

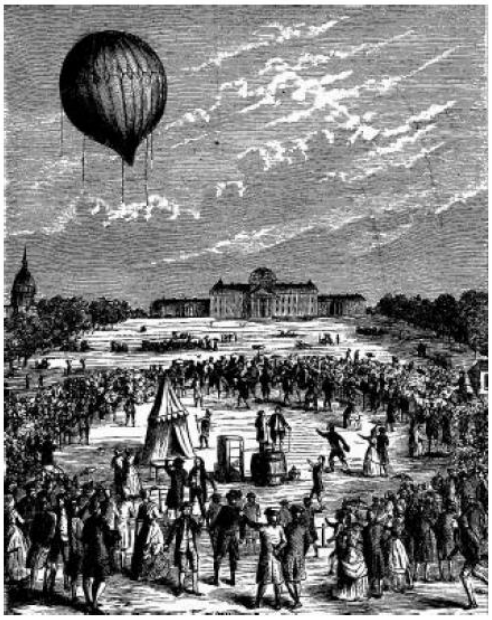

Figure 1 - Première ascension d'un ballon à hydrogène au Champ-de-Mars, en 1783

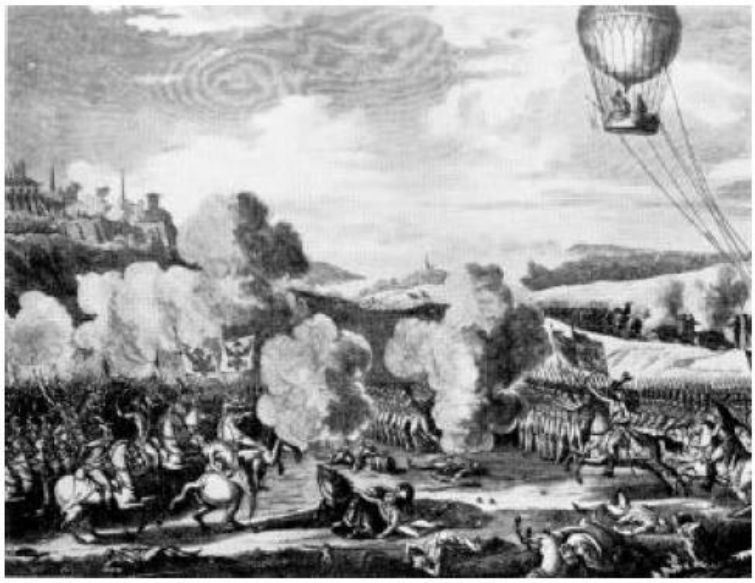

Figure 2 - Première utilisation militaire d'un ballon à hydrogène, à Fleurus (1794)

De nombreuses autres applications militaires suivirent : en 1794 durant le siège de Mayence, et plus tard en 1849 lorsque les autrichiens utilisèrent de tels ballons pour lancer des bombes sur Venise. Après que Napoléon eût supprimé, en 1799, les compagnies françaises d'aérostiers, un établissement aérostier militaire français est recréé à Chalais-Meudon en 1877 et deux ans plus tard, onze unités d'aérostation militaires sont opérationnelles. Ces ballons furent utilisés par les français et les allemands, pour l'observation, jusqu'à la première guerre mondiale. Les applications civiles furent toutes aussi nombreuses, comme en témoigne la publicité ci-dessous, datant de 1893 (cf. Fig. 3).

Figure 3 – Affiche publicitaire

Si les applications militaires disparurent au début du XXème siècle, les applications civiles se poursuivirent. La plus remarquable fut l'aventure des liaisons transatlantiques dans laquelle se lancèrent les allemands, avec le Graf Zeppelin, en 1927. Cette aventure s'arrêta brutalement en 1937, avec la catastrophe de l'Hindenburg à Lakehurst (USA) qui fit 35 morts. Il a été, depuis, prouvé que

cet accident avait été provoqué par l'inflammation du vernis protecteur de l'enveloppe du ballon suite à un coup de foudre subi lors de l'atterrissage et en aucun cas par la nature du gaz qu'elle contenait[1]. Cet accident mit définitivement fin à la carrière des ballons gonflés à l'hydrogène. Toutes les démonstrations qui suivirent furent réalisées avec de l'hélium qui n'était pas disponible au début du XXème siècle, du moins en Europe.

2 – L'hydrogène et la propulsion spatiale

Déjà entrevue par Konstantin Tsiolkovski avant 1920, la combustion cryotechnique, avec de l'oxygène et de l'hydrogène liquides (LOX/LH_2), a commencé à être développée aux Etats-Unis dans les années cinquante. Cela a débouché sur la fabrication du moteur RL 10 en 1959 (poussée 7 tonnes), suivie d'un premier vol réussi en 1963 d'une fusée Atlas Centaur dont l'étage supérieur était propulsé par ce moteur.

Mais, c'est avec le programme *Apollo* de conquête de la lune que le recours à l'hydrogène a pris toute son importance. C'est très probablement ce choix, que n'avaient pas fait les Soviétiques, qui a permis la réussite des Américains. Un faisceau de six de ces moteurs RL 10 permit des essais préliminaires sur l'étage supérieur de la petite fusée Saturn I. Ils furent remplacés, sur Saturn IB, par un seul moteur J-2 de 90 tonnes de poussée, dont l'étude avait été abordée à partir de 1960. Puis, sur la fusée Saturn V, les étages supérieurs fonctionnèrent avec le couple LOX/LH_2, le deuxième étage avec 5 moteurs J-2, le troisième avec un seul. C'est en 1967 que fut réussi le premier vol de Saturn V, pour un premier pas sur la Lune en juillet 1969.

Plus tard, en avril 1981, fut lancée la première navette spatiale (cf. Fig. 4) utilisant pour le décollage deux propulseurs d'accélération à poudre (*solid rocket boosters*) ayant chacun une poussée de 1500 tonnes. La suite du vol était assurée par trois moteurs - d'une poussée unitaire de 200 tonnes - alimentés en hydrogène et oxygène liquides à partir d'un gros réservoir central. La consommation d'hydrogène était de 3 100 litres / seconde, ce qui amena à embarquer 616,5 tonnes d'hydrogène dans un réservoir de 1500 m^3. Les navettes ont terminé leur carrière en juillet 2011, après avoir effectué un total de 135 vols.

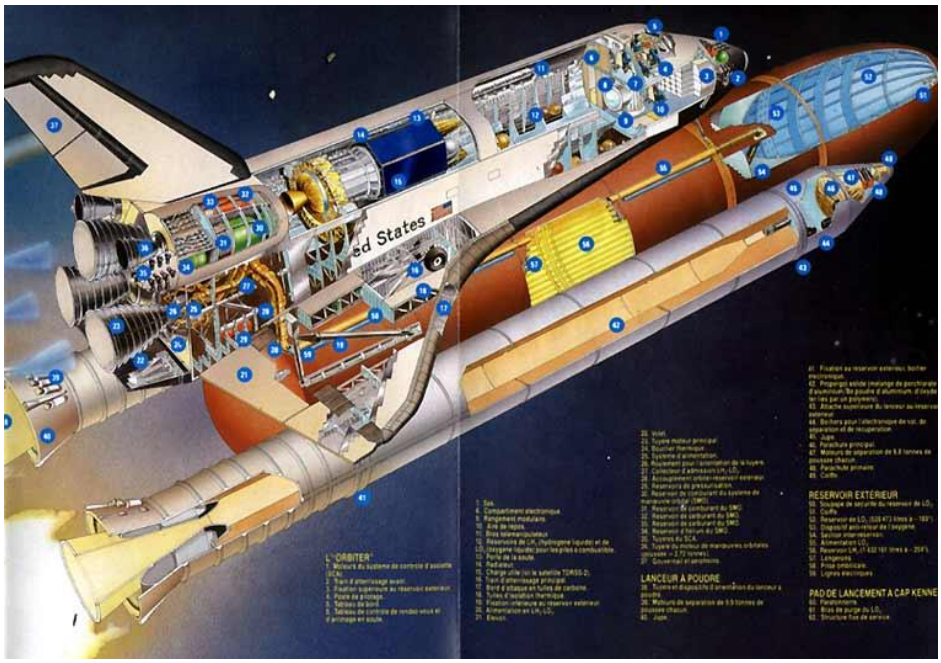

Figure 4 - La navette spatiale US et ses trois moteurs cryotechniques

[1] http://www.airships.net/hindenburg/disaster/myths

Pendant ce temps l'Europe ne restait pas inactive. En France, l'étude de la propulsion cryotechnique a débuté en 1960 avec pour résultat, à l'été 1968, le fonctionnement au banc d'essai d'un moteur expérimental. De son côté, l'Allemagne mettait au point une technique de formage de chambres de combustion qui est toujours utilisée. Cela a permis de doter le lanceur de satellites européen Ariane d'un étage supérieur à hydrogène et oxygène liquides propulsé par un moteur HM7, puis HM7B, de 6 tonnes de poussée. Cet étage, par comparaison à un mode de propulsion classique, a permis d'augmenter de près de 50% la charge utile emportée par les lanceurs successifs: Ariane 1, puis Ariane 2-3 et Ariane 4. Une performance qui explique en grande partie le succès de ce lanceur qui a très vite conquis plus de la moitié du marché mondial.
Aujourd'hui, la conception du nouveau lanceur Ariane 5 est entièrement différente de celle de la famille qui l'a précédée. Un étage principal cryotechnique (EPC), animé par un moteur Vulcain, est "escorté" par un étage d'accélération à poudre (EAP), comme sur la navette américaine. Il consiste en deux gros propulseurs de poussée unitaire 650 tonnes qui entrent en action pendant environ les 2 premières minutes de vol. L'étage principal est surmonté d'un étage supérieur dont la conception était classique à l'origine, mais qui reprend maintenant le moteur HM7B des lanceurs précédents. Ainsi, la version actuelle dénommée Ariane 5 ECA, dont le moteur Vulcain 2 a vu sa poussée portée de 115 à 135 tonnes et qui possède maintenant un étage supérieur à hydrogène, est capable de satelliser 10 tonnes en "orbite de transfert géostationnaire" au lieu de 7 auparavant.
La génération suivante de ces lanceurs, Ariane 6, est l'un des objectifs fixés en 2014 lors de la réunion ministérielle de 20 pays de l'Union Européenne. Ce projet, auquel il a été décidé d'allouer 4 milliards d'euros, était à l'origine en concurrence avec le projet Ariane 5 ME, qui devait utiliser le moteur Vinci pour propulser l'étage supérieur. La configuration d'Ariane 6 est modulaire. A la base un étage principal, doté du moteur Vulcain 2, est flanqué, pendant la traversée de l'atmosphère, par 2 ou par 4 moteurs à poudre analogues au 1er étage du lanceur Véga. On disposera ainsi de deux versions, selon la masse des satellites à lancer. Surmontant l'étage principal, un étage supérieur sera équipé du moteur Vinci. Celui-ci, qui est maintenant développé, a une poussée de 18 tonnes au lieu de 6,5 pour HM7B. Il est doté d'améliorations techniques : cycle « *expander* » plus efficace et divergent de la tuyère en composite réfractaire non refroidi. De plus, ce divergent est replié avant le vol de l'étage supérieur, ce qui autorise un raccourcissement de l'étage intermédiaire et, partant, une diminution de sa masse. Qui plus est, le moteur Vinci est ré-allumable, ce qui permettra de mieux gérer la mise en place des satellites sur leur orbite définitive.
La version Ariane 6.4 (pour 4 moteurs à poudre) pourra emporter au moins 10,5 tonnes ou 2 satellites de 4,5 tonnes pour un coût d'exploitation de 115 millions d'€uros, alors qu'il fallait compter 160 millions avec Ariane 5. Avec Ariane 6.2, on table sur 70 millions. Et afin de réduire les coûts, les groupes Airbus et Safran (le motoriste) se sont engagés à réunir leurs activités au sein d'une co-entreprise : « *Airbus Safran Launchers* ». Le premier vol d'Ariane 6 est prévu en 2023.

Quant au reste du monde, il n'est pas resté insensible à l'intérêt de la propulsion par le couple LOX/LH_2. Ainsi, le Japon a développé le LE-5 (classe 10 tonnes) et le LE-7 (classe 100 tonnes), ainsi que des versions améliorées de ces moteurs, pour ses lanceurs H1, H2, H2A et H2B. La Russie, pour lancer sa Navette Bourane, avait développé le lanceur Energya dont l'étage principal possédait 4 moteurs RD-0120, de poussée unitaire 145 tonnes, à hydrogène et oxygène liquides. De son côté, la Chine utilise un moteur YF-77 à hydrogène liquide et oxygène liquide pour l'étage supérieur de son lanceur "Longue Marche 5". Enfin, l'Inde développe son lanceur GSLV (*Geosynchronous Satellite Launch Vehicle*) dont le dernier étage est propulsé par un moteur-fusée consommant un mélange cryogénique d'hydrogène et d'oxygène liquide. Ce lanceur a d'abord été équipé d'un étage cryogénique acheté à la Russie (version Mk-I premier vol en 2001) avant que l'Inde dispose de son propre étage cryogénique réalisé sous la pression des États-Unis inquiète de la diffusion de cette technologie (version Mk-II premier vol en 2010). La mise au point fut difficile avec seulement deux lancements complètement réussis sur les sept premières tentatives. D'une masse d'environ 400 tonnes, Mk-II peut placer une charge de 2,35 tonnes sur une orbite de transfert géostationnaire. Une nouvelle version Mk-III à l'architecture complètement différente a été développée: le 5 juin 2017, la GSLV MkIII (43 m de haut, 640 tonnes, moteur cryotechnique hydrogène-oxygène) a mis sur orbite un satellite de télécommunications de plus de 3 tonnes.
A noter qu'en ce qui concerne les USA, c'est le lanceur SLS (*Space Launch System*) qui a été retenu pour les prochaines missions vers la lune prévues à partir de la fin 2023, dans le cadre du projet ARTEMIS. Il utilise de l'hydrogène liquide.

3 – L'hydrogène et les systèmes propulsifs d'avions

L'idée d'utiliser de l'hydrogène dans une turbine aéronautique pour la propulsion d'avions apparut au début des années 1950. Les développements qui ont suivi sont détaillés dans la fiche 5.1.2. Divers prototypes ont fait l'objet d'essais et c'est aujourd'hui, en 2023, que deux prototypes (voir plus bas) ont effectué leur premier vol démontrant ainsi la faisabilité de ce mode de propulsion. Cette propulsion à l'hydrogène, si elle n'émet pas de CO_2, rejette de la vapeur d'eau en quantité importante. En effet, à énergie propulsive équivalente, un moteur alimenté en hydrogène (H_2) consomme davantage d'atomes d'hydrogène qu'un réacteur alimenté en kérosène (de formule chimique comprise entre $C_{10}H_{22}$ et $C_{14}H_{30}$) et par conséquent va produire davantage de molécules d'eau. Or l'eau est également un gaz à effet de serre qui, s'il a une durée de vie plus courte que celle du CO_2, présente l'inconvénient d'augmenter la traînée visible derrière les avions et de multiplier les voiles d'altitude diminuant l'ensoleillement au sol**.**

Aujourd'hui en 2023, la propulsion d'aéronefs à hydrogène fait l'objet de plusieurs développements soit via la pile à combustible, soit via l'alimentation de moteurs thermiques.
Par ailleurs se développent les *Générateurs Auxiliaires de Puissance*, ou GAP (APU en anglais pour *Auxiliary Power Unit*).

3.1 – Les GAP (ou APU)

3.1.1 - **Airbus** et **Boeing** avaient décidé, en mai 2006, de collaborer pour le développement de ce type de générateur électrique à pile à combustible qui pourrait remplacer les petits réacteurs auxiliaires particulièrement bruyants et polluants qui, actuellement, assurent les besoins en électricité des avions au sol. Boeing a débuté ses travaux sur la pile à combustible en 2003, dans son Centre de recherches de Madrid. De son côté, Airbus avait développé un démonstrateur sur la base d'une technologie de pile à combustible de *General Electric*, qui a été validé sur un Airbus A 320, en octobre 2007 (projet **ELBASYS**). Un GAP de même nature a été testé avec succès en vol sur l'Airbus A320 expérimental **ATRA** du DLR (Agence aérospatiale allemande) en mars 2008. Les piles à combustible (*Intelligent Energy*), montées par *Michelin*, délivraient une puissance électrique de 20kW et pouvaient prendre en charge, pendant une heure, les besoins énergétiques du système de pompe hydraulique permettant ainsi de garder le contrôle de l'appareil en cas de panne des réacteurs et donc du système de production d'électricité à bord. Airbus a installé une pile de 90 kW à bord d'un A320 appartenant au *German Aerospace Center*. Elle pouvait assurer divers services à bord, hors propulsion. De plus, la pile à combustible produit de l'eau, ce qui permet d'en limiter la quantité embarquée à bord (actuellement de l'ordre de 1500 litres). Des tests ont été réalisés courant 2015.

Le DLR (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*) (cf remarque ci-dessus) avait expérimenté en 2011, sur son Airbus A320 ATRA, un train-avant équipé d'un moteur électrique alimenté par une pile à combustible, permettant le déplacement de l'avion au sol sans l'aide des réacteurs. Un tel système permettrait de réduire les émissions du roulage au sol de 20%, d'économiser 200 à 400 litres de kérosène par jour, de réduire de 1200 h/an le temps de fonctionnement des réacteurs (et donc de réduire le coût de maintenance) et de réduire le bruit de 100%. Ces travaux, débutés en 2008 dans le cadre du projet allemande **LuFo IV**, sont menés en collaboration avec *Airbus* et *Lufthansa*. La figure 5 montre le système d'alimentation avec sa pile et son réservoir d'hydrogène sous pression et le moteur électrique couplé à la roue.

3.1.2 - Les sociétés *IHI* et *IHI Aerospace* avaient annoncé avoir effectué, en octobre 2012, un vol d'un Boeing 737 équipé d'une pile à combustible comme APU. Le vol, qui a duré 5 heures, s'est déroulé autour de Seattle. Aucune autre information n'a été donnée depuis cette date ce qui peut laisser penser que ce projet a été abandonné.

Figure 5 – Le système d'alimentation et le train-avant de l'Airbus ATRA (2011)

3.1.3 - La société *Zodiac Aerospace* a annoncé, en juin 2013, qu'elle coordonnait le projet européen (FCH-JU) HYCARUS[2] (Hydrogen Cells for AiRborne USage) destiné au développement d'un APU à pile à combustible PEM pour l'aviation civile. Les partenaires sont: CEA, Dassault Aviation, Air Liquide, INTA, JRC-IET et ARTTIC. Le projet s'est achevé à la mi-2018.

3.1.4 - La société *Airbus* et le *NAC* (National Aerospace Centre - Centre national de recherche aérospatiale de l'Afrique du Sud) ont annoncé, en septembre 2014, avoir signé un accord pour financer conjointement des recherches sur les piles à combustible pour avions de ligne, et qui seraient menées par *HySA Systems Competence Centre*[3] (Le centre de compétence sud-africain sur l'hydrogène).

3.1.5 - En février 2016, la compagnie low-cost *EasyJet* a déclaré s'intéresser à la pile à combustible pour diminuer sa consommation de combustible lors du roulage au sol; elle avait prévu des tests en 2016 (projet labellisé en Occitanie). En septembre 2017, la compagnie a dit s'intéresser à un remorqueur d'avion au sol à pile à combustible.

3.1.6 – En novembre 2017, *Safran Power Units* annonce qu'elle développe une pile à combustible dans le cadre du projet **PIPAA** (pour PIle à combustible Pour Applications Aéronautiques). Ce projet vise à développer et qualifier un système de pile à combustible pour l'alimentation électrique de systèmes d'avions, notamment les solutions de taxiage électrique. Ce projet entre dans le Programme d'Investissements d'Avenir, piloté par le Commissariat Général à l'Investissement (CGI) et opéré par Bpifrance, dans le cadre de l'appel à projets "Projets de R&D Structurants Pour la Compétitivité",

3.1.7 – En juin 2018, *Liebherr Aerospace* et *General Motors* avaient annoncé le développement d'un GAP à pile à combustible pour avions.

3.2 – La propulsion de petits aéronefs

Les divers projets identifiés sont des avions à hélices fonctionnant à l'hydrogène, qui alimente soit un turboréacteur, soit un moteur thermique, soit un ensemble pile à combustible-moteur électrique.

3.2.1 - Aéronefs non habités et drones (UAV – Unmanned Air Vehicle)

De très nombreux projets ont vu le jour depuis 2005. La plupart de ceux qui ont abouti à un prototype n'ont pas connu de suite. Les principaux ont été, ou sont, les suivants:

[2] http://hycarus.eu/
[3] http://www.hysasystems.com/programmes

- En mai 2005, La société *AeroVironment* a fait voler un engin baptisé **Global Observer** (15 m d'envergure) alimenté par une pile à combustible. Il était destiné à voler à haute altitude (65 000 pieds - 20 000 m) pendant une semaine.
  En août 2010, une nouvelle version du **Global Observer**, propulsé par des moteurs thermiques à combustion interne, a effectué son premier vol. Il était destiné à voler de 5 à 7 jours à une altitude de 17 500 à 20 000 m avec une charge utile de l'ordre de 200 kg. Ses moteurs étaient hybridés avec une batterie. L'hydrogène était stocké à bord sous forme liquide. La première phase de tests en vol s'est achevée en octobre 2010. Après un crash en avril 2011, le Pentagone a décidé, en décembre 2012, d'arrêter ce projet.

- La société israélienne *BlueBird Aero Systems* a présenté au Salon du Bourget, en 2009, un drone baptisé **Boomerang UAV** (cf. Fig. 6) alimenté par une pile à combustible. Dans sa dernière version il peut transporter une charge utile de 1,3 kg et a une autonomie de 15h de vol. Il peut voler à 15 000 pieds (4 570m). La pile à combustible, fournie par *Horizon Fuel Cell Technologies*, est alimentée à partir d'un réservoir d'hydrogène sous pression. En novembre 2010, l'Afrique du Sud a signé un contrat d'achat du Boomerang.

Nota: Aucune information depuis février 2015. Mais la compagnie avait annoncé en 2017 qu'elle embauchait.

Figure 6 - Le prototype Boomerang (2009)

- Le *US Naval Research Laboratory* (NRL), qui a débuté ses recherches sur les UAV à pile à combustible en 2005, a fait voler pendant 6 heures, le 2 juin 2009, un engin expérimental (UAS) à pile à combustible baptisé **XFC** (*eXperimental Fuel Cell*) (cf. Fig. 7). Ce prototype, équipé d'une pile Protonex, est destiné à être utilisé comme plateforme technologique volante discrète (absence de bruit et de signature thermique) volant entre 30 et 50 nœuds avec une autonomie de l'ordre de 6 heures. En décembre 2013, le NRL annonce avoir réussi le lancement d'un XFC à partir d'un sous-marin en immersion.

- Le *US Naval Research Laboratory* (NRL) a fait voler pendant 23 heures, le 8 octobre 2009, un prototype d'UAV à pile à combustible *Protonex* de 550 W, baptisé "**Ion Tiger**" (cf. Fig. 8). Il pesait environ 15kg et avait une charge utile de l'ordre de 2kg. Il était équipé d'un réservoir d'hydrogène sous pression (350 bars). En avril 2013, équipé d'un réservoir d'hydrogène liquide, il a volé 48 heures. Des vols d'essai sont signalés en décembre 2016 avec une pile à combustible de 5kW.

Figure 7 - Le prototype XFC de NRL (2009)

Figure 8 – L'UAV Ion Tiger de NRL (2009)

- En août 2010, **Boeing** annonce qu'il a développé un avion de surveillance haute altitude (65 000 pieds - 20 000 m) et baptisé **Phantom Eye** (cf. Fig. 9) qui devrait –dans sa version future- avoir une autonomie de vol de 7 jours et une charge utile d'une tonne. Son envergure est les trois-quarts de celle d'un Boeing 747. Ce type d'avion est baptisé **HALE** (*High Altitude Long Endurance*). Il est propulsé par deux moteurs thermiques turbo de 150 CV fabriqués par Ford et modifiés pour être alimentés en hydrogène. L'hydrogène (860 kg) est stocké à bord sous forme liquide. (1er vol le 1er juin 2012).
  Nota: Boeing a évoqué son existence en 2016 mais aucune autre information n'avait été publiée après 2022: projet abandonné?

Figure 9 - UAV HALE Phantom Eye de Boeing (2010)

- Israël (*IAI Israel Aerospace Industries*) a annoncé, en février 2010, qu'il développait, avec *Cella Energy*, un UAV baptisé **Bird Eye 650** (cf. Fig. 10) équipé d'une pile *Horizon Energy Systems* type Aeropak de 200 W, hybridée avec une batterie Li-ion, d'une autonomie de 6 heures de vol. L'hydrogène est stocké dans un hydrure. La charge utile est de 1,2 kg. Cet UAV a effectué son premier vol au début 2012. En août 2015, IAI confirmait que les développements se poursuivaient.
- *Nota: aucune autre information fournie depuis: projet abandonné? ... bien que cette compagnie poursuit le développement d'UAV plus traditionnels (HERON)*

Figure 10 - UAV Bird Eye 650 (2010)

- En avril 2012, *Wash-Insitu* (filiale de *Boeing Company*) en collaboration avec le *NRL* (Naval Research Lab.) et *UTC* (United Technologies) a annoncé le premier vol de son **ScanEagle**[4] UAS (Unmanned Aerial System) (cf. Fig. 11) qui a duré 2,5 h. D'une longueur de 1,55m et d'une envergure de 3,11m, il peut embarquer une charge de 22kg. Il était équipé d'une pile à hydrogène de 1 500 W et peut voler jusqu'à une altitude de 6 000 m avec une autonomie de

[4] https://insitu.com/information-delivery/unmanned-systems/scaneagle/capabilities#3

24h. En avril 2016, on apprenait qu'une nouvelle pile avait été fournie par *Protonex* (filiale de *Ballard*). Un vol était prévu mi-2016 mais aucune information n'a été donnée.

Nota: la société INSITU poursuit le développement d'UAVs mais il n'est pas possible de savoir si elle met toujours en oeuvre une pile à combustible. Projet abandonné?

Figure 11 - ScanEagle UAS (2012)

- En janvier 2013, l'Université de Tongji, en Chine, a annoncé le premier vol d'un UAV alimenté par une pile à hydrogène et baptisé "**Feiyue-1**" (cf. Fig. 12). Il a une envergure de 15m et pèse 20kg. Son autonomie est de 2 heures.

Nota: aucune information parue depuis: projet abandonné?

Figure 12 - "Feiyue-1" (2013)

- En février 2015, le KIMS (Korea Institute of Materials Science) a annoncé le premier vol de 80 minutes d'un UAV à pile à hydrogène et baptisé "White Condor" (cf. Fig. 13). *Projet abandonné?*

- En octobre 2015, la société sud-africaine *FlyH2 Aerospace* a dévoilé son prototype UAV (cf. Fig. 14) baptisé **UA Alpha Drone**, équipé d'une pile développée par l'Université de Cape Town. Applications civiles. Autonomie de 9 heures. En juin 2017, Protonex (pile Ballard) annonce la livraison d'une pile à combustible.

- En novembre 2016, la compagnie *H3 Dynamics* (Singapour et USA) a présenté le drone **HYWINGS** (cf. Fig. 15) dont l'autonomie de vol serait d'une dizaine d'heures. Son poids au décollage est voisin de 7kg.

Figure 13 - "White Condor" de KIMS - Corée du Sud (2015)

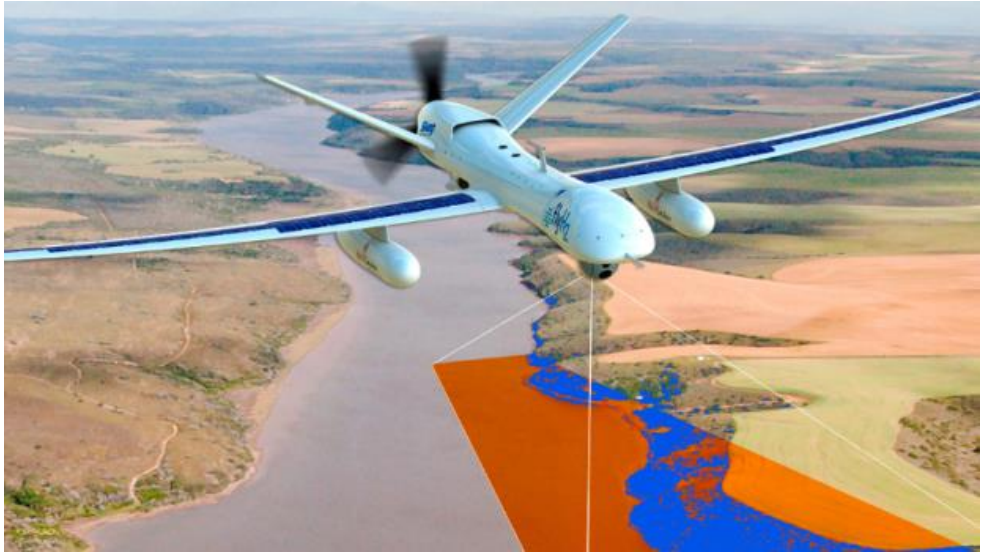

Figure 14 - Le UAV de FlyH2 Aerospace - Afrique du Sud (2015)

Figure 15 - Le UAV HyWings de *H3 Dynamics* (Singapour - USA) (2016)

- en juin 2017**,** *Wirth Research* (Royaume-Uni) présente un UAV, baptisé **OUTRIDER** (Fig. 16), développé en collaboration avec *Lockheed Martin UK's* qui est original dans la mesure où il décolle et atterrit verticalement. La pile est fournie par HES (Singapour).

Figure 16 - OUTRIDER de Wirth Research (2017)

- En novembre 2017, un institut coréen annonce avoir développé un UAV équipé d'une pile à combustible de 600 W et d'une batterie, capable de voler plus de 4 heures (cf. Fig. 17)

Figure 17 - Le prototype d'UAV coréen (2017)

- En mars 2019, la société *Commercial Aircraft Corp of China* (**COMAC**) a fait voler un démonstrateur à pile à combustible de chez *Lingque-H* (cf. Fig. 18).

Figure 18 – Le prototype COMAC (2019)

Les drones UAV multi-rotor

- En mars 2015, la société canadienne *EnergyOr Technologies Inc*. a présenté le premier drone multi rotor à pile à combustible (cf. Fig. 19); il a volé plus de 2 heures. En fin 2015, elle a présenté le **H2Quad 400**. En avril 2016, cette compagnie a présenté le modèle **H2Quad 1000** qui peut embarquer une charge de 1 kg puis a signé un Joint Development Agreement (JDA) avec le *Centre d' Expertise Aérienne Militaire (CEAM)* de l'Armée de l'Air française, avec qui des tests ont été réalisés. En janvier 2017, un exemplaire a été livré au CEAM pour une deuxième phase de développement.

- en mai 2015, la compagnie *Horizon Energy Systems* (Singapour) a présenté son quadricoptère baptisé "**Hycopter**" (cf. Fig. 19), équipé d'une pile à combustible à hydrogène. Il a une autonomie de vol de 4 heures et peut embarquer une charge de 1 kg. En novembre 2018, *HES Energy Systems,* société basée à Singapour, annonce la commercialisation du **HYCOPTER**, drone multi-rotor à hydrogène (cf. Fig. 27). Il a une autonomie de vol de 3 heures, à comparer avec 20-30 mn s'il était équipé d'une batterie Li. Il est conçu pour des missions de maintenance.

Figure 19 - l'UAV multi-rotor de *EnergyOr Technologies Inc - Canada* (2015)

Figure 20 - le Hycopter de *Horizon Energy Systems* (2015)

- En avril 2016, la compagnie chinoise *Micro Multi Copters Aero Technology Co., Inc. (MMC),* a dévoilé son **HyDrone 1800** à pile à combustible, d'une autonomie de 4 heures de vol (cf. Fig. 21). L'hydrogène embarqué est stocké à 300 bars.

Figure 21 - HyDrone 1800 de MMC - Chine (2016)

- En avril 2016, la compagnie russe *NELK* a présenté un drone à pile à combustible (cf. Fig. 22) de 1,3 kW, en tests depuis mars 2015. Il pèse 12 kg et son autonomie de vol a atteint 3h et 10 minutes. Il embarque une charge de 0,5 kg.

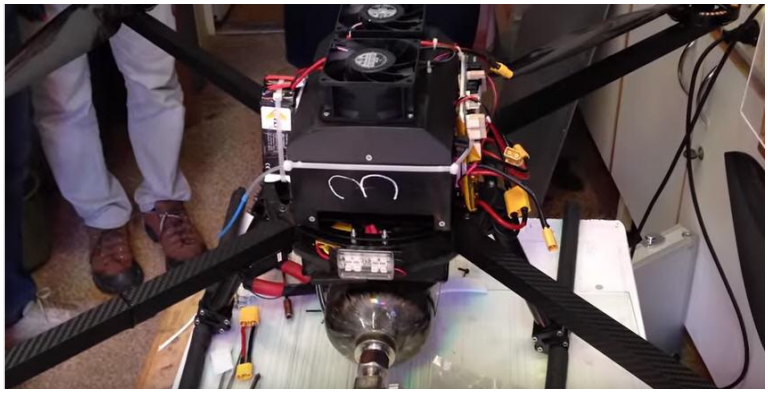

Figure 22 - Le prototype de *NELK* - Russie (2016)

- En juillet 2016, les *Russian Aerospace Forces* ont annoncé avoir testé plusieurs drones multi rotor à pile à combustible en Syrie (cf. Fig. 23)

Figure 23 - Test d'un drone multi rotor par les russes - (2016)

- En septembre 2016, la compagnie britannique *Intelligent Energy* a présenté un drone à pile à combustible multi rotor (cf. Fig. 24). En septembre 2017, en collaboration avec la start-up californienne *FlightWave*, a été présenté le drone UAS **Jupiter-H2** équipé d'une pile de 650 W.

Figure 24 - Drone *Intelligent Energy* - UK (2016)

En janvier 2019 une version améliorée a été présentée, capable de porter une charge de 5 kg pendant 70 minutes, dans le cadre du projet britannique RACHEL. L'hydrogène est stocké à 300 bars.

- En février 2018, trois start-up françaises ont annoncé leur accord pour concevoir des drones à hydrogène dans le cadre d'une alliance entre la France et Singapour. Il s'agit d'*ERGOSUP* (concepteur et fabricant d'électrolyseurs haute pression), *Ad-Venta* (stockage d'hydrogène) et *Airborne Concept* (concepteur de drones). Ces sociétés forment le consortium **FLY-HY** avec *HES Energy Systems* (filiale de H3 Dynamics), qui produit des piles à combustible ultra légères à Singapour. Dans le cadre de ce consortium, le prototype de démonstration sera développé avec le fabricant français de drones DELAIR. Cela permettra de faire le lien avec le métaprojet **HyDRONE** en Occitanie, labellisé suite à l'appel à projets « Territoires hydrogène » en 2016.

- En août 2018, *BSHARK* (Road Town, Tortola, British Virgin Island) annonce la commercialisation du drone à hydrogène **Narwhal 2** (cf. Fig. 25) pour un prix de 8 000 $. Un mois plus tard il avait déjà été l'objet de 300 commandes.

Figure 25 – Le drone hydrogène Narwhal (2018)

- En septembre 2018, la société sud-coréenne *Doosan* a présenté un drone hydrogène (cf. Fig. 26) dont l'autonomie de vol est de deux heures. Sa charge utile atteint 5 kg.
  En mars 2019, *Doosan Mobility* et *KEPCO* ont signé un accord de collaboration sur les drones à pile à combustible.

Figure 26 – Le drone UAV de Doosan (2018)

- En 2018, *HES Energy Systems* annonce le lancement commercial du **HYCOPTER** (cf. Fig. 27) qui a une autonomie de 2,5 heures.
-

Figure 27 – Le drone HYCOPTER (2018)

- En décembre 2018, **Skycorp** (Estonie) présente son drone à hydrogène (cf. Fig. 28) doté d'une intelligence artificielle. Son autonomie serait trois fois supérieure à celle du même appareil équipé d'une batterie Li.

Figure 28 – Le drone Skycorp (2018)

- En avril 2019, **Intellligent Energy** présente un prototype équipé d'une pile à combustible de 2,4 kW (Figure 29). Il suit le précédent équipé d'une pile de 800 W présenté 8 mois plus tôt et qui avait réussi un vol de plus de 12 heures, le précédent record étant de 2 heures et 6 minutes.

Figure 29 – Le drone Intelligent Energy (2019)

- En avril 2019, *Ballard* présente un modèle à 6 rotors en cours de tests (cf. Fig. 30) et baptisé **FCair.**

Figure 30 – le drone Ballard (2019)

- En septembre 2019, *ISS Aerospace* présente son drone UAV à hydrogène **Sensus** (cf. Fig. 31). D'un poids de 7kg et d'une autonomie de 120 minutes, il est équipé d'une pile *Intelligent Energy*.

Figure 31 – Sensus - AUV de ISS Aerospace (2019)

- En septembre 2019, le chinois *MMC* a présenté son UAV **Griflion H** d'une autonomie de vol de 15 heures sans charge et de 10 heures avec une charge de 3 kg..

Figure 32 – Le Griflion de MMC (Chine) (2019)

<u>Les hélicoptères UAV</u>

- En septembre 2018, *Thunder Tiger* (Taiwan) présente sa nouvelle innovation l'hélicoptère **HXC2** à pile à combustible (cf. Fig. 33). Il est équipé d'une pile de 6 kW. Ce type d'UAV permet d'embarquer une charge plus importante que celle accessible aux drones.

Figure 33 – Hélicoptère à hydrogène HXC2 (2018)

3.2.2 - Avions habités

- Le projet européen (6ième PCRD) baptisé « **Enfica-FC** » avait démarré en octobre 2006. Il avait pour objectif le développement d'un avion de deux places (baptisé **Rapid 200 FC**) (cf. Fig. 34) alimenté par une pile à combustible de 20 kW, hybridée ave une batterie Li-polymère de 20 kW pour le décollage et capable de voler une heure grâce à une réserve d'hydrogène de 1,5 kg stocké à 350 bars. La pile était fournie par *Intelligent Energy. L*'israélien *Israel Aerospace Industries* participait aussi à ce projet. Des essais au sol se sont déroulés avec succès en décembre 2009. Le premier vol a été effectué le 20 mai 2010 à Reggio Emilia, en Italie.
  Nota: aucune suite ne semble avoir été donnée à la réalisation de ce concept.

Figure 34 - Le prototype Rapid 200 FC (2010)

- En septembre 2008, l'Institut allemand **DLR** a présenté le premier avion habité capable de décoller avec, pour seule source d'énergie, une pile à combustible (cellules PEM BASF haute température assemblées par une société danoise). Il est baptisé **Antares DLR-H2** (cf. Fig. 35). La pile à combustible (24 kW) est de même type que celle utilisée par le DLR pour l'APU qui a équipé un airbus A320 (voir plus haut). Le premier vol a été effectué le 7 juillet 2009 depuis l'aéroport de Hambourg. Son autonomie était de 5h de vol (750 km). Le rendement global de la chaine énergétique, du réservoir à l'hélice, était voisin de 44%. Les essais se sont poursuivis et en

novembre 2013, il a été équipé d'une pile plus puissante. Dès août 2010, le DLR, en collaboration avec *Lange Research Aircraft GmbH,* a démarré le développement de la version **Antares H3** dont l'autonomie devait passer à 500 km mais ce projet a été abandonné.

En lieu et place, un nouveau projet a été lancé par le DLR et a abouti, en octobre 2015, à la présentation d'un concept baptisé **HY4** (cf. Fig. 36), le nombre 4 pour 4 passagers. Il était équipé d'une batterie Li et d'une pile à combustible fournie par *Hydrogenics* qui alimentent un moteur électrique de 80 kW. Il vole à 145 km/h max et a une autonomie qui dépend des conditions de vol mais s'établit entre 750 et 1500km. Son poids max. est de 1500 kg. Ce projet est cofinancé dans le cadre du programme allemand NIP (*German* National Innovation *Programme* for Hydrogen and Fuel Cell Technology). Il a effectué son premier vol le 29 septembre 2016.
Nota: aucune information n'a été diffusée depuis la fin 2016. Projet abandonné?

Figure 35 - Le prototype DLR Antares H2 (2009)

Figure 36 - Le prototype DLR HY4 (2016)

- En mars 2018, la compagnie allemande *Lange Research* a donné des informations sur son projet **Antares E2** (cf. Fig. 37)**,** avion à pile à combustible destiné à la surveillance, qui pourrait parcourir 6 000 km avec une autonomie de 40 heures, ainsi que sur son projet **Antares H3**, avion monoplace d'une envergure de 23m, d'un poids de 1,650 kg incluant une charge utile de 200 kg et une autonomie de 40 heures. Il embarquerait une pile HT PEM et un reformeur de méthanol. Il a été développé dans la cadre du NIP.

Figure 37 – Le prototype Antares E2 (2018)

- En octobre 2018, *HES Energy Systems*, entreprise de Singapour, a dévoilé son projet d'avion électrique à pile à combustible hydrogène (cf. Fig. 38), baptisé **Element One** et capable de transporter 4 passagers. Les premiers vols sont prévus en 2025.

Figure 38 – Le prototype Element One de *HES Energy Systems* (2018)

- En mai 2019, la NASA annonce le développement, par l'Université d'Illinois, d'un avion tout électrique équipé d'un réservoir d'hydrogène liquide (cf. Fig. 39) alimentant des piles à combustible.

Figure 39 – Projet NASA – Université d'Illinois (2019)

- En février 2020, la société *ZeroAvia* annonce qu'elle a réalisé, en mars 2019, les premiers tests en vol d'un Piper Matrix 6 places en Grande Bretagne dans le cadre du programme **HyFlyer** (cf. Fig. 40). Il était équipé de piles à combustible *Intelligent Energy* alimentées par un réservoir d'hydrogène gazeux.

Figure 40 – Le HyFlyer (2019)

- En février 2023, *ZeroAvia* annonce avoir réussi, en janvier 2023, le premier test en vol d'un appareil 19 places (cf. Fig. 41) équipé d'un générateur de 600 kW et d'un réservoir d'hydrogène gazeux donnant une autonomie de 900 km.

Figure 41 – le prototype ZeroAvia de 19 places (2023)

- En mars 2023, un avion régional de 40 places (cf. Fig. 42) équipé de piles à combustible ProGen de *Plug Power*, a réussi son premier vol de 15 minutes aux USA (aéroport de Grant County, état de Washington). Ce vol a été le fruit d'une collaboration avec *Universal Hydrogen*.

Figure 42 – Premier test en vol d'un avion régional de 40 places (2023)

- En mars 2023, la société chinoise *Lianoning Ruixiang Aircraft* a réalisé son premier vol de démonstration avec le RX4HE, un petit avion de 4 places à moteur à combustion hydrogène de 2 litres du constructeur automobile FAW. Il embarquait 4,5 kg d'hydrogène pour une heure d'autonomie. Le rendement annoncé du moteur était de 43%.