L'HYDROGÈNE LIQUIDE COMME CARBURANT DES AVIONS : EST-CE UNE BONNE PISTE POUR RÉDUIRE LES ÉMISSIONS DE CO2 ?

Mars 2023

Réflexion collective

Les réflexions collectives sont des documents, fruit de travaux de groupe menés au sein de l'Académie de l'Air et de l'Espace. Ils demeurent pour le moment provisoires.

Leur intérêt, et avec cette réserve, est d'apporter ces contributions au débat public dès qu'elles sont disponibles et considérées comme suffisamment finalisées.

Ces réflexions collectives ne peuvent en aucun cas être considérées, en l'état, comme la position officielle de l'Académie.

L'HYDROGENE LIQUIDE COMME CARBURANT DES AVIONS : EST-CE UNE BONNE PISTE POUR REDUIRE LES EMISSIONS DE CO2 ?

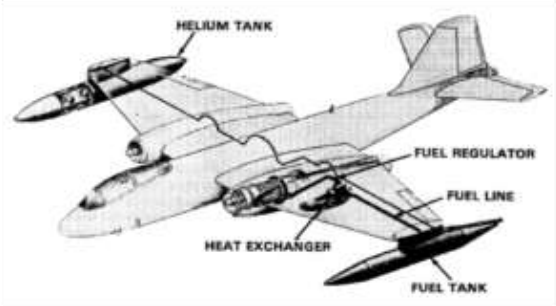
Mars 2023

Les membres de la Commission Énergie et Environnement (C2E) de l'Académie de l'Air et de l'Espace (AAE) dont les noms suivent : Dominique Bajeux, Xavier Bouis, Alain Cassier, Éric Dautriat, Michel Desaulty, Michel Eymard, Jean-Marc Garot, Nicolas Jeuland, Alain Joselzon, Thierry Prunier, Bruno Stoufflet et Gérard Théron ont, pendant un an, analysé de nombreux documents sur l'utilisation de l'hydrogène liquide comme carburant des avions de transport commercial. Leur avis est le but de ce rapport.

L'hydrogène est utilisé depuis de nombreuses années dans l'industrie et le transport spatial. De nombreuses connaissances scientifiques et techniques ont été accumulées sur ses caractéristiques et sur son utilisation. Du fait du changement climatique, l'hydrogène fait l'objet d'un regain d'intérêt comme vecteur d'énergie et pour être utilisé directement dans les transports.

En remontant le cours de l'histoire, une des premières utilisations de l'hydrogène pour le transport aérien a été pour les dirigeables, dont l'aventure s'est terminée en 1937.

Certains démonstrateurs d'avion ont été testés en vol avec succès (B-57 en 1956 - Tupolev 155 en 1988), mais sans autre développement, notamment à cause du coût plus élevé de l'hydrogène par rapport au kérosène. Dans les années 2000, le sujet a été de nouveau abordé en Europe, puis abandonné.



Etant vue comme un des moyens de décarbonation du **transport aérien**, l'utilisation de l'hydrogène fait l'objet d'un renouveau d'engouement politique, médiatique et technique avec des projets d'industriels et des travaux de centres de recherches.

Pour l'aviation, l'hydrogène présente deux avantages. D'une part, sa combustion offre la possibilité, au moins théorique, de ne produire essentiellement que de la vapeur d'eau et pas de CO2. D'autre part, il possède un pouvoir calorifique élevé, de trois fois supérieur à celui du kérosène (un PCI[1]de 120 MJ/kg au lieu de 43 MJ/kg) et sous forme

[1] PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur i.e. quantité totale de chaleur dégagée par la combustion

cryogénique d'hydrogène liquide (LH2), la masse de carburant à transporter est réduite d'un facteur 2,8 par rapport au kérosène, mais occupe un volume 4 fois plus vaste.

L'hydrogène gazeux (GH_2) peut aussi être utilisé, mais étant de densité plus faible, il occupe un volume presque 2 fois plus grand que LH_2. Il est stockable dans des réservoirs à haute pression (jusqu'à 700 bars). Les deux formes GH_2 et LH_2 peuvent servir comme source d'énergie alimentant des piles à combustible, ces dernières fournissant l'énergie électrique de propulsion ou un complément de puissance dans des motorisations hybrides. **Mais ceci n'est pas l'objet de ce document, consacré à l'hydrogène liquide comme carburant.**

Pour les applications industrielles et de transports terrestres, il existe des solutions répondant aux problèmes posés par les spécificités de l'hydrogène. Cependant des accidents ont eu lieu, ce qui incite à une prévention des risques spécifique pour le transport aérien.

Depuis plusieurs décennies, l'hydrogène est utilisé pour les lanceurs spatiaux sous forme liquide (LH2 à -253°C). Mais, sera-t-il possible de transposer l'expérience du spatial (une dizaine de lancements par an, des sites fermés au public, avec des précautions drastiques et des reports fréquents, au secteur du transport aérien (en 2021, 32 600 avions ont effectué 25,7 millions de vols dans le monde avec seulement 7 accidents catastrophiques) L'utilisation de l'hydrogène en remplacement du kérosène dans les opérations aériennes quotidiennes serait, de loin, plus qu'un simple changement de carburant : ce serait un nouveau transport aérien, avec ses différents acteurs, devant cohabiter avec l'existant.

Un point fondamental est le suivant : l'hydrogène liquide a une densité très faible, 70kg/m3 à -253°C. C'est un inconvénient pour la taille et le poids des réservoirs, mais aussi, dès que le liquide se transforme en gaz, la petitesse de sa molécule crée un risque très important de fuite, qui peut provoquer un incendie ou une explosion, dans une enceinte confinée. L'exigence de niveaux d'étanchéité de tous les aménagements et équipements sera impérative, sans commune mesure avec ceux existants pour le kérosène. C'est un défi non seulement pour les avions, mais aussi pour les aéroports et leurs infrastructures (installations de ravitaillement et de stockage, voire de liquéfaction).

La sécurité, au sol et à bord est un sujet pour lequel il ne peut y avoir de régression et qui nécessitera un processus de certification sans commune mesure avec ce qui a été fait jusqu'à présent, conjointement pour le sol et pour le bord. Ce processus de certification devra être défini en parallèle et dès le début de la conception des systèmes. Et il faudra convaincre les passagers de voler dans des avions à hydrogène. C'est certainement un des défis les plus importants à relever.

Ce changement de carburant, s'il se produit, induira un changement de technologie pour de nombreux systèmes avec des défis techniques qui prendront du temps à être maîtrisés. Différents concepts et projets d'avions de différentes tailles et de différentes gammes, sont proposés par Airbus, par des start-ups comme ZeroAvia ou encore par des centres de recherche et universitaires européens. Certains de ces projets sont soutenus par des travaux de R/T et des essais sont prévus afin de porter à maturité les solutions répondant aux problèmes à traiter. Cependant, ces projets devront avoir un

niveau de maturité suffisant pour juger de leur **faisabilité d'ensemble** avant de décider d'investir plusieurs milliards d'euros pour le développement de tels avions.

Lorsqu'on examine les différents concepts et projets industriels ou de recherche en cours, on constate que les perspectives de date de mise en service s'éloignent. Il faudra sans doute des années afin de démontrer si les technologies-clés peuvent être maîtrisées. Les premiers types d'avions, s'ils se concrétisent, se limiteront, sans doute, aux court-courriers (moins de 1 000 NM) à capacité limitée (moins de 100 places, voire une limite plus basse encore).

Produire, transporter, stocker et avitailler en LH2 les aéroports pose des défis de même ampleur. Le déploiement au plan mondial d'un nouveau mode de transport aérien posera la question de l'interopérabilité des installations aéroportuaires, de maintenance et de réparation des aéronefs et systèmes propulsifs, car les aéroports devront conserver en parallèle l'avitaillement en kérosène et en Sustainable Aviation Fuels (SAF). Si seule une partie des aéroports est équipée en hydrogène liquide, le déroutement d'un avion à hydrogène vers un aéroport non équipé pour fournir de l'hydrogène liquide conduira à son immobilisation pendant plusieurs jours, voire plus. Quand les gestionnaires d'aéroports seront-ils prêts à investir ? si tant est que cet hydrogène soit disponible.

Pour une même performance avion exprimée en PKT (passagers transportés par km), il faut autant d'énergie électrique pour fournir des SAF e-fuels que du LH2, d'où des dépenses de carburant équivalentes. Par contre, les processus de fabrication et de distribution étant différents, produire, acheminer, liquéfier et avitailler LH2 nécessiteraient une duplication des investissements, déjà jugés très importants pour les SAF qui sont une priorité.

L'objectif de réduction des émissions de CO2 devrait cibler prioritairement les moyen et long-courriers qui représentent les 2/3 du trafic et des émissions, alors que les projets d'aéronefs envisagés avec le carburant hydrogène ne semblent viser que des étapes courtes.

Pour l'ensemble du transport aérien, l'impact d'avions propulsés par hydrogène en termes de réduction des émissions de CO2 restera donc modeste au moins jusqu'en 2050/2060.

On peut noter trois citations, la première tirée du rapport sur les objectifs ambitieux à long terme (LTAG) de l'OACI :

"*L'hydrogène embarqué ne devrait pas avoir d'impact significatif d'ici 2050 (avec seulement **1,9%** de la part énergétique en 2050), mais cette proportion pourrait augmenter dans les années 2050 et 2060 si cette solution est techniquement faisable et commercialement viable*".

Une deuxième par le PDG de Boeing, David Calhoun, lors du sommet de la Chambre de commerce américaine sur l'aérospatiale à Washington (DC) le 23 octobre 2022 : " *L'hydrogène vert ne pourra au mieux que compenser **2%** des émissions de CO2 de l'aviation en 2050. Cela ne veut pas dire que nous n'y croyons pas, mais la contribution de H_2 se situe dans la seconde moitié du siècle, pas dans la première* », a-t-il déclaré.

Et la dernière par le CEO de Safran Olivier Andries : « *L'hydrogène est une solution séduisante, car sa combustion ne génère pas de CO_2, mais elle représente des défis techniques et d'écosystèmes considérables. On parle de plusieurs centaines de milliards € pour l'installation d'infrastructures cryogéniques dans les aéroports du monde entier. […] La neutralité carbone visée par le transport aérien mondial en 2050 passera par les carburants alternatifs* ».

Conclusion :

La capacité à ravitailler les avions en hydrogène liquide dans un grand nombre d'aéroports du monde sera un élément-clé de décision, notamment en raison des gros investissements nécessaires et des orientations stratégiques que prendront les différents acteurs étatiques, industriels et commerciaux. Au sein d'une même compagnie aérienne, la mixité de flottes entre avions à hydrogène et avions utilisant du kérosène ou des drop-in SAF limitera l'interopérabilité et compliquera les opérations.

Le transport aérien se trouvera confronté à de nombreux autres utilisateurs de l'hydrogène (industrie, transports terrestres, voire maritimes, ainsi que les SAF qui auront été développés d'ici là et auront pris leur place sur le marché).

Néanmoins, à ce stade, avec cet engouement politique, médiatique et technique, il est compréhensible de voir initier des développements technologiques et des essais au sol et en vol d'éléments-clés d'un « système hydrogène » qui pourraient apporter des réponses aux nombreux points à étudier. Ceux-ci seront utiles pour préciser le potentiel à long terme du carburant LH2, tant que leur ampleur reste mesurée et qu'ils ne détournent pas l'attention, ni les financements, de solutions de décarbonation plus solides et plus rapides à mettre en œuvre.

Même dans les feuilles de route qui incluent l'hydrogène liquide comme carburant des avions, la contribution de l'hydrogène à la réduction des émissions de CO2 restera modeste par rapport aux améliorations techniques et opérationnelles et à l'emploi des Sustainable Air Fuels (SAF) : bio fuels et e-fuels, qui sont compatibles « drop in ».

En définitive, face aux nombreux défis à surmonter, la perspective de l'hydrogène comme combustible des moteurs d'avions apparait très faible à l'horizon 2050 et incertaine au-delà.

Table des matières

1. Des défis techniques, opérationnels et réglementaires d'une ampleur inégalée 8
2. Produire, transporter, stocker et avitailler l'hydrogène 11
3. Pour la sécurité : une certification à inventer 14
4. Concepts et projets d'avions 16
   4.1. Quels types d'avions ? 16
   4.2. Airbus 17
      3.2.1. Regional short-haul concept 17
      3.2.2. Medium range concept 18
      3.2.3. Long-range concept 20
   4.3. Boeing 20
   4.4. Les tests de moteurs 21
      3.4.1. Airbus et CFM 21
      3.4.2. Rolls-Royce (RR) 22
      3.4.3. Pratt & Whitney (P&W) 23
5. Des développements technologiques 24
   5.1. Clean Aviation JU 24
   5.2. UK R&D 26
   5.3. German R&D 27
   5.4. Japanese R&D 27
   5.5. Chinese R/D 27
6. Un impact modeste sur la réduction des émissions de CO2 28
   6.1. Quelles étapes, pour quel trafic, avec quels avions ? 28
   6.2. Trafic et émissions de CO_2 29
7. Quatre leviers pour réduire l'empreinte environnementale du transport aérien 31

Annexe 1 - Retour d'expérience sur l'avitaillement de LH2 lors des activités spatiales. 32

Annexe 2 - LH_2 cryogénique à bord des avions 35

Annexe 3 - Quels types de moteurs à hydrogène 41

Annexe 4 - Enjeux liés à l'usage du LH2 44

Annexe 5 - Approche des risques en termes probabilistes (approche FAA et EASA) ... 47

Annexe 6 - Leçons tirées des lanceurs spatiaux 48

Annexe 7 - Statistiques des accidents LH2 dans les installations industrielles 49

Annexe 8 - Besoin d'une équipe d'architectes système 50

Annexe 9 – Aperçu de l'existant et des programmes de R/D pour la certification LH2 51

Annexe 10 - Projets Airbus 53
   Annexe 10.1 Regional short-haul concept 53
   Annexe 10.2 Questionnement sur un avant-projet de moyen-courrier à hydrogène 54

Annex 11 - Summary of Clean Aviation JU activities (as of October 2022) 57

1. Des défis techniques, opérationnels et réglementaires d'une ampleur inégalée

Ce document, est principalement consacré à l'hydrogène liquide utilisé comme carburant (H2-Burn) et non aux solutions utilisant des piles à combustible (H2-FC).

Avis : Parmi les points à étudier et auxquels il faudra apporter des solutions avant le lancement d'un projet d'avion utilisant l'hydrogène liquide comme combustible pour les moteurs thermiques :

1. La disponibilité d'hydrogène liquide LH2 non pollué en quantité suffisante dans bon nombre d'aéroports
2. Les conditions de sécurité lors de l'avitaillement des avions sans recours à l'hélium, dictant leur lieu et leur durée ;
3. Le stockage à bord de l'hydrogène dans des réservoirs à -253°C, 24h/24, 7j/7 en minimisant l'évaporation (malheureusement inévitable) ;
4. Le comportement de l'hydrogène liquide lors des mouvements des avions, attitudes, turbulences… ;
5. L'intégrité structurale des réservoirs, la tenue aux ballottements et facteurs de charge, les ponts thermiques… ;
6. Le transfert de l'hydrogène stocké dans les réservoirs (-253°C, quelques bars) à la chambre de combustion du moteur (~50°C, 50 à 100bars).
7. L'adaptation du moteur et des échangeurs, pompes cryogéniques, matériaux, … ;
8. La gestion des fuites, et la gestion de la température (matériaux) pendant la vie de l'avion soit 50000 à 70000 heures de vol.
9. …

Le point 1 est abordé au chapitre 2
Le point 2 est évoqué dans #Annexe 1 - Retour d'expérience sur l'avitaillement de LH2 lors des activités spatiales

Les points 3 à 8 font l'objet de #Annexe 2 - LH2 cryogénique à bord des avions
et #Annexe 3 - Quels types de moteurs à hydrogène

Avis : Si l'on parvient à surmonter tous les obstacles techniques liés à la mise au point d'un avion fonctionnant à l'hydrogène pour une application en série, des investissements en R&T très importants seront dans tous les cas nécessaires sur une longue période pour traiter l'ensemble des verrous technologiques et de certification. Avant de développer et de mettre en série de nouveaux avions fonctionnant avec de l'hydrogène, il faudra avoir des réponses à plusieurs interrogations et satisfaire plusieurs exigences fondamentales, dont en particulier celles-ci :

Suivant l'International Energy Agency, les investissements en cours sur les moyens de production de H_2 décarboné, pourtant déjà considérables, risquent d'être mis à profit en priorité pour satisfaire les besoins industriels et pour la production de SAF et pourraient

être insuffisants pour couvrir les besoins d'une quantité de LH_2 pour l'aviation qui apporterait une contribution substantielle à la neutralité carbone en 2050.

Il faudra démontrer que les aspects relatifs à la sûreté de fonctionnement sont maitrisés et donc établir, avec les autorités European Union Aviation Safety Agency (EASA) et Federal Aviation Administration (FAA), le cadre de certification d'un avion fonctionnant à l'hydrogène, incluant son système propulsif et son environnement sol

Un avion fonctionnant à l'hydrogène liquide devra être certifié avec un niveau de sécurité au moins équivalent à celui des avions actuels.

La partie cryogénique des réservoirs avion et de ses équipements jusqu'à la sortie de la pompe HP du moteur devra être traitée comme un seul système. C'est une logique qui découle de l'expérience des lanceurs spatiaux, mais qui nécessite de revoir le découpage des réglementations de certification entre l'avion, ses sous-systèmes et le moteur.

Compte tenu des moyens à mettre en œuvre pour assurer la sécurité au niveau d'un avion, incluant des redondances et contrôles associés, la disponibilité de l'avion représentera un enjeu potentiel important pour les compagnies aériennes avec des possibilités de retards ou de diminution de rotations qui sont à évaluer. Il s'agit, là aussi, d'un retour d'expérience des lanceurs spatiaux dont nombre de lancements sont reportés suite à des incidents sur les process hydrogène. De plus une mixité des avions LH_2 et SAF au sein d'une même compagnie aérienne limitera l'interopérabilité et compliquera les opérations.

<u>Avis</u> : L'utilisation de H_2 du fait de la production de vapeur d'eau, génère-t-elle des cirrus induits ? Comment ceux-ci contribuent-ils à l'effet de serre ? Une utilisation massive de H_2 dans le transport aérien peut-elle être envisagée sans augmentation de sa concentration atmosphérique, et quelle serait sa contribution à l'effet de serre ? L'évaluation des pertes d'hydrogène en exploitation devra faire l'objet d'études préliminaires afin d'en déduire l'impact potentiel sur l'environnement (dégazages, transitoires, maintien en froid, …, cas dégradés de fonctionnement tels que vidange réservoir en vol, opérations de maintenance, …)

<u>Avis :</u> Les études universitaires, tout comme les rapports des sociétés de conseil (McKinsey, Roland Berger) ou autres (ICCT, The Shift Project, Institut Montaigne,.) ont recensé les points durs des technologies à développer et à intégrer dans un système d'aviation à hydrogène. Mais ce que ces études et rapports ne disent pas :

Quelle est la hauteur de la marche pour passer de TRL 2/3 à TRL 6/7 ?

Quels sont les plans d'action et les « preuves de concepts » pour obtenir une maturité suffisante et à quel horizon ?

Combien cela va-t-il coûter et combien de temps cela va-t-il prendre ?

La réponse à ces questions devra être apportée le plus tôt possible en s'appuyant sur des études détaillées et des justifications étayées avant le lancement de programmes de développement.

2. Produire, transporter, stocker et avitailler l'hydrogène

Afin d'offrir un rayon d'action suffisant, l'aviation commerciale à hydrogène devra utiliser de l'hydrogène liquide (LH_2). L'hydrogène gazeux (GH_2 pressurisé à 700 bars usuellement) ne convient pas, conduisant à une masse de structures de réservoirs totalement rédhibitoire (de 12 à 15 fois la masse d'hydrogène emporté) et à des volumes presque 2 fois plus importants que l'hydrogène liquide (LH_2). Sur des avions de petite taille, et de très faible rayon d'action, le GH_2 peut cependant servir à alimenter des piles à combustible qui soit fournissent la puissance à des turbines électriques, soit sont couplées à des moteurs thermiques pour leur apporter un complément de puissance (motorisations hybrides). **Cet aspect de l'aviation à hydrogène (H2-FC) n'est pas traité dans ce document.**

Or, l'hydrogène liquide LH_2 est un produit peu courant : sa principale application « *industrielle* » est pour les lanceurs spatiaux compte tenu de l'excellente impulsion spécifique apportée par le « couple cryogénique » H_2/O_2. L'Europe, avec la filière Ariane, dispose d'une très bonne expérience de cet ergol. Cependant, la transposition d'un lanceur à un avion commercial est difficile. Pour l'aviation, tout diffère : enjeux de sécurité (probabilité de défaillance catastrophique inférieure à une par milliard d'heures de vol), durée de vie des avions (60 à 100 000 heures), durée de stockage de l'hydrogène liquide (24/24, 7/7), environnement, architecture, couverture opérationnelle et logistique ; et cela ne va pas dans le sens, jamais, de conclure à une utilisation avion plus « facile » que sur lanceur spatial. Au moins l'expérience de ce dernier permet-elle de savoir à l'avance quels sont les points les plus durs à considérer. C'est d'un écosystème d'aviation totalement nouveau qu'il s'agit.

Une fois '*fabriqué*', il faut transporter cet hydrogène. Peut-être sous forme liquide par camion-citerne dans un premier temps, puis sous forme gazeuse par pipeline pour alimenter tous les consommateurs d'H_2, dont les grands aéroports et, dans ce cas, équiper les aéroports eux-mêmes de moyens de liquéfaction nécessitant un apport important d'énergie électrique.

Il existe encore une autre variante : décentraliser dans les aéroports, non seulement la liquéfaction, mais l'électrolyse elle-même et ne pas oublier le stockage (à 20 K !). Les dirigeants des aéroports seront-ils convaincus de la supériorité commerciale et de l'avenir de ce concept… En fait, seul un investissement massif des États pourrait briser ce cercle vicieux. Ce sujet montre s'il en était besoin qu'une initiative '*française*' d'hydrogène aéronautique n'a de sens que si elle est accompagnée par (ou si elle sait susciter) une adhésion internationale, au-delà même de l'Europe.

Avant de faire voler des avions avec LH_2, il faut disposer d'hydrogène en quantité suffisante. Si l'on veut parvenir à une aviation zéro émissions, il ne s'agit pas, en effet, de faire voler quelques avions par-ci, par-là, mais de convertir la plus grande partie possible de la flotte mondiale.

En juin 2021, Airbus, le Groupe AdP, Airbus et Air Liquide ont signé et annoncé leur accord d'un partenariat pour caractériser les enjeux de la définition d'une chaîne logistique hydrogène et d'intégration d'infrastructures / équipements hydrogène sur les

aéroports (approvisionnement, liquéfaction, stockage, distribution) en vue d'avitailler les avions utilisant du LH2.

En particulier, AdP a réalisé une étude portant sur la transformation de trente aéroports dans le monde qui pourraient être capables d'accueillir et de ravitailler des avions en LH_2.

D'après des études universitaires allemandes, l'avitaillement des avions pourrait se faire près des terminaux et près des autres avions et dans un temps équivalent (15 mn) à celui des opérations actuelles. Voir sur ce point.

#Annexe 1 - Retour d'expérience sur l'avitaillement de LH2 lors des activités spatiales

Néanmoins la proximité des flux passagers nécessitera une sérieuse analyse de risques.

A partir des données de consommation de kérosène sur les aéroports parisiens de Roissy-CDG et d'Orly, des experts ont estimé que pour avitailler 30% des vols moyen-courriers, il faudrait de 700 à 800 t/jour de LH_2 pour CDG et la moitié pour Orly. A terme l'hydrogène serait fabriqué à l'extérieur de l'aéroport puis liquéfié sur l'aéroport. Un objectif proche de 1500-1600t/jour serait donc à prévoir en France (en incluant un 3ème aéroport international), 3000t/jour en Europe pour assurer les retours. Soit un besoin annuel de 1 million de tonnes de LH_2 par an pour une aviation à hydrogène utilisant les aéroports français. En extrapolant à une trentaine d'aéroports internationaux, le besoin serait d'à peu près 10 millions de tonnes de LH_2 par an.

Avis : on peut déjà anticiper que les gouvernements vont privilégier la conversion à l'hydrogène des activités qui ont non seulement un impact global sur le réchauffement du climat, mais aussi local sur la pollution de l'air. On voit déjà que la demande en hydrogène décarboné va se développer plus rapidement que les capacités de production, créant une forte concurrence entre de nombreux utilisateurs plus proches d'une application concrète (énergie, industrie, transports terrestres, voire maritimes) et aussi pour la production des SAF e-fuels, de telle sorte que le besoin supplémentaire que créerait une aviation propulsée à l'hydrogène ne serait pas "soutenable" avant longtemps. En citant le journal Le Monde : « Le manque de capacités et la concurrence entre les secteurs pourraient réduire dans l'aérien l'envol de l'hydrogène ».

Lors du sommet Airbus de fin novembre 2022, Guillaume Faury a déclaré : « *L'hydrogène vert doit être disponible en grandes quantités, au bon endroit et au bon prix* [….] *Lorsque nous devrons prendre une décision sur le lancement de l'avion à hydrogène chez Airbus en 2027 ou 2028, si nous sommes confrontés à une situation où il n'y a aucune certitude sur le fait qu'il y aura assez d'hydrogène dans les bonnes conditions disponibles pour l'entrée en service en 2035, ce pourrait être une raison de retarder le lancement du programme. Même si les technologies sur l'avion lui-même sont matures ».*

Le journal La Tribune du 30 novembre 2022 commente ces propos : *« Par ces mots, le président exécutif du constructeur européen a placé la dimension énergétique au cœur du développement de l'utilisation de l'hydrogène dans l'aéronautique et a largement insisté sur la nécessité de construire un écosystème capable de soutenir son utilisation. De quoi mettre la pression sur les énergéticiens et les régulateurs plutôt que sur ses ingénieurs engagés sur l'avion zéro émission (ZEROe) ».*

Sans doute conscients de cette contrainte, les représentants des 184 états membres (sur 192) présents à Montréal lors de la dernière assemblée générale de l'OACI en octobre 2022, n'ont pas retenu la motion soutenue par la France et les Pays-Bas encourageant le développement d'une aviation à hydrogène.

Une solution alternative applicable rapidement à court et moyen terme est d'utiliser des SAF (drop-in fuels). Ce qui distingue les SAF de l'hydrogène liquide pour le transport aérien à moyenne et longue distance, c'est que les SAF (notamment les e-fuels) vont être compliqués à produire mais très simples à mettre en œuvre, tandis que l'hydrogène liquide, relativement simple à produire sera délicat à mettre en œuvre. Entre les deux solutions, la différence de coût de carburant semble faible.

Il ne faudrait pas que l'attente d'une réponse à toutes les questions SAF et LH_2 retarde le 'décollage'… au moins des SAF.

3. Pour la sécurité : une certification à inventer

L'histoire de l'aéronautique et de l'espace, y compris toute récente, montre que des modifications, même mineures, peuvent entraîner des conséquences imprévues. Que dire alors « d'une aviation à hydrogène », qui va entraîner des changements importants sur la conception de l'avion et de son infrastructure sol.

#Annexe 4 - Enjeux liés à l'usage du LH2

Pour un avion à hydrogène, avec des sous-systèmes, des équipements et des composants en grande partie nouveaux et leur installation, les hypothèses de défaillance qui étaient basées sur les connaissances acquises et les estimations précédentes basées sur l'expérience, peuvent ne plus être valables pour la plupart d'entre elles et doivent être revues et adaptées

Comme pour les aéronefs actuels, *la limite supérieure de la probabilité moyenne par heure de vol* **pour chaque condition de défaillance catastrophique devrait être au moins de 1 × 10-9,** ce qui établit une valeur de probabilité approximative pour le terme **extrêmement improbable** ».

#Annexe 5 - Approche des risques en termes probabilistes (approche FAA et EASA)

Toute l'expérience du spatial et d'autres applications doit évidemment être mise à profit, en transposant les données, "d'un contexte réel à un autre", chacun ayant ses propres critères, contraintes et exigences.

#Annexe 6 - Leçons tirées des lanceurs spatiaux

Une certaine expérience pourrait également être recueillie à partir de rapports et de statistiques liés à l'hydrogène dans les installations industrielles.

#Annexe 7 - Statistiques des accidents LH2 dans les installations industrielles

Dans ce contexte, les travaux liés aux processus de certification réglementaire doivent être initiés très tôt avec l'appui de l'EASA et de la FAA en incluant les aspects sol et bord. Ces travaux seront mis en œuvre simultanément avec la conception des systèmes de préférence en équipes intégrées.

#Annexe 8 - Besoin d'une équipe d'architectes système

La criticité des aspects de sécurité et de certification est telle dans l'aviation qu'ils doivent recevoir une très grande attention dès les projets de recherche, qui devraient impliquer les autorités compétentes le cas échéant.

Avis : La sécurité représente l'un des enjeux majeurs de l'introduction de nouvelles technologies telles que celles d'un avion à hydrogène. Les objectifs que fixeront les autorités de certification seront basés sur la nécessité de disposer, dès le début d'exploitation, d'un niveau de sécurité au moins égal à celui des systèmes existants, ceci prenant en compte tous les évènements redoutés et cas dégradés de fonctionnement inhérents à la nouvelle technologie et à la totalité des systèmes en interaction avec elle.

Même si la faisabilité d'avions à hydrogène est démontrée sur chacun des points critiques évoqués dans le chapitre 1, pris isolément, il restera à démontrer la faisabilité au niveau de l'intégration globale, et les différents acteurs devront pour cela réaliser un avant-projet complet et détaillé en vraie grandeur couvrant tous les aspects bord et sol au moyen d'équipes intégrées, agiles, colocalisées, et en s'appuyant sur des experts de haut niveau très qualifiés et expérimentés.

Bon nombre des problèmes de sécurité, tels qu'ils peuvent s'appliquer au secteur de l'aviation, se traduisent directement par des problèmes de réglementation et de certification au sein de ce secteur, puisque la certification de type d'aéronef (ou de moteur) vise par définition à assurer un niveau de sécurité approprié pour l'aéronef (ou le moteur) et exige des exigences et des analyses de sécurité. Cette correspondance biunivoque entre les questions de sécurité et les questions de certification s'applique au niveau de l'aéronef (y compris au niveau du système de propulsion) dans tous les domaines, y compris la documentation. C'est évident, par exemple, en termes de certification des moteurs et des aéronefs, en ce qui concerne l'ingestion d'oiseaux, ou l'éclatement d'aubes ou de moyeu du rotor.

#Annexe 9 – Aperçu de l'existant et des programmes de R/D pour la certification LH2

4. Concepts et projets d'avions

<u>Rappel :</u> Ce document, est principalement consacré à l'hydrogène liquide utilisé comme carburant (H2-Burn) et non aux solutions utilisant des piles à combustible (H2-FC).

Avis : Les concepts et projets d'avions utilisant l'hydrogène liquide comme combustible pour les moteurs connus à ce jour ont pour la plupart un faible niveau de maturité. Les aspects critiques et les difficultés potentielles soulevées à présent ne pourront être traités que par des démonstrations des technologies-clés, des sous- systèmes et des systèmes incluant des preuves de concept par essais représentatifs extensifs. Au niveau de l'intégration globale, il faudra réaliser un avant-projet complet et détaillé en vraie grandeur couvrant tous les aspects bord et sol et nourri par les résultats d'essais au sol et en vol sur différents composants. Ce n'est qu'à l'issue de ces phases de démonstrations que l'horizon d'un déploiement commercial de ces avions de nouvelle génération et de leur marché potentiel pourront être envisagés et consolidés.

4.1. Quels types d'avions ?

Dans son rapport final publié en septembre 2022 "Investment scenario and roadmap for achieving aviation Green Deal objectives by 2050 Final Study", le Comité TRAN du Parlement Européen déclare :

"*A number of companies are already working on electric and/or hydrogen-fuel aircraft (e.g. Eviation, Wright Electric, Zunum, GKN Aerospace, Cranfield Aerospace Solutions, ZeroAvia). Some have quite ambitious targets for entry into service (e.g. 2026 for the GKN Aerospace H2GEAR project). However, all aircraft currently being developed* ***are small*** *(the current ZeroAvia development aircraft has 19 seats, although they are projecting 100-seat aircraft for the future) and will have short ranges. The timing for the extension of the technology to larger aircraft (e.g. 150-seat single-aisle aircraft or 300-seat twin-aisle aircraft) with longer ranges remains uncertain. The dates should be considered the earliest that such aircraft may enter service. It is prudent to allow for this uncertainty in the availability dates in analyses of the impacts of such technologies.*

The other key propulsion system technologies in development are those associated with the use of non-drop-in, zero-carbon fuels (electricity and hydrogen). These may appear within the next 10 years, but will initially be restricted to ***small, short-range aircraft****, because of energy density issues. Their use on larger, longer-range aircraft is likely to take significant extra development and is* ***unlikely before 2040***."

Les paragraphes suivants présentent certains concepts et projets en cours d'études et de développement ainsi que les essais prévus, avec les commentaires et avis des rédacteurs.

4.2. *Airbus*

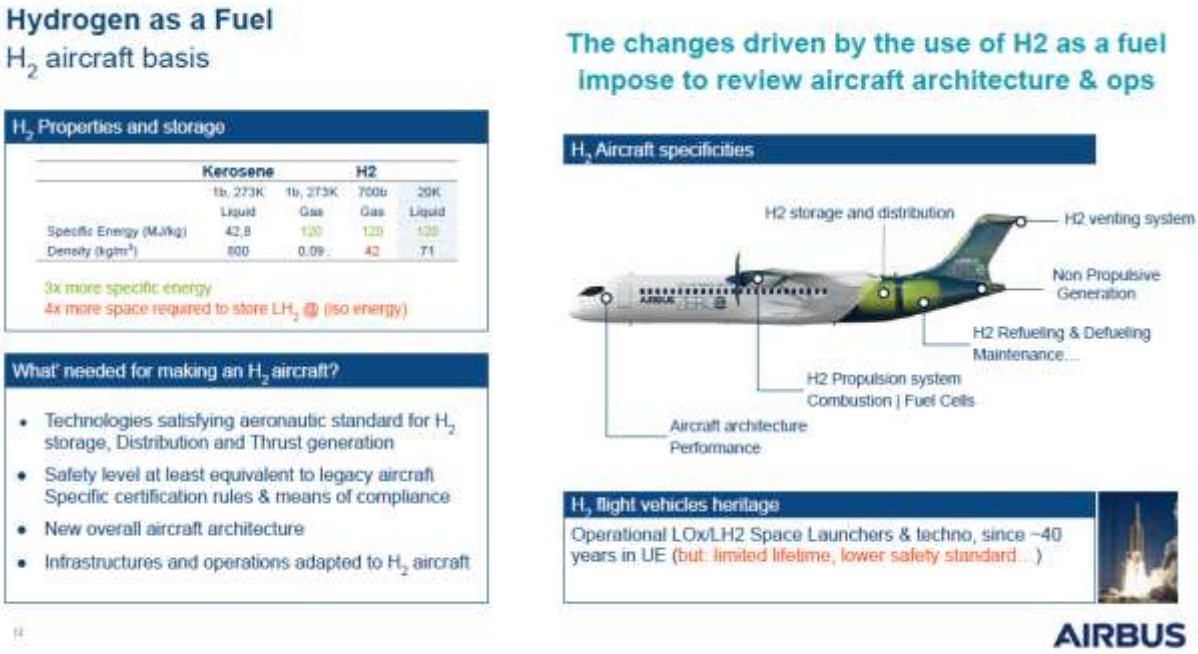
En juin 2022, le gouvernement français annonçait un plan de soutien à l'aéronautique de 15 milliards d'euros, assorti d'une exigence : le lancement d'un avion "vert" à hydrogène d'ici 2035. Quelques mois plus tard, Airbus présentait déjà trois concepts d'avions à hydrogène, "exceptionnellement prometteur comme carburant d'aviation propre".

Les deux premiers concepts d'avions à hydrogène présentés par Airbus sont de configuration classique avec un fuselage cylindrique. L'un est un avion régional court-courrier à turbopropulseurs et hélices, l'autre un biréacteur moyen-courrier. Avec sa forme d'aile volante, la troisième esquisse est plus révolutionnaire.

4.2.1. Regional short-haul concept

La complexité du développement des avions à hydrogène, ainsi que le nécessaire développement concomitant des infrastructures associées font que le premier développement commercial pourrait concerner un concept d'avion régional voire « super régional » d'une capacité de 100 passagers et d'un rayon d'action d'environ 1000 NM pour une mise en service vers 2035.

#Annexe 10.1 Regional short-haul concept



*<u>Opinion</u>: Provided that the studies and demonstrations to be carried out over the next few years confirm the feasibility and make it possible to certify such 'super-regionals' both for their operation and for their maintenance, the associated CO2 reduction would be approximately **4 to 5%** of total Air Transport emissions, assuming that about 20% of aircraft of this type can be used on the entire network of less than 1 000 NM **with airports compatible with LH2 refuelling** and at the cost of a notable operational complication for airlines. These planes could prove to be too small (with only 100 passengers) to be profitable on high traffic lines, too complex for small, truly regional lines, useless on lines already doubled by efficient TGVs (Paris-Bordeaux, etc.) . While a very high priority is placed on SAFs so that they are available and as they are very simple to use due to their 'drop-in' capacity, they will respond quite well to the need for decarbonization. So why would we "deprive" this segment of the market to put it on a hydrogen diet? What would the general economy of the system gain from this?*

4.2.2. Medium range concept

<u>Opinion:</u> The entry into service of a **hydrogen-powered medium-haul Airbus twin-engine** (200 pax / 2000 NM) seems postponed beyond the years 2035 previously announced, given the difficulties of all kinds it poses. The renewal of the medium-haul fleets from 2030 should go through the adoption of measures to significantly reduce consumption compared to the most recent aircraft, by acting primarily on the engines but also by continuing to optimize the cells (mass, aerodynamics, etc.). For example, the engine manufacturer CFM announces a reduction in consumption of around 20% with its Open Rotor RISE (Revolutionary Innovation for Sustainable Engines) project which, combined with aircraft improvements, could bring this gain to 30%.

https://www.journal-aviation.com/actualites/cfm-rise-le-futur-demonstrateur-de-ge-et-safran-s-affranchira-des-soufflantes-contrarotatives~53191.html

According to Airbus, if environmental regulations tighten and the price of carbon taxes increases, a possible future will see hydrogen aviation and in order to achieve this, it must start tackling it now.

Nevertheless, it will remain to certify these planes and produce many of them for decades to gradually replace the fleets of companies, before seeing a beneficial effect on global warming

This is also what the ICAO's Long Term Aspirational Goal (LTAG) report states: 'On-board hydrogen should not have a significant impact by 2050 (with only 1.9% of the energy share in 2050), but it could increase in the 2050s and 2060s if this solution is technically feasible and commercially viable

https://www.icao.int/environmental-protection/LTAG/Documents/REPORT%20ON%20THE%20FEASIBILITY%20OF%20A%20LONG-TERM%20ASPIRATIONAL%20GOAL_en.pdf (Para 2.1.c page 8).

Among the three hydrogen aircraft concepts presented by Airbus, this medium-haul aircraft uses liquid hydrogen to power two conventional turbojet engines.

Assuming all definition and safety points resolved, a group of AAE/C2E engineers attempted to carry out a pre-project study of such a medium-haul H2 based on an A321- neo capable of stages of around 2000 NM with around 180 passengers (A321 neo-H2).

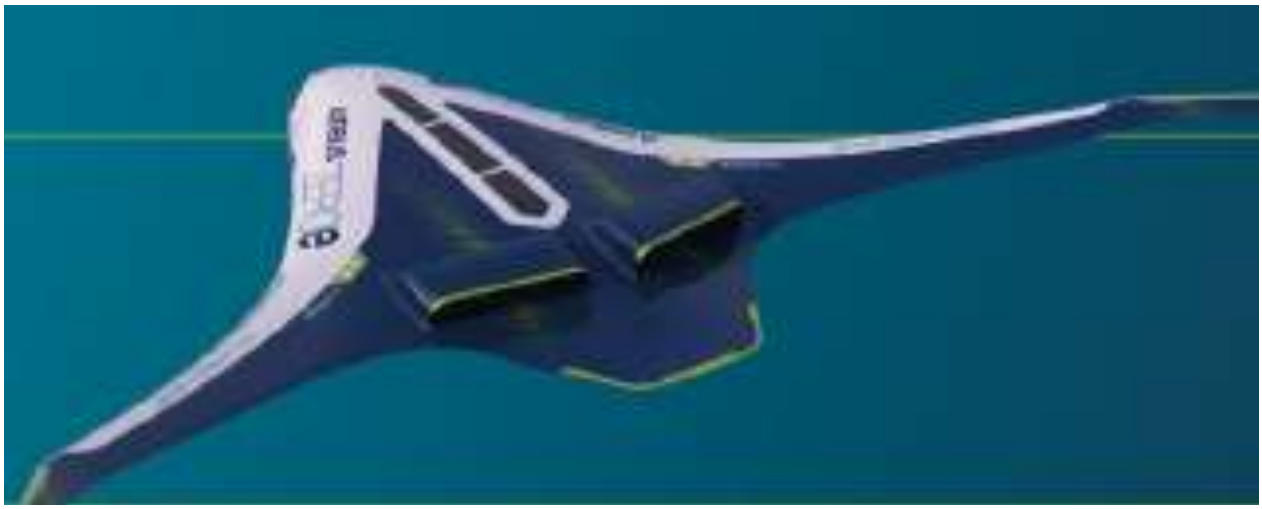
What are the difficulties of this type of project? How can they be resolved? How long ? What would be the hydrogen production needs to refuel these planes? With what energy to manufacture this hydrogen? What would be the costs of use compared to using SAF?

#10.2 Appendix 10.2 Questions about a potential hydrogen medium-haul preliminary project

Opinion: To carry out missions of approximately 2,000 NM, it is necessary to obtain a gravimetric index of 0.35 for the tanks and associated systems (ratio: LH2 mass/total tank mass + LH2). What proofs of concept are planned and when, to demonstrate that this index of 0.35 could be achieved while controlling thermal evaporation, sloshing in flight, gauging, safety with detection of hydrogen leaks?

At the end of 2022, some developments are at TRL2. A Clean Aviation project is targeting TRL 4/5 for 2026 with initially only €10 million in funding to be distributed among 14 partners…. Other funding exists in Europe (Clean Hydrogen) or in France, Germany, Spain…. Airbus, with other financing, maintains the objective of reaching TRL6 in 2026 for all technologies and systems and is positioning itself as a tank designer within the framework of the ZEDC (Zero Emission Development Centre) located in Nantes and Bremen.

4.2.3. Long-range concept



Opinion: Review: This artist's view of a flying wing depicts what a future LH2-powered long-haul aircraft could look like. No comment since no information is available on this concept. With such a revolutionary architecture, the development of such a project will take a long time with a distant commissioning (estimated beyond 2050 based on the Concorde experience).

4.3. Boeing

Boeing is focusing on using SAFs to reduce CO2 emissions. Without losing interest in hydrogen, Boeing emphasizes the potential difficulties and associated challenges.

Boeing has established a four-pillar strategy for meeting the aerospace industry's commitment to achieve net zero carbon emissions by 2050, including fleet renewal, improved operational efficiencies, energy transition, and advanced technologies. While Boeing continues to make progress against every pillar, Sustainable Aviation Fuels (SAF) and their scale-up offer the largest potential to decarbonize aviation over the next 20-30 years.

By 2030, all commercial airplanes Boeing delivers will be capable to fly on 100% SAF, that was the commitment made in January 2021.

Boeing CEO David Calhoun reported at US Chamber of Commerce Aerospace Summit in Washington (DC) on 23 Oct. 2022: '' What you must do to get to net zero by 2050 green hydrogen in its best day it's going to move that about 2%. On its best day. On its best effort. That doesn't mean we don't believe in it, but H2 contribution is in the second half of the century, not the first half," he said..

<u>Opinion</u>: If Boeing does not embark in the medium term on the development of hydrogen-powered aircraft, how will Airbus succeed in establishing itself in the United States and on the world market and in triggering the significant investments corresponding to the equipping a large number of airports capable of storing and refuelling planes with hydrogen?

The choice of a hydrogen aviation sector will be decisive for the competitive positioning of global players in the aeronautical field. This choice should therefore be argued, consolidated, and challenged by world-renowned experts before irreversible decisions are taken. This is what Guillaume Faury said at the Airbus Summit at the end of November 2022.

4.4. Engine tests

Several engine manufacturers have planned to test on the ground and in flight a propulsion system using hydrogen.

4.4.1. Airbus and CFM

In February 2022 Airbus signed a partnership with CFM International, an equal joint venture between General Electric and Safran Aircraft Engines, to demonstrate the in-flight feasibility of a hydrogen propulsion system towards the middle of the decade.

The objective of this program is to test on the ground and in flight a hydrogen-powered direct combustion engine with a view to the entry into service of a zero-emission aircraft by 2035. The demonstration will be carried out on an aircraft A380 test cells equipped with liquid hydrogen tanks prepared by Airbus sites in France and Germany. Airbus will also define the specifications of the hydrogen propulsion system, supervise the flight tests, and provide the A380 test bed which will allow the hydrogen engine to be tested in the cruise phase.

https://www.lesechos.fr/thema/articles/bientot-un-demonstrateur-pour-lavion-a-hydrogene-dairbus-1406135

CFM International will focus on modifying the combustion chamber, fuel system and control system of a GE Passport turbojet engine to run on hydrogen. The engine, assembled in the United States, was selected because of its dimensions, advanced turbomachinery and fuel flow. It will be installed on the side of the aft fuselage of the flight test bed so that engine emissions, including contrails, can be monitored separately from those of the engines propelling the aircraft. CFM will carry out an extensive ground test program prior to the A380 flight tests.

4.4.2. Rolls-Royce (RR)

EasyJet and Rolls-Royce announced in July 2022 a ground-breaking new partnership that will pioneer the development of hydrogen combustion engine technology capable of powering a range of aircraft, including those in the narrow-body market segment.

Both companies have committed to working together on a series of engine tests on the ground, starting end 2022 and have a shared ambition to take the technology into the air. The objective of the partnership is to demonstrate that hydrogen has the potential to power a range of aircraft from the mid-2030s onwards.

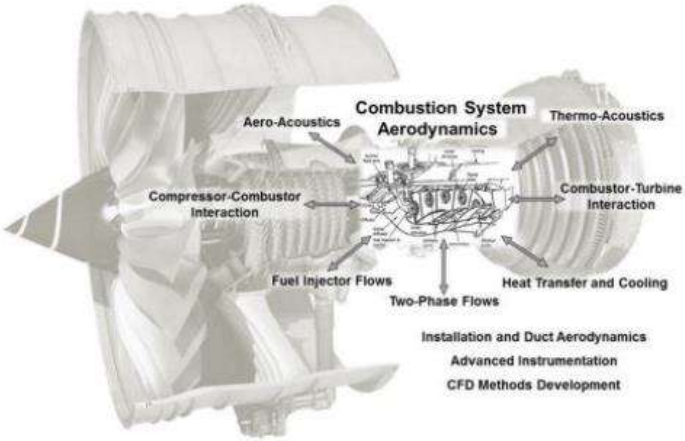
Over the last few years Rolls-Royce have been and still are deeply involved in the ATI FlyZero activity, providing many staff including the Chief Technology Officer from RR so the studies and responses were shaped by RR views.

Rolls-Royce are doing testing on H_2 initially ground based to establish technical credibility. This is both at combustor subsystem level at the National centre for Combustion & Aerothermal Research at Loughborough and whole engine level. One of the first tests took place in November 2022 with an AE2100 engine running on liquid hydrogen.

This is an engine used to power a range of aircraft, including the Lockheed C130 Hercules. Some of the key things that are tested by organizers are typical:

- How liquid hydrogen burns,
- The emissions generated by burning hydrogen,
- How hydrogen is fed to an engine,
- How temperatures are handled in an engine (hydrogen combusts at higher temperatures),

Which materials work or don’t work in a hydrogen engine.



The Loughborough UTC studies all areas relating to the aerothermal processes occurring within gas turbine combustion systems. This is a significant challenge as the combustion system consists of many highly complex components and contains a wide range of complex flow physics.

Après avoir analysé ces premiers essais, Rolls-Royce entend, faire tourner un moteur Pearl 15 à hydrogène. Ce moteur propulse les jets privés Bombardier Global 5500 et Global 6500. Le test du Pearl 15 aura lieu au sol à Stennis, Mississippi. Chronologie exacte pas encore publique.

Sur les applications terrestres et maritimes, Rolls-Royce commercialisera de nouveaux moteurs à gaz MTU Série 500 (500 kW) et Série 4000 (700 à 2500 kW) pour une utilisation avec jusqu'à 100 % d'hydrogène en 2023.

4.4.3. Pratt & Whitney (P&W)

En février 2022, Pratt & Whitney a été sélectionné par le Département américain de l'énergie pour développer une nouvelle technologie de propulsion à hydrogène à haut rendement pour l'aviation commerciale, dans le cadre de l'Agence des projets de recherche avancée-Énergie (ARPA-E) du DoE.

Le nom du projet est HySIITE - Hydrogen Steam Injected, InterCooled Turbine Engine. P&W affirme que son moteur HySIITE à injection de vapeur « réduira considérablement » les émissions d'oxyde d'azote. Pour rappel, P&W a développé et livré deux moteurs à hydrogène à la Skunk Works il y a plusieurs décennies, pendant la guerre froide.

5. Des développements technologiques

Avis: Les études académiques et universitaires mettent principalement en lumière des recommandations sur les exigences et procédures. Certains chercheurs sont impliqués dans les feuilles de route technologiques incluant des preuves de concept par essais permettant d'atteindre une maturité suffisante (TRL jusqu'à 6) sur les sujets-clés critiques pour la propulsion directe par hydrogène liquide parmi lesquels, entre autres :

- Les conditions de sécurité lors de l'avitaillement des avions

- Le stockage de LH2 à bord dans des réservoirs à -253°C, 24h/24, 7j/7 en minimisant l'évaporation

- Le comportement de l'hydrogène liquide lors des mouvements des avions, attitudes, turbulences

- L'intégrité structurale des réservoirs, la tenue aux ballottements et facteurs de charge, les ponts thermiques

- Le transfert de l'hydrogène stocké dans les réservoirs (-253°C, quelques bars) à la chambre de combustion du moteur (~50°C, 50 à 100bars)

- L'adaptation du moteur et des échangeurs, pompes cryogéniques, matériaux (en particulier pour la fragilisation liée à l'hydrogène).

- La gestion des fuites, et la gestion de la température (matériaux) pendant la vie de l'avion soit 50000 à 70000 heures de vol

Certaines de ces technologies vont être développées dans le cadre des financements de Clean Aviation JU et de Clean Hydrogen JU.

5.1. Clean Aviation JU

#Annex 11 - Summary of Clean Aviation JU activities (as of October 2022)

L'entreprise commune Clean Aviation a approuvé un financement de plus de 700 millions d'euros pour 20 projets de recherche de solutions innovantes pour propulser la prochaine génération d'avions durables et soutenir les ambitions du Green Deal de l'UE pour un avenir climatiquement neutre.

Les 20 projets retenus couvrent 14 thématiques élaborées à partir du « Clean Aviation Strategic Research and Innovation Agenda (SRIA) » articulé autour de 3 axes :

- Avion à hydrogène
- Avion régional hybride électrique
- Avions à courte et moyenne distance ultra-efficaces

L'adoption rapide de ces technologies à partir de 2035 permettra la plus grande réduction radicale de l'impact climatique de l'aviation d'ici 2050, ainsi que l'adoption accélérée de sources d'énergie et de carburants à faible ou zéro carbone, par ex.

hydrogène propre et/ou carburants d'aviation durables. Le lancement officiel des projets a débuté au 4e trimestre 2022.

	PROJECT TITLE	PROJECT COORDINATOR	PROJECT TOPIC*
HYBRID ELECTRIC POWERED AIRCRAFT	HE-ART	ROLLS-ROYCE DEUTSCHLAND LTD & CO KG	Multi-MW Hybrid-Electric Propulsion System
	AMBER	GE AVIO SRL	
	TheMa4HERA	HONEYWELL INTERNATIONAL SRO	Thermal Management Solutions
	HECATE	COLLINS AEROSPACE IRELAND, LIMITED	Electrical Distribution Solutions
	HERWINGT	AIRBUS DEFENCE AND SPACE SA	Innovative Wing Design
HYDROGEN POWERED AIRCRAFT	CAVENDISH	ROLLS-ROYCE PLC	Direct Combustion of Hydrogen in Aero-engines
	HYDEA	GE AVIO SRL	
	NEWBORN	HONEYWELL INTERNATIONAL SRO	Multi-MW Fuel Cell Propulsion System
	H2ELIOS	ACITURRI ENGINEERING SL	Large Scale Lightweight Liquid Hydrogen Integral Storage Solutions
	fLHYing tank	PIPISTREL VERTICAL SOLUTIONS DOO PODJETJE ZA NAPREDNE LETALSKE RESITVE	Near Term Disruptive Technologies
	HyPoTraDe	PIPISTREL VERTICAL SOLUTIONS DOO PODJETJE ZA NAPREDNE LETALSKE RESITVE	
ULTRA EFFICIENT SHORT & MEDIUM RANGE AIRCRAFT	OFELIA	SAFRAN AIRCRAFT ENGINES	Ultra Efficient Propulsion Systems
	SWITCH	MTU AERO ENGINES AG	
	HEAVEN	ROLLS-ROYCE PLC	
	UP Wing	AIRBUS OPERATIONS GMBH	Ultra Performance Wing
	FASTER-H2	AIRBUS OPERATIONS GMBH	Advanced Low Weight Integrated Fuselage and Empennage
TRANSVERSAL AREAS	HERA	LEONARDO - SOCIETA PER AZIONI	Aircraft concepts enabling 30 to 50% reduction in emissions
	SMR ACAP	AIRBUS OPERATIONS GMBH	
	CONCERTO	DASSAULT AVIATION	Novel Certification Methods and Means of Compliance for Disruptive Technologies
	ECARE	AEROSPACE VALLEY	Developing a European Clean Aviation Regional Ecosystem (ECARE)

* Official launch of projects is still subject to legal redress and to successful completion of grant preparation

https ://clean-aviation.eu/our-daring-new-projects-clean-aviation-awards-over-eur-700-million

Les projets d'avions à propulsion à hydrogène recevront un 1er lot de financements d'environ 180 M€ et comprendront :

- Projet **Cavendish** de Rolls-Royce plc pour la combustion directe d'hydrogène dans les moteurs aéronautiques : 50/60 M€ - TRL 4/5 visé après 48 mois – 20 partenaires.
- Projet **Hydeaby** de GE Avio Srl pour la combustion directe d'hydrogène dans les moteurs aéronautiques : 50/60 M€ - TRL 4/5 visé après 42 mois – 35 partenaires.
- Projet **TheMa4Hera** de Honeywell International Sro pour un système de propulsion à pile à combustible multi-MW : 50 M€ - TRL 4/5 ciblé après 42 mois – 18 partenaires.
- Projet **H2Elios** d'Aciturri Engineering SL pour des solutions intégrales de stockage d'hydrogène liquide léger à grande échelle : 10 M€ - TRL 4/5 ciblé après 36 mois – 14 partenaires.
- Projet réservoir **FLHYing** et projet **HyPoTraDe** par Pipistrel Vertical
- Solutions pour les technologies disruptives à court terme : 7 M€

Le projet H2Elios, attribué à Aciturri (espagnol), est dédié au développement et au test au sol de réservoirs intégraux LH2 ultra légers à grande échelle d'une capacité de ~150 kg LH2 avec un indice gravimétrique de 35 % @TRL4 ou supérieur d'ici la fin de la phase 1, visant de grands réservoirs intégrés (600 kg H2, indice gravimétrique > 45 %) pour les applications régionales et SMR.

5.2. UK R&D

Dirigé par l'Aerospace Technology Institute (Cranfield University) et soutenu par le gouvernement britannique, FlyZero a débuté au début de 2021 un projet de recherche intensif sur les vols commerciaux à zéro émission de carbone. Cette étude indépendante a réuni des experts de tout le Royaume-Uni pour évaluer les défis de conception, les exigences de fabrication, les exigences opérationnelles et les opportunités de marché des concepts d'avions potentiels à zéro émission de carbone.

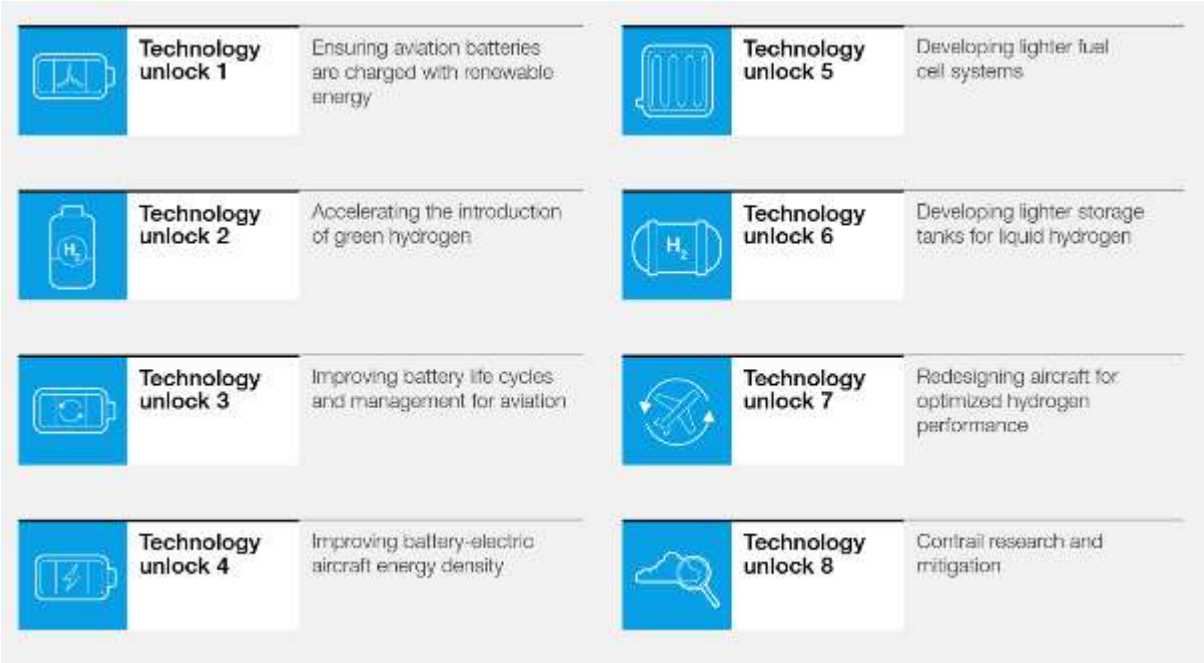
FlyZero a conclu que l'hydrogène liquide vert est le carburant sans émission de carbone le plus viable, avec le potentiel d'évoluer vers des avions plus gros utilisant des piles à combustible, des turbines à gaz et des systèmes hybrides. Cela a guidé l'orientation, les conclusions et les recommandations du projet.

See https://www.ati.org.uk/flyzero/

Un nouveau rapport du Forum économique mondial et de l'Aviation Impact Accelerator de l'Université de Cambridge explore comment l'aviation peut atteindre un véritable impact zéro sur le climat. Le rapport constate que d'ici 2035, trois types prometteurs d'avions à propulsion alternative pourraient offrir des alternatives viables aux avions conventionnels émetteurs de carbone :

- Les avions à batterie, entièrement électriques, pourraient permettre un vol totalement sans émissions sur les distances les plus courtes.
- L'hydrogène, quant à lui, pourrait être utilisé pour électrifier les avions avec des piles à combustible sur des distances moyennes, ou par combustion directe.
- L'hydrogène pourrait être appliqué à tout aéronef opérant sur toutes les distances parcourues aujourd'hui.

Huit technologies-clés ont été identifiées comme étant à débloquer afin de permettre leur adoption dans l'aviation :



Technological unlocks that will contribute to reaching true zero flight in aviation.

See: https://www.weforum.org/agenda/2022/07/how-to-achieve-net-zero-in-aviation/

5.3. German R&D

Plusieurs chercheurs appartenant à des universités allemandes (Stuttgart – Braunschweig – Hanovre – Munich) ont étudié l'utilisation potentielle de H2 pour propulser des avions de transport. A développer dans une version ultérieure de ce document.

5.4. Japanese R&D

En avril 2021, Kawasaki Heavy Industries (KHI) et Airbus ont signé un protocole d'accord pour travailler ensemble sur un écosystème et une chaîne d'approvisionnement de l'hydrogène. Le protocole d'accord se concentre sur le développement de hubs aéroportuaires d'hydrogène qui incluent la production d'hydrogène, sa livraison aux aéroports et l'acheminement du carburant liquide et super froid à bord des avions.

Kawasaki développe la technologie de l'hydrogène dans le cadre du Fonds d'innovation verte soutenu par le gouvernement de la New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO). KHI prévoit de passer les dix prochaines années à développer des technologies dans :

- les chambres de combustion et systèmes de moteur d'avion à hydrogène
- les réservoirs de stockage d'hydrogène liquide
- la recherche de concept d'architecture hydrogène-avion

KHI prévoit d'effectuer des essais au sol à des fins de vérification en 2030.

Mitsubishi Heavy Industries RJ Aviation Group (MHIRJ) et ZeroAvia ont annoncé en octobre 2021 qu'ils développaient un système de propulsion électrique à hydrogène avec technologie de pile à combustible pour la famille Mitsubishi CRJ pour une disponibilité en 2027. Le kit hydrogène sera disponible sur les avions neufs et convertis.

https ://airinsight.com/japans-kawasaki-invests-further-in-hydrogen-research/

5.5. Chinese R/D

http://www.ecns.cn/news/cns-wire/2019-03-20/detail-ifzfsfwt8635949.shtml

Sans commentaire.

6. Un impact modeste sur la réduction des émissions de CO2

6.1. Quelles étapes, pour quel trafic, avec quels avions ?

En 2019, le trafic mondial commercial de passagers exprimé en RPK – nombre de passagers payants multipliés par nombre de km (pax*km), a été assuré par des vols d'avions répartis entre :

Vols courte distance de 0 à 1000 km. 78% du trafic est assuré par des court/moyen-courriers mono-couloirs (typiquement A320/B737) / 15 % par des avions régionaux soit à turbopropulseurs (typiquement ATR/Dash 8) soit à réaction (typiquement CRJ/E170), et les 7% restant par des gros porteurs bi-couloirs (typiquement B777/A350).

[ATR/Dash8 ~70 pax; CRJ/E170 ~100 pax; A320/B737 ~180 pax; A350/B777 ~350 pax]

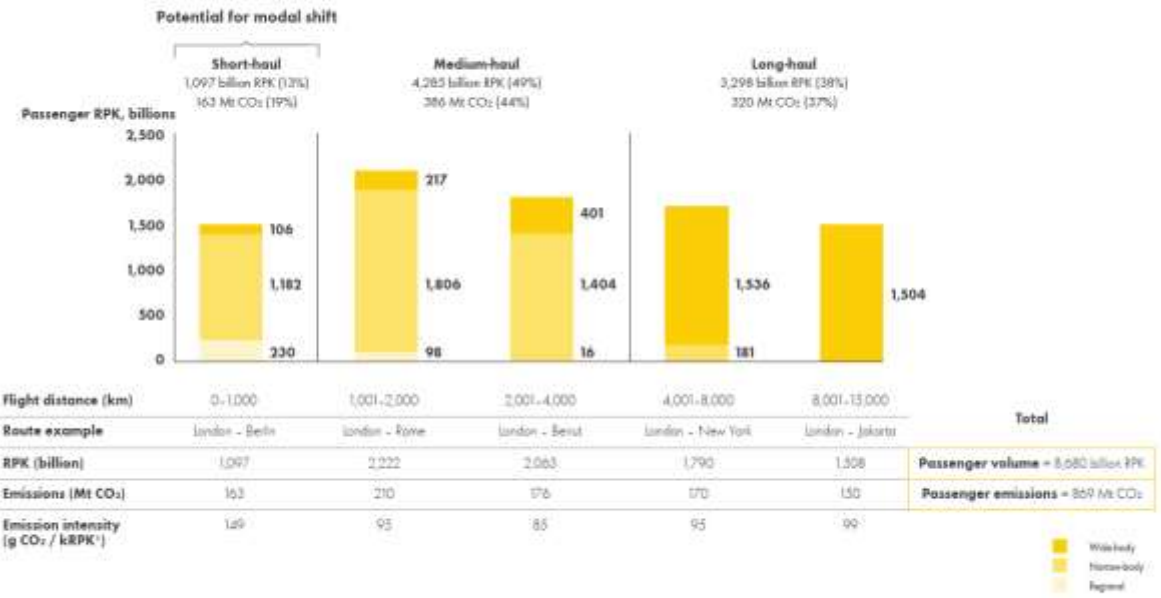
Vols moyenne distance de 1000 km à 2000 km. 85% du trafic est assuré par des court/moyen-courriers mono-couloirs / 10 % par des gros porteurs bi-couloirs et les 5% restant par des avions régionaux

Vols moyenne distance de 2000 km à 4000 km. 77% du trafic est assuré par des court/moyen-courriers mono-couloirs / 22 % par des gros porteurs bi-couloirs et le 1% restant par des avions régionaux

Vols longue distance de 4000 km à 15000 km. 95% du trafic est assuré par des gros porteurs bi-couloirs et les 5% restant par des court/moyen-courriers mono-couloirs.

<u>Avis</u> : Avoir à partager des flottes équipées d'une part de super-régionaux H_2 à turbopropulseurs capables de range inférieur à 1000 NM (1850 km) et d'autre part de moyen-courriers SAF puis H_2 capables d'étapes jusqu'à 2000NM (3700 km), semble ne pas offrir l'interopérabilité et la flexibilité qu'offrent aujourd'hui les moyen-courriers, qui assurent environ 80% du trafic sur des étapes jusqu'à 4000km+.

08 **Passenger flights volume (RPK) by flight distance (2019)**



Source: ICCT (2020); IEA (2021); Deloitte analysis
Notes: 1) g CO_2/kRPK stands for grams of CO_2 per thousand revenue passenger kilometres

6.2. *Trafic et émissions de CO_2*

Le transport aérien a en moyenne réalisé 39 millions de vols annuels avec une consommation globale de kérosène de 300 Mt [2]/an environ (correspondant à 3 600 TWh). En conséquence, il est responsable de 915 Mt/an d'émissions de CO_2 au niveau mondial. En Europe, la consommation a été de près de 150 Mt/an et la consommation française (vols nationaux et vols internationaux au départ de la France) est évaluée à 7 Mt/an. La répartition des émissions selon le type de vol est la suivante (source ICCT[3]) :

ÉMISSIONS de CO_2

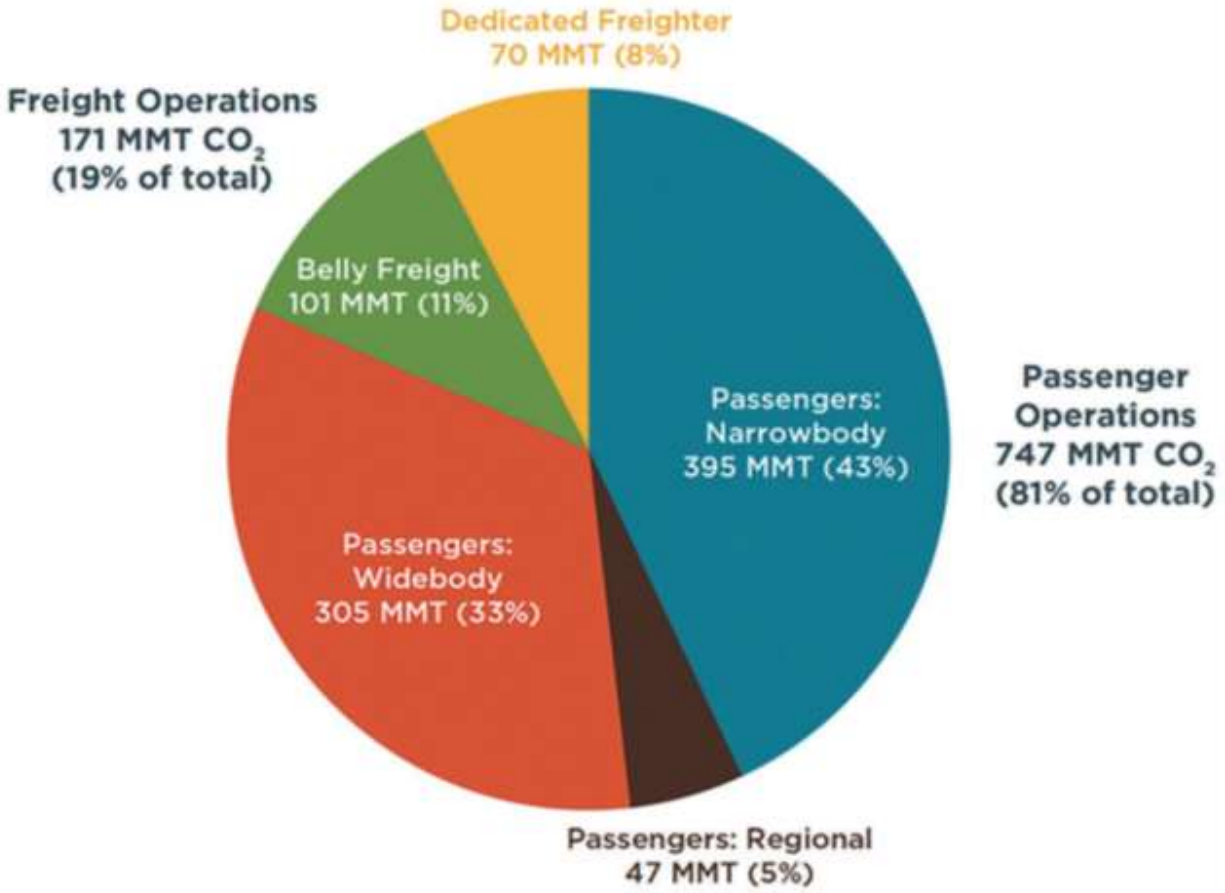
- **1/3 sont produites sur les vols court-courriers (< 1 500 km).**
- **1/3 sont produites sur les vols moyen-courriers (de 1 500 à 4 000 km).**
- **1/3 sont produites sur les vols long-courriers (> 4 000 km)**

> *Avis : La réduction des émissions de CO_2 doit porter en priorité et autant que possible en urgence sur les moyens et long-courriers, qui représentent les 2/3 du trafic et des émissions. Avec le risque que l'avion court courrier soit remplacé par le train si le trajet peut être effectué dans un temps acceptable.*

[2] 1 Mt kérosène = 43 PJ = 12 TWh.

[3] International Council on Clean Transportation.

CO_2 emissions in 2018 by operation and aircraft class.



7. Quatre leviers pour réduire l'empreinte environnementale du transport aérien

Ce sont les progrès technologiques, l'amélioration des opérations, le recours aux carburants d'aviation durables (kérosènes de synthèse et autres carburants, comme l'hydrogène) et les compensations.

Au-delà de ces leviers et en fonction de leur potentiel réel, la question d'une certaine sobriété peut se poser pour les pays développés, Les progrès de consommation des avions sont quasi continus depuis plus de 50 ans et la longévité des appareils augmente. De ce fait, la flotte mondiale en service a toujours des performances qui correspondent à son âge moyen, assez loin de celles des derniers-nés. Elle affiche donc aujourd'hui (chiffres de l'année 2019) une moyenne de 3,4 litres par passager aux 100 kilomètres (pk*t) sur des distances réelles parcourues dans des conditions opérationnelles. Or, la dernière génération d'Airbus (depuis l'année 2017) est donnée pour un peu plus de 2 litres pk*t. dans des conditions idéales (avions neufs, haute densité et distance directe).

D'ici à l'horizon 2050, toutes les flottes seront à ce niveau et la génération suivante d'avions plus légers, innovants dans divers domaines et surtout dotés de motorisations à très grand taux de dilution dont le développement est déjà bien avancé, devrait nous mener à partir des années 2035-2040 vers 1,5 litre pk*t. L'optimisation du trafic, en vol et au sol, nous promet un gain supplémentaire de plus de 5 %. Donc dans les années 2050-2060, tabler sur des consommations unitaires moyennes environ moitié de celles d'aujourd'hui est un pari raisonnable. Un avion de la dernière génération au taux de remplissage moyen actuel consomme donc un peu plus de 2 litres pk*t et émet moins de CO_2 par passager et par kilomètre (60 g) qu'une voiture occupée par une ou deux personnes.

Bien qu'il soit difficile de prédire ce que seront les progrès au sein de la flotte de 2050 du fait des inconnues de son évolution quantitative, de sa composition en types d'avions ainsi que de la nature des carburants utilisés, les projections de la plupart des scénarios de croissance crédibles du transport aérien conduisent à une consommation de l'ordre de 500 à 600 Mt / an (= 6 000 TWh) à l'horizon 2050.

L'ensemble des scénarios identifie que les besoins en énergie primaire (en premier lieu l'électricité) qui seront requis (21 ExaJ/an en 2050) représenteront une part significative de la production mondiale (de l'ordre de 1 000 ExaJ/an en 2050). Rappelons que le transport aérien est un système mondial pour lequel les règlements sont issus des standards de l'OACI et qu'en conséquence les solutions techniques doivent être pensées au niveau mondial, et la question de l'adaptation des infrastructures, notamment de "tous" les aéroports du monde, prise en compte. Il faut également noter que les compagnies aériennes ont toujours cherché à rationaliser leurs flottes, en les homogénéisant, et continueront très certainement à favoriser cette approche.

Annexe 1 - Retour d'expérience sur l'avitaillement de LH2 lors des activités spatiales

Toute la physique cryotechnique de l'hydrogène liquide LH2 (et ses simplifications théoriques), a été largement explorée, sous l'égide du Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) dès le début des activités Ariane (à la fin des années 70) en s'appuyant et en complétant des travaux en provenance des USA, en particulier pour la conception des interfaces entre le sol et le bord et les différents dispositifs d'avitaillement.

Le CNES, maitre d'œuvre Ariane, s'est largement inspiré du programme Apollo et de la fusée Saturne, pour les considérations de management, de fonctionnement et de règles techniques dans toutes les disciplines, dont celles provenant de l'usage d'ergols cryotechniques.

Le retour d'expérience, dans ce domaine, existe en Europe depuis 40 ans, au travers du Programme Ariane (versions 1à 5), utilisant des ergols cryotechniques. Cette famille de lanceurs a volé 257 fois depuis 1979, Ariane 5 pour sa part ayant décollé 110 fois (la dernière fois le 22/06/2022), démontrant un savoir-faire industriel et opérationnel, sans qu'il soit nécessaire d'aller chercher aux Etats-Unis une expérience particulière, comme cela est aujourd'hui suggéré dans certaines études universitaires publiées pour l'aéronautique.

Il est d'ailleurs, à noter, qu'aux USA encore récemment le premier lancement STS / Artemis, mené par la NASA, a dû être plusieurs fois reporté à cause d'une fuite d'hydrogène en chronologie de lancement. Space X, de son côté a fait exploser un lanceur au sol (avec son satellite) suite à l'usage d'oxygène « sur refroidi ».

La difficulté essentielle à résoudre, d'un point de vue industriel, est la maîtrise des flux thermiques entrants réellement dans les différents dispositifs d'avitaillement, changeant les conditions limites des équations utilisées gouvernant la physique. Une autre difficulté est d'assurer la propreté, dont l'absence d'humidité, dans les réseaux sol et bord. L'expérience Ariane montre que compte tenu de la réalité de la fabrication, les conditions thermodynamiques théoriques ne sont jamais tout à fait remplies. Il y a des flux thermiques entrant insoupçonnés, des fuites dans des joints, des traces d'humidité qui se révèlent tardivement, déstabilisant l'ensemble du processus en cours et qui conduisent à travailler dans « un mode dégradé », c'est-à-dire dans des conditions inconnues si on n'a pas anticipé et apporté de la robustesse à la conception et à la fabrication. De plus, et c'est certainement le plus important, on ne peut pas concevoir le sol sans connaitre le bord, les deux, en interaction permanente, étant susceptibles à tour de rôle, de créer des dysfonctionnements et des risques à conséquence catastrophique.

Concernant, par exemple, la durée incontournable de la mise en froid des lignes au sol et à bord avant de procéder au remplissage proprement dit, cette durée n'est pas indépendante de la longueur des canalisations et des dispositifs au sol. Cette hypothèse théorique facilite la possibilité de rendre déterministe, en durée, le remplissage d'un avion au sol, mais elle n'est valide que si les flux thermiques entrants sur l'ensemble de la canalisation au sol sont parfaitement déterminés et stables dans le

temps. Sur Ariane 5, il a fallu un an pour trouver et comprendre que des bulles d'hydrogène gazeux qui apparaissaient régulièrement en fin de remplissage étaient dues à une oxydation de la paroi extérieure des lignes sols mettant en cause la qualité du vide inter paroi, oxydation indétectable par les procédures de maintenance ordinaire exécutées à température normale (à chaud).

La littérature technique traitant de l'avitaillement des avions (par ex. voir https://www.mdpi.com/1996-1073/15/7/2475) propose un référentiel théorique nécessaire pour aborder le problème mais les objectifs opérationnels affichés ne sont absolument pas crédibles si on ne passe pas d'une part par une confrontation à la réalité industrielle et aux technologies déjà disponibles (pour identifier celles qui sont à inventer) mais aussi par une analyse bien plus profonde des cas dégradés qu'il faut prévoir, et qui à eux seuls vont mettre en cause la conception de l'ensemble.

Il est facile d'affirmer que par principe il n'y a pas de fuite d'hydrogène, ou plutôt de déclarer « on fait en sorte qu'il n'y en ait pas » pour concevoir un processus d'avitaillement. Mais que fait-on quand manifestement il y en a une, surtout quand l'incident redouté (une explosion) a déjà eu lieu ? Doit-on bloquer immédiatement tous les aéroports utilisant la même solution ou le même principe ? La fuite d'hydrogène gazeux est intrinsèque à son utilisation cryotechnique et doit être prise en compte dans la conception aussi bien pour en réduire son occurrence que pour confiner ses conséquences quand elle survient.

Quand l'avion doit être immobilisé au-delà de quelques heures, il faut s'assurer que toutes les parties cryogéniques (réservoirs, pompes, tuyauteries, échangeurs…) restent 'en frois', sinon on peut être amené à vidanger. L'expérience du spatial montre que cette phase est plus complexe et bien plus dangereuse que le remplissage, tout simplement parce que tout est optimisé pour le « nominal ».

Il est dommage de ne pas trouver dans les études publiées autre chose qu'une approche de sécurité préliminaire. Des études plus poussées sont en cours, notamment dans le cadre du projet EnableH2 (H2020). L'INERIS travaille également fortement sur le sujet.

La sûreté de fonctionnement doit être intégrée à la conception. Les notions d'analyse de risque, de quantification de risques, d'acceptabilité d'un risque, de mesures en diminution de risques, d'erreurs humaines, de maintenance préventive et curative doivent être prises en compte. C'est tout cela qui fera la réalité des coûts (et des délais). L'expérience des lanceurs européens montre qu'il s'agit là d'une discussion permanente entre la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité.

Il faudrait dès maintenant se poser ces questions pour mieux déterminer les conditions limites crédibles industriellement (les technologies disponibles et les données de dimensionnement) des équations utilisées. C'est en ce sens que l'expérience Ariane est utile, pour éviter de réinventer la roue et de découvrir dans quelques années des difficultés déjà rencontrées. Et il serait plus efficace de se concentrer sur les particularités du monde aéronautique, en particulier, la présence de personnels au sol et de passagers pour utiliser au mieux les investissements consentis.

Il sera sans doute possible de réduire les durées d'avitaillement au prix d'une plus grande automatisation, permettant simultanément de circonscrire les risques pour les « personnels civils ».

Les objectifs de durée des opérations, affichés à ce jour, restent très ambitieux. Il s'agirait de faire aussi bien et aussi vite qu'avec le kérosène, utilisé et amélioré continument depuis un siècle. Ceci revient à dire que par quelques miracles technologiques on peut s'affranchir en quelques années de la physique de l'hydrogène et en particulier de son utilisation à -253°C. L'expérience Ariane montre qu'en quarante ans il a été possible d'inventer un « écosystème » industriel maîtrisant cette physique, en conception, en fabrication, en contrôle, en maintenance. Mais un remplissage cryotechnique reste une opération plus complexe et plus dangereuse que celle d'un remplissage avec des ergols dits stockables (dont le kérosène).

Le modèle d'exploitation en aéronautique est à inventer pour trouver un compromis rendant possible l'utilisation maitrisée de l'hydrogène liquide. Les lanceurs ont su le faire, en abandonnant partiellement les ergols stockables. L'aéronautique saura le faire à condition de travailler dans un système intégré, avec une gestion coordonnée des risques et des compromis, mais cela prendra du temps, surtout si l'expérience Ariane est ignorée.

Annexe 2 - LH_2 cryogénique à bord des avions

Stockage : Un A320 emporte jusqu'à 23 tonnes de kérosène. 9 tonnes d'hydrogène liquide (LH_2) suffisent pour fournir la même énergie, mais LH_2 occupe un volume quatre fois plus important que le kérosène et du fait de sa faible densité nécessite un volume de réservoirs d'environ 150 m3 (en intégrant les nécessaires « volumes morts ») Il faut aussi maintenir la température de LH_2 à -253°C pour éviter l'ébullition avec des réservoirs extrêmement bien isolés et des cloisons anti-ballotements.

Le stockage de LH_2 à bord ne peut se situer dans les ailes : une logique est d'installer les réservoirs à l'arrière du fuselage, ce qui conduit à un allongement considérable de ce dernier (de plusieurs mètres). Quel surcroît de masse résulte de cette configuration ? Cela dépend entre autres de l'isolation thermique. Les protections thermiques des réservoirs type Ariane (cellulaire de polyuréthane) ne conviennent pas. Il faut en effet, à la différence du lanceur, avoir des réservoirs ayant des taux d'évaporation très faibles compte tenu de la durée des vols (de plusieurs heures sur avion à comparer à 9 mn de fonctionnement pour l'étage principal d'Ariane 5).

Il semble plus logique d'aller vers une isolation multicouche sous vide, du type du réservoir hélium liquide d'Ariane 5, ou de celui du satellite infrarouge Herschel... mais dans des dimensions bien plus considérables !

Est-ce faisable sur le plan économique, sachant que ces réservoirs sont réputés coûter cher ? Quant à la masse, il n'est pas pertinent d'en tenter une transposition à l'échelle de l'avion, compte tenu de toutes les différences.

Faudra-t'il aussi mettre les moteurs à l'arrière du fuselage pour minimiser les déperditions thermiques des circuits d'alimentation des moteurs ?

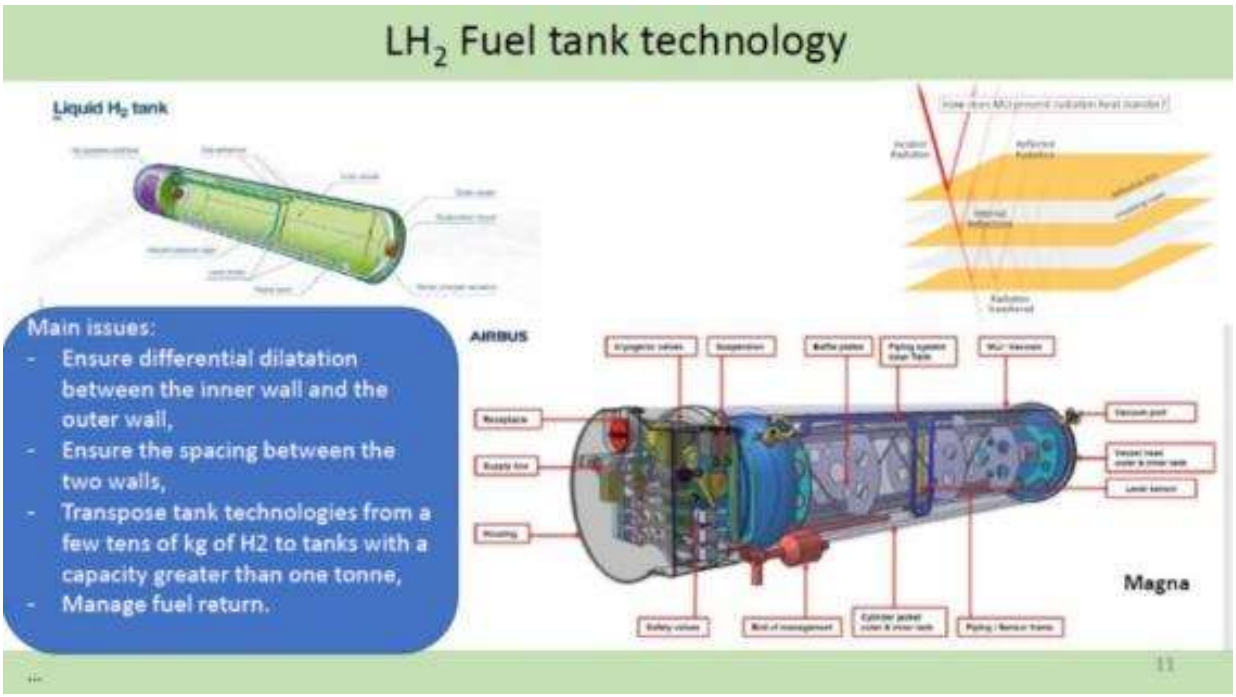
Autre solution : un fuselage intégré, proche d'une aile volante, pourrait libérer davantage de place intérieure et faciliter le volumineux stockage d'hydrogène, mais il s'agit là d'un projet en rupture, où beaucoup d'éléments sont à inventer, tester, développer et certifier, ce qui prendra énormément de temps.

Quelques tentatives ont été faites, puis abandonnées, pour installer des réservoirs d'hydrogène liquide LH_2 dans l'automobile, afin de fournir de l'énergie à des piles à combustibles ou même directement aux moteurs à combustion (BMW).

Le rapport masse hydrogène / masse totale (réservoir équipé+hydrogène) appelé indice gravimètrique (IG) est un facteur important du dimensionnement du projet et doit tenir compte d'une forte isolation thermique (sans doute avec doubles parois) car LH_2 est stocké à -253°C.

Air Liquide dit savoir réaliser un IG de 16 à 20%. Airbus vise 35%, condition sine qua non pour la faisabilité d'un projet de moyen-courrier 200 pax / 2000 NM.

https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2021-12-how-to-store-liquid-hydrogen-for-zero-emission-flight



Hypoint et GTL (industriels US) annoncent un IG de 70%. GTL et Hypoint ont visiblement 'oublié' plusieurs centaines de kilos pour l'isolation, les vannes, les tuyaux internes aux réservoirs, les multiples capteurs et autres ferrures d'accrochage à l'avion. A noter : cet article a été publié en date du 1er avril !

https://www.compositesworld.com/news/hypoint-partners-with-gtl-to-extend-zero-emission-flight-with-ultralight-liquid-hydrogen-tanks

De gros progrès sont donc à faire sur la masse des réservoirs... comment ?
Les ballottements du LH_2 liés aux changements d'attitude et aux facteurs de charge risquent de conduire à des variations de centrage et à des évaporations supplémentaires. Or ces changements d'attitude pour un avion sont très supérieurs (50 degrés) aux modestes braquages des tuyères d'un lanceur. Il faudra prévoir des cloisons anti-ballotements, donc de la masse supplémentaire.

L'alimentation des moteurs requiert une pression élevée, jusqu'aux alentours de 100/150 bars, sous forme, cette fois, gazeuse. Il faut prévoir des pompes cryotechniques (à débit variable dans une forte plage : 1 à 25 du ralenti au plein gaz), et des échangeurs. Une série d'équipements et de lignes cryotechniques devront éviter le givrage (comme l'isolation thermique du réservoir).

Le remplissage des réservoirs d'hydrogène (l'avitaillement) est une autre difficulté. L'hydrogène étant obtenu par électrolyse de l'eau avec de l'électricité renouvelable, il faut encore le transporter jusqu'aux aéroports (sans doute sous forme gazeuse par pipe-lines ou liquéfié par camions), et le liquéfier sur place, au voisinage de l'aéroport. Puis remplir les réservoirs : cet avitaillement pourra-t-il se faire au voisinage du public en évitant toute fuite qui représente un risque majeur, l'hydrogène étant susceptible de provoquer des incendies ou même d'exploser à de faibles concentrations.

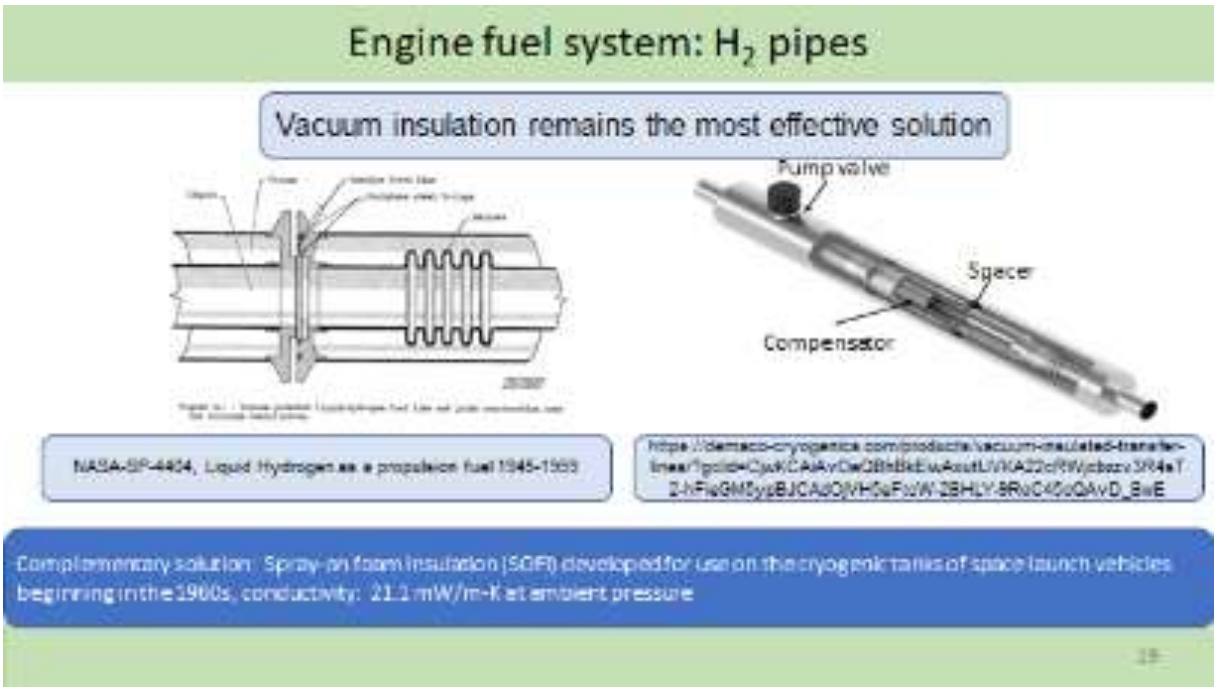
Une fois l'avion prêt, il faut le remplir à partir du stockage d'hydrogène au sol. On ne remplit pas un réservoir de LH_2 comme un réservoir d'essence. Le remplissage doit se

faire suffisamment lentement en conservant sa pression légèrement supérieure à la pression atmosphérique et sa température incroyablement basse, tout en évitant l'ébullition. Et sans doute à l'écart du public. Cet avitaillement prendra peut-être une ou deux heures pour un avion moyen-courrier. Difficilement compatible avec les taux d'utilisation journaliers des flottes actuelles !

Citons également le risque de fragilisation par l'hydrogène de certains matériaux, l'incompatibilité avec les élastomères, etc. – d'où un choix de matériaux éventuellement différent de celui d'aujourd'hui, avec là aussi de possibles conséquences économiques.

Des réservoirs aux moteurs : L'hydrogène doit être acheminé des réservoirs jusqu'aux moteurs. Entre le kérosène et l'hydrogène les conditions initiales et finales sont très différentes, ce qui va impacter profondément les différentes fonctions de pressurisation, de réchauffage et de contrôle du débit injecté.

Les canalisations alimentant les systèmes propulsifs doivent être isolées pour limiter les échanges thermiques et éviter les phénomènes de givrage.



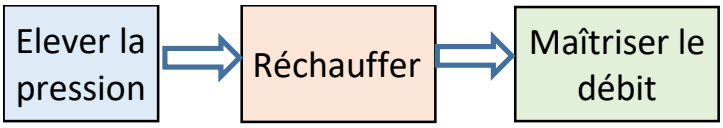
A énergie constante, le débit volumique de l'hydrogène étant quatre fois supérieur à celui du kérosène, le poids de ces canalisations est impacté par l'augmentation de diamètre (multiplié par 2 en première approximation) et par l'isolation thermique (système double-peau et/ou utilisation de mousse isolante). Des gains sont à rechercher en optimisant la position relative réservoirs-moteurs.

Avec l'hydrogène, les températures cryogéniques sur certaines portions du circuit imposent des contraintes d'isolation et de compatibilité des matériaux, aussi bien vis-à-vis de l'environnement matériel qu'humain. La qualité de l'hydrogène dans les réservoirs dépendra de la qualité de sa fabrication et de la maitrise de l'étanchéité intrinsèque et en utilisation. En effet, les températures cryogéniques induisent un risque d'avoir une présence d'air ou d'azote sous forme solide qui pourraient nécessiter des organes filtrants adaptés. La très faible densité de l'hydrogène et sa grande capacité

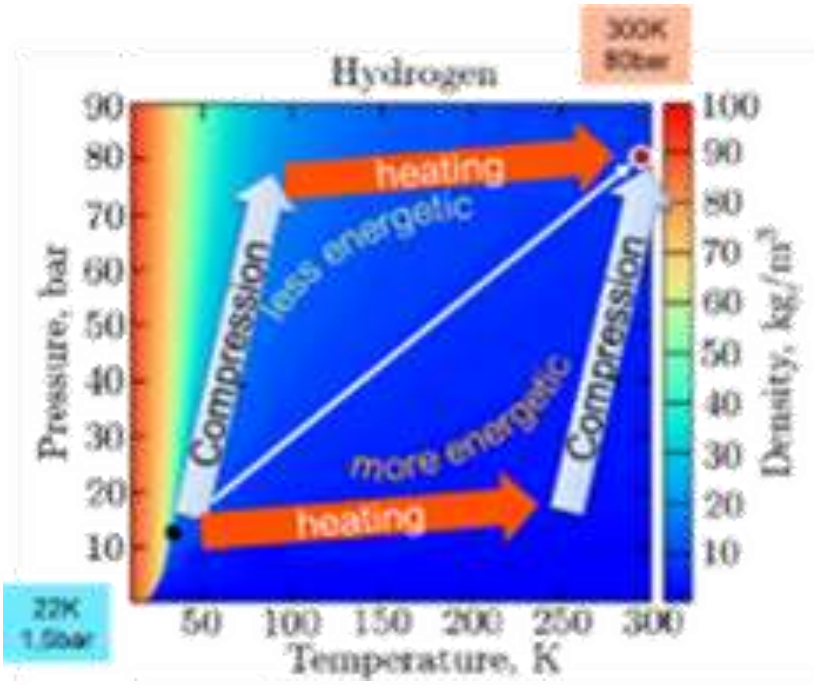
thermique requièrent une dépense énergétique sans précédent pour le pressuriser et le réchauffer. Enfin, la grande inflammabilité de l'hydrogène impose d'éviter tout contact avec l'air en dehors de la chambre ce qui induit des contraintes drastiques en termes d'étanchéité, des mesures de prévention et de protection ou encore des modes de fonctionnement particuliers tels que la purge et l'assainissement du système.

L'hydrogène doit être injecté dans le moteur à une température compatible des besoins de la chambre (ni trop froid, ni trop chaud) et doit donc être entièrement vaporisé et réchauffé. De multiples sources chaudes sont identifiables et le moteur en constitue une des sources primaires via ses besoins de refroidissement (huile moteur, air de refroidissement, générateurs électriques avion) ou via les gaz d'éjection par exemple.

Similairement à un système kérosène, la pression du combustible doit être élevée jusqu'au niveau spécifié par la chambre de combustion. Le débit doit également être finement contrôlé pour atteindre les exigences de précision et de réactivité des turbines à gaz modernes. Une nouvelle fonction principale doit être introduite : l'hydrogène liquide doit être réchauffé et vaporisé pour atteindre la température d'utilisation. Pour des raisons de rendement, il est préférable de pomper l'hydrogène liquide plutôt que gazeux ce qui détermine l'agencement de la fonction de pressurisation en amont de la fonction de réchauffage.

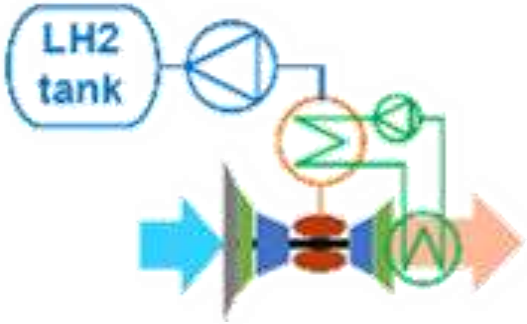


L'objectif de la fonction réchauffage est de réchauffer l'hydrogène de 20K à un niveau de température compatible d'une bonne injection et d'une bonne combustion dans l'ensemble du domaine de fonctionnement. Cela représente des puissances pouvant atteindre **2MW** par moteur pour un avion moyen-courrier : des sources importantes de chaleur sont donc à trouver.



Cette nouvelle fonction constitue un degré de complexité supplémentaire : une source chaude doit être introduite, ou bien une source existante doit être valorisée.

La solution la plus évidente est de récupérer la chaleur directement sur l'air chaud circulant dans le moteur et de façon avantageuse via les gaz d'échappement. Le refroidissement de l'air lors de sa compression présente également une opportunité pour optimiser le rendement thermodynamique des turbines à gaz, et nombreux cycles sont proposés par les acteurs du secteur.



En plus de ces fonctions principales, de nouvelles fonctions secondaires doivent être introduites pour maîtriser la nature instable de l'hydrogène. On trouvera alors des fonctions de contrôle de la pressurisation du réservoir, de purge, de mise en froid, de ventilation, de contrôle du vide…

L'hydrogène cryogénique présente des caractéristiques particulières à prendre en compte dans la conception de l'architecture. La première, essentielle, est que tous les autres fluides (hormis l'hélium) givrent à son contact. Cette propriété implique des contraintes opérationnelles : tous les circuits exposés à de l'hydrogène liquide devront être purgés. La production de glace d'azote, d'oxygène ou d'eau peut causer de nombreux modes de défaillance, les principaux étant la dégradation de l'étanchéité des vannes de sécurité et le blocage des injecteurs. L'hélium, très largement utilisé dans le spatial, n'est pas envisageable dans l'aéronautique pour des raisons économiques et parce que ce gaz n'est pas renouvelable. Ainsi, ces phases de purge devront être réalisées à partir d'azote (pour éliminer l'oxygène et l'eau) et d'hydrogène gazeux (pour éliminer les autres gaz).

De plus, l'hydrogène est généralement stocké dans un état proche de la saturation. En circulant dans des conduites ou composants plus chauds, il subit un changement de phase. L'augmentation rapide du volume de gaz conduit à des blocages et à des instabilités importantes, voire à des écoulements inversés. Ainsi, il est nécessaire de mettre tout le système en froid avant le démarrage. Cette opération permet également aux différents composants d'atteindre leurs jeux nominaux pour éviter les fuites lors de la mise en pression, ou bien les contacts pour les parties mobiles.

Ces deux nouvelles opérations (purge et mise en froid) sont à intégrer dans les études de disponibilité de l'avion.

Le passage à l'hydrogène ne modifie pas radicalement l'architecture d'une turbomachine mais implique de nombreuses ruptures technologiques qui devront faire l'objet de plans de maturation d'ampleur avec la mise en place de nouveaux moyens d'essais, de qualification et de certification.

Le système hydrogène apporte donc de très nombreuses nouveautés, et une adaptation du système kérosène actuel ne suffira pas à atteindre le niveau de performance et de fiabilité obtenu après 80 ans d'expérience. Beaucoup de fonctions doivent être repensées en repartant de la base, c'est-à-dire la thermodynamique propre à l'hydrogène. Réunir les spécialistes des secteurs aéronautique et spatial ainsi que d'autres acteurs industriels ne peut qu'être encouragé.

Annexe 3 - Quels types de moteurs à hydrogène

Les configurations de système propulsif :

Différentes configurations de système propulsif utilisant l'hydrogène sont envisageables :

- La poursuite de l'utilisation de turbomachines basées sur le cycle de Brayton (moteurs carénés à grand taux de dilution, open rotors ou encore turbopropulseurs),
- La combinaison d'une turbomachine et d'une pile à combustible de type SO-FC fonctionnant à température élevées. Ce type de configuration devrait permettre d'atteindre des rendements thermiques de l'ordre de 0,7.
- L'exploitation des capacités de détonation de l'hydrogène dans les cycles thermodynamiques CDE (Continuous Detonation) ou RDE (Rotary Detonation Engines) ce qui permet de réduire le nombre d'étage de compresseur HP et d'améliorer le rendement thermodynamique

. (a) Schematic of the classical two-circuit turbofan engine (b) Scheme of the turbofan engine that uses detonation combustion

- L'utilisation d'une pile à combustible entrainant un moteur électrique. Dans ce cas de figure, ce sont les technologies de type PEM fonctionnant à basse température qui sont envisagées. Ces technologies sont déjà largement utilisées dans le domaine des véhicules électriques. Une synergie est donc possible.

Cycle de Brayton

Les différences entre des turbomachines fonctionnant au kérosène et à l'hydrogène se situent principalement au niveau du système carburant (combustible), du système de contrôle et de la chambre de combustion. Les principaux verrous sont l'atteinte des exigences de sûreté de fonctionnement requis par la certification et la maitrise de la masse.

- Le « fuel system » du moteur doit être conçu pour réaliser les fonctions de pressurisation, chauffage et dosage du combustible :
    - Les pompes moteur doivent élever la pression de l'hydrogène jusqu'à 100-150 bars au plein gaz (valeur de l'OPR de 35 à 50+ perte de charge du système fuel et du système d'injection). La puissance requise est proportionnelle au débit massique. Elle est donc 4 fois plus élevée qu'avec du kérosène. L'utilisation de pompes centrifuges est envisagée mais la lubrification des roulements permettant d'assurer une durée de vie suffisante est un point dur. Un actionnement électrique de ces pompes est envisagé;

    - L'hydrogène doit être chauffé avant d'être introduit dans la chambre de combustion. La source principale de chaleur est un échangeur d'une puissance de l'ordre du MW pour un moteur de SMR placé en sortie de flux primaire.
    - Les canalisations seront plus nombreuses, plus complexes pour garantir l'étanchéité, à double peaux et d'un diamètre important (surtout pour la partie gazeuse).
- L'actuation des géométries variables devra être réalisé électriquement ce qui nécessite de l'électronique de puissance. L'hydrogène pourrait être utilisé pour assurer le management thermique de cette dernière.
- Compte tenu du domaine de détonation de l'hydrogène, un système de surveillance et de ventilation des enceintes moteur et des compartiments de la nacelle devra être mis en place.

L'ensemble de ces éléments vont contribuer à augmenter significativement la masse du moteur dans une fourchette comprise entre 5 et 10 % (150 à 300 kg pour un système propulsif de SMR).

En ce qui concerne la chambre de combustion, les technologies en cours de développement devraient permettre de maitriser la production d'oxyde d'azote. Par contre, la maitrise des phénomènes d'auto-allumage, de flashback et d'instabilité de combustion reste une difficulté majeure.

L'utilisation de LH_2 comme une source froide va permettre la mise en œuvre de technologies nouvelles, afin d'améliorer les performances mais celles-ci vont introduire des risques et des cas de panne nouveaux à prendre en compte:

- Pre-cooler et intercooler au niveau du système de compression (avec des risques de givrage),
- Cooled cooling au niveau de l'air de refroidissement de la turbine HP,
- Refroidissement des moteurs/générateurs et de leur électronique de puissance,
- Matériau supraconducteur haute température pour les moteurs/générateur

Enfin, le couplage du générateur de gaz à une pile à combustible de type SO-FC offre des perspectives d'amélioration du rendement thermique. Mais ceci nécessite de réaliser des progrès très importants pour obtenir des piles à combustible avec une puissance massique suffisante.

<u>Cycle de type CDE ou RDE</u>

L'utilisation de la combustion par détonation permet de simplifier la turbomachine en réduisant le nombre d'étages de compresseur HP et/ou d'augmenter le rendement thermique. Mais du fait de son niveau de TRL de l'ordre de 3, l'utilisation de cette technologie sur le segment SMR ne parait pas envisageable à l'horizon 2050. Des démonstrateurs à l'échelle 1 seraient nécessaire pour lever les risques d'intégration (opérabilité, impact de la structure de l'écoulement en sortie de chambre de combustion sur le rendement de turbine HP, émissions, bruit…) et s'assurer du bénéfice fuel burn.

<u>Propulsion électrique alimentée par une pile à combustible</u>

L'utilisation de PaC de type PEM pour actionner des moteurs électriques présente un potentiel d'amélioration du rendement thermopropulsif comparé à un turboprop conventionnel. Par ailleurs, elles fonctionnent à faible pression (inférieure à 2 bar),

ne produisent pas de NOx et l'eau produite peut être captée au moins partiellement.

La supraconductivité haute température permet d'accéder à des valeurs de puissance massique très élevées au niveau du câblage et des moteurs. Par ailleurs, les PEM qui sont utilisées pour les véhicules terrestres fonctionnant avec H_2 devraient connaitre des développements importants dans les années à venir.

Annexe 4 - Enjeux liés à l'usage du LH2

En guise de première liste des principales questions à prendre en compte, on peut identifier les éléments suivants.

Enjeux inhérents aux caractéristiques physiques et chimiques de l'hydrogène

• Large plage d'inflammabilité : 4 % à 75 % de concentration dans l'air (réaction très réactive avec l'oxygène), 4 % à 94 % en fonction du pourcentage volumique d'hydrogène dans l'oxygène.

• Allumage à faible énergie minimale (~0,02 mJ, contre ~0,3 mJ pour le méthane, c'est-à-dire ~1/15 d'effort pour s'enflammer ; étincelles d'électricité statique ~1mJ) ; large gamme de mélanges combustibles air-carburant.

• Vitesse de flamme plus élevée (~3 m/s, contre 0,45 m/s pour le méthane), entraînant une détonation avec onde de choc.

• Faible visibilité des flammes en cas d'incendie.

• Flottabilité, faible densité, haute perméabilité, faible viscosité, extrêmement diffusif = vulnérabilité aux fuites et aux rejets accidentels.

Ces caractéristiques, considérées dans leur ensemble, faisant d'incendie et d'explosion les risques associés les plus critiques, impliquent la mise en place de systèmes d'inertage, de purge et de mise à l'air appropriés, ainsi que des procédures associées, des précautions particulières de manipulation (dont le remplissage des réservoirs d'hydrogène) et la mise en place de protections spécifiques. Certaines exigences de conception portent par exemple, sur les dispositifs de prévention des pannes, le détrompage des connecteurs, l'étanchéité au serrage des connecteurs à sécurité intégrée, le dimensionnement structurel approprié au niveau global de l'avion et pour les réservoirs d'hydrogène, avec une étanchéité et une isolation appropriées des réservoirs et des systèmes). Les précautions correspondantes doivent être appliquées tout au long de la chaîne de conception, depuis l'architecture globale jusqu'aux composants élémentaires. Une conception bien pensée comprenant des fonctionnalités de sécurité intégrée peut apporter le niveau de fiabilité ciblé des systèmes plus efficacement que l'application très stricte de règles avec des œillères.

De plus, il y a des effets importants à prendre en compte, causés par la vulnérabilité au ballottement de l'hydrogène liquide sous des accélérations et des angles d'inclinaison variables de l'avion, y compris éventuellement des événements de turbulence importants, lorsque des phénomènes thermodynamiques rapides sont impliqués (séquence de LH2 en contact avec les parois chaudes du réservoir, surpression brutale, refroidissement), nécessitant le contrôle des variations de pression de LH2 résultantes. En lien avec ces phénomènes, la précision du jaugeage du LH2 dans les réservoirs est un défi ; il devrait être possible de surmonter le problème de sécurité potentiel correspondant, mais avec un impact potentiel sur les marges et les performances globales.

a. Une capacité à fragiliser les métaux, y compris l'acier et les métaux soudés : cela rend la fabrication des réservoirs difficile, limite le choix des

métaux et alliages utilisés dans la fabrication des pièces en contact avec l'hydrogène liquide (y compris les réservoirs, les tuyaux, les vannes, les pompes, sur les avions et moteurs), et est très susceptible de nécessiter des procédures de maintenance et de révision spécifiques (par exemple, en ce qui concerne la détection des défauts de protection thermique, la détection des fissures des pièces métalliques, la réparation, la validation).

b. Basse température, liquéfaction/solidification des gaz inertes et des constituants de l'air (atmosphère enrichie en oxygène), avec de multiples implications systémiques, en combinaison avec les risques de fuites et de givrage des pièces.
c. Haute réactivité en présence de chlore, d'eau et d'autres substances.

D'autres situations, par exemple en relation avec un décollage interrompu, un atterrissage d'urgence et un atterrissage forcé, doivent également être prises en compte pour leurs conséquences potentielles spécifiques, associées à de fortes décélérations, des dommages structurels, des fuites d'hydrogène, etc.

Le dimensionnement et le fonctionnement corrects des systèmes et des équipements doivent être étayés par des analyses de pannes et de pannes, vérifiés et validés par des simulations et des tests adéquats au niveau approprié, couvrant l'ensemble du domaine de vol et toutes les circonstances potentielles.

De nombreux protocoles de sécurité doivent être pris en compte, dans les activités liées à la production, au stockage, au transfert et à l'utilisation de l'hydrogène.

On notera qu'il est difficile de catégoriser ces enjeux en termes de criticité ou de difficulté de prise en charge/résolution, d'impact sur les produits ou d'autres répercussions. Cela dépend de nombreux facteurs qui restent à explorer en profondeur, du véhicule considéré et de ses caractéristiques de conception individuelles.

En outre, de nombreux risques doivent être considérés conjointement : par exemple, les risques liés aux fuites, aux fissures non détectées, à la perte d'intégrité/d'efficacité de l'isolation thermique, aux flammes, au retour de flamme, au feu, à la déflagration, à la détonation ou à l'explosion, pour des causes évidentes.

Certains problèmes généraux (par exemple, la plage d'inflammabilité) doivent être décomposés en problèmes spécifiques en fonction de la zone et de la pièce affectée (moteur, structure, système, équipement, composant), des circonstances (exploitation au sol ou en vol, maintenance, autres).

Dans l'ensemble, il y a de multiples impacts combinés à traiter, qui sont liés et s'aggravent avec les risques et problèmes potentiels de sécurité : ceux-ci affectent plus ou moins directement la conception, la fabrication, les procédures opérationnelles des aéronefs et des systèmes de propulsion dans toutes les phases des activités au sol et dans vol, procédures de maintenance, infrastructures aéroportuaires, délais d'exécution, pièces de rechange, liste d'équipement minimum, consommation de LH2, coûts d'exploitation, productivité des avions, qualification et formation du personnel, etc., enfin tout le modèle économique du système aérien.

Il existe des problèmes de sécurité supplémentaires spécifiques à l'utilisation de l'hydrogène, concernant des sujets extérieurs à la certification des aéronefs, et qui doivent être couverts par d'autres réglementations locales (aéroportuaires), nationales,

régionales (européennes) et internationales, gérées par les autorités compétentes. Il est supposé que certaines situations d'interface existent déjà aujourd'hui entre les autorités de certification des aéronefs et les autres autorités impliquées, néanmoins, une revue approfondie de toutes les interfaces potentielles devra être menée dans le nouveau contexte impliquant l'utilisation de l'hydrogène, afin d'assurer une couverture complète des tous les problèmes potentiels, y compris les nouveaux, avec toutes les exigences et procédures nouvelles ou révisées nécessaires, documentées comme il convient, pour identifier toutes les interactions et s'assurer qu'il ne reste aucun point non couvert.

Au niveau européen, dans le domaine de la Recherche, le CHJU, Clean Hydrogen Joint Undertaking, a publié son programme de travail pour 2022 qui prend clairement en compte les aspects de sécurité et a prévu des thèmes de recherche qui lui sont dédiés : « Il soutiendra également deux thèmes avec pour objectif d'accroître le niveau de sécurité des technologies et des applications de l'hydrogène. Un sujet examinera les aspects de sécurité de la manipulation de l'hydrogène liquide dans les espaces publics et un autre examinera l'impact de l'injection d'hydrogène sur les composants du réseau de transport et de distribution de gaz (T&D) et sur tous les utilisateurs finaux connectés à l'infrastructure gazière. .xx p.37). Le programme de travail du CHJU mentionne la contribution du Centre commun de recherche de la Commission européenne (JRC) à la sécurité et à la sensibilisation à la sécurité, en lien avec les travaux du Groupe européen sur la sécurité de l'hydrogène (EHSP) lancé en 2017.

Annexe 5 - Approche des risques en termes probabilistes (approche FAA et EASA)

Pendant des années, les systèmes avions ont été évalués selon des exigences spécifiques, selon le critère de la « défaillance unique » ou selon le concept 'fail-safe'. Au fur et à mesure que les avions de nouvelle génération se développaient, davantage de fonctions critiques pour la sécurité devaient être exécutées, ce qui résultait généralement en une augmentation de la complexité des systèmes conçus pour exécuter ces fonctions.

Les dangers pour l'avion et ses occupants qui pourraient survenir en cas de perte d'une ou plusieurs fonctions assurées par un système ou de dysfonctionnement de ce système devaient être pris en compte, ainsi que l'interaction entre des systèmes remplissant des fonctions différentes. Cela a conduit au principe général selon lequel une relation inverse doit exister entre la probabilité d'une condition de panne et son effet sur l'avion et/ou ses occupants. Lors de l'évaluation de l'acceptabilité d'une conception, il a été reconnu que des valeurs de probabilité rationnelles devraient être établies.

Les preuves historiques indiquaient que la probabilité d'un accident grave dû à des causes opérationnelles et liées à la cellule était d'environ un par million d'heures de vol. De plus, environ 10 % du total ont été attribués à des conditions de panne causées par les systèmes de l'avion. Il semble raisonnable que les accidents graves causés par les systèmes ne devraient pas avoir une probabilité plus élevée que cela dans les nouvelles conceptions d'avions. Il est raisonnable de s'attendre à ce que la probabilité d'un accident grave résultant de toutes ces conditions de défaillance ne soit pas supérieure à un pour dix millions d'heures de vol ou 1 × 10-7 par heure de vol pour un avion nouvellement conçu.

La difficulté est qu'il n'est pas possible de dire si l'objectif a été atteint tant que tous les systèmes de l'avion n'ont pas été collectivement analysés numériquement. Pour cette raison, on a supposé, arbitrairement, qu'il existe une centaine de conditions de défaillance potentielles dans un avion, qui pourraient être catastrophiques. La probabilité moyenne admissible cible par heure de vol de 1 × 10-7 a donc été répartie également entre ces conditions de défaillance, ce qui a donné lieu à une attribution d'au plus 1 × 10-9 à chacune. La limite supérieure de la probabilité moyenne par heure de vol pour les **conditions de défaillance catastrophique serait de 1 × 10-9**, ce qui établit une valeur de probabilité approximative pour le terme « **extrêmement improbable** ». Des conditions de défaillance ayant des effets moins graves pourraient être relativement plus susceptibles de se produire.

Annexe 6 - Leçons tirées des lanceurs spatiaux

Une mission Ariane ne dure que 30 minutes. Avec des phases balistiques longues (jusqu'à cinq heures) et des réallumages multiples, la question des ergols cryogéniques a déjà été largement explorée. Par exemple, pour le lancement du télescope spatial James Webb il y a un an, il a fallu démontrer à la NASA que les ergols résiduels dans l'étage après l'injection ne risquaient pas de provoquer une collision avec le satellite lors de son transfert vers le point de Lagrange (plusieurs semaines de coexistence entre un morceau de lanceur et le satellite de 10 milliards de dollars, la seule source d'énergie étant la vaporisation d'hydrogène liquide, les fuites naturelles plus ou moins contrôlées, etc.). Ces demandes étaient à 10-9.

La démarche de construction de Sûreté Opérationnelle d'Ariane 5 s'applique à tous les systèmes complexes, y compris l'aviation civile. La différence dans la conception, puis la fabrication résulte des objectifs que nous nous sommes fixés. Si on évacue la zone de lancement, c'est parce que cela permet de démontrer plus facilement que le risque de tuer une personne dans cette phase est inférieur à 10-7. On peut fixer l'objectif à 10-9, ça ne change pas l'approche ; il ne fait que compliquer une solution possible (par exemple une zone d'évacuation plus importante, ou des liaisons particulièrement étanches en dehors de l'état actuel de la technique).

L'avantage d'Ariane (pour l'hydrogène liquide) est d'avoir un ensemble d'événements pour lesquels la technique, la technologie et l'environnement industriel qui ont conduit à des risques avérés ont été résolus pour démontrer 10 -7. C'est à l'aéronautique de prendre le relais et non pas de réinventer ces risques (en les découvrant par hasard) mais de démontrer 10-9, au moins dans ces cas.

Annexe 7 - Statistiques des accidents LH2 dans les installations industrielles

Malheureusement, on ne peut pas prétendre qu'il n'y aura jamais d'accidents ou d'incidents graves liés à l'utilisation de l'hydrogène. D'autant plus pour une aviation dont la sécurité nécessite de démontrer des probabilités de risques catastrophiques (c'est-à-dire entraînant des décès) inférieures à 10-9 par heure de vol, et ce partout dans le monde, quel que soit le personnel contribuant à cette sécurité.

Sur une période de 12 ans (1965-1977), il y a eu 409 accidents liés à l'utilisation de l'hydrogène, dont 85 pour l'hydrogène liquide (LH2).

Dans le document « Handbook of Hydrogen Safety : Chapter on LH2 Safety », le chapitre 5 (pages 112 à 119) propose une analyse exhaustive de ces accidents et de leurs causes. En résumé :

- les fuites ou purges et un dégazage insuffisant conduisent généralement à des incendies
- les réservoirs doivent être extrêmement bien isolés thermiquement
- les chocs thermiques dus à des ravitaillements trop rapides entraînent des ruptures de canalisations ; d'où des procédures assez longues de refroidissement des circuits
- le taux de remplissage du réservoir ne peut pas être de 100 % : il faut se limiter à 90 %
- si de l'air pénètre dans les circuits, il gèlera et provoquera un colmatage.

Toutes ces informations sont bien connues des acteurs du domaine spatial où des procédures spécifiques ont été adaptées depuis plusieurs décennies.

Par exemple, le refroidissement d'Ariane avant le lancement prend plusieurs heures et la zone de lancement est entièrement évacuée lors du remplissage des ergols cryogéniques (LH2 et LOx).

Annexe 8 - Besoin d'une équipe d'architectes système

Le développement de la science appliquée, notamment dans un environnement industriel, conduit le plus souvent à juxtaposer ou à additionner des spécialistes (des experts) dans les différentes disciplines techniques à mettre en œuvre pour optimiser le « système », objet de l'ambition initiale du projet.

Chacun des experts recherche une optimisation dans son domaine d'excellence au risque (certain) de compliquer la tâche de son collègue sans que l'un et l'autre en aient toujours conscience, surtout si leur vision, par essence locale, est altérée par une obligation légitime à court terme de réduction de coût ou de planning.

C'est dans les phases finales d'activités (intégration, certification, industrialisation) que ces dysfonctionnements sont constatés conduisant le plus souvent à des retards importants, des surcoûts significatifs, parfois à un arrêt du projet.

Cette observation est une conséquence de la complexité actuelle de certains projets industriels qui ne sont plus maîtrisables par un simple individu (ou un groupe réduit d'individus) et nécessitant, en toute circonstance, une capacité à organiser une confrontation entre le local (celui de la technologie, celui de l'expertise, celui du domaine sous-traité) et le global (le maitre d'œuvre, l'architecte, le système) pour prendre non pas la meilleure décision, mais la moins mauvaise dans le contexte incertain « local – global » du moment où cette décision doit être prise. Le système qui en résulte n'est pas forcément l'image parfaite de l'ambition initiale mais il répond certainement aux objectifs fondamentaux et surtout il est « fabricable » et immédiatement utilisable.

L'utilisation de l'hydrogène liquide pour remplacer des combustibles fossiles, d'une manière plus générale le défi écologique consistant à adapter et à changer les mécanismes de transformation des sources d'énergie disponibles, ne pourront être surmontés que si des ingénieurs sont formés à cette approche multi- disciplinaire pour mieux les comprendre, à en identifier les risques locaux et globaux et à arbitrer en toute connaissance de cause.

Annexe 9 – Aperçu de l'existant et des programmes de R/D pour la certification LH2

Un certain nombre de réglementations/normes existent au niveau international (telles que ISO/TR 15916:2915[4]), en Europe et en France (comme NF M58-[5]), liées à l'utilisation de l'hydrogène, y compris sous forme liquéfiée, dans l'industrie et dans le secteur automobile. Certaines sont encore en développement. La situation est aujourd'hui moins avancée pour la réglementation concernant l'utilisation du LH2 dans le secteur aéronautique, mais elle est appelée à progresser rapidement, compte tenu de la croissance rapide des études y afférentes.

De nombreux problèmes de sécurité, tels qu'ils peuvent s'appliquer au secteur de l'aviation, se traduisent directement par des problèmes de réglementation et de certification au sein de ce secteur, puisque la certification de type d'aéronef (ou de moteur) vise par définition à garantir un niveau de sécurité et réclame des exigences et des analyses de sécurité. Cette correspondance biunivoque entre les questions de sécurité et les questions de certification est vraie au niveau des aéronefs (y compris au niveau du système de propulsion) dans tous les domaines, y compris la documentation. C'est évident, par exemple, en termes de certification des moteurs et des aéronefs, en ce qui concerne l'ingestion d'oiseaux ou l'éclatement des aubes du rotor.

Au niveau européen, dans le domaine de la Recherche, le CHJU, Clean Hydrogen Joint Undertaking, a publié son programme de travail pour 2022 qui prend clairement en compte les aspects de sécurité et a prévu des thèmes de recherche qui lui sont dédiés : Il soutiendra deux thèmes avec pour objectif d'accroître le niveau de sécurité des technologies et des applications de l'hydrogène. Un sujet examinera les aspects de sécurité de la manipulation de l'hydrogène liquide dans les espaces publics et un autre examinera l'impact de l'injection d'hydrogène sur les composants du réseau de transport et de distribution de gaz (T&D) et sur tous les utilisateurs finaux connectés à l'infrastructure gazière. .xx p.37). Le programme de travail du CHJU mentionne la contribution du Centre commun de recherche de la Commission européenne (JRC) à la sécurité et à la sensibilisation à la sécurité, en lien avec les travaux du Groupe européen sur la sécurité de l'hydrogène (EHSP) lancé en 2017.

Dans le domaine réglementaire relatif au transport aérien, il existe en effet un grand chantier ouvert, qui devra intégrer et/ou développer :

- des normes spécifiques à l'aviation (pour compléter celles existantes et en générer de nouvelles le cas échéant pour intégrer pleinement tous les aspects concernant

[4] ISO/TR 15916:2015: ISO/TR 15916:2015 provides guidelines for the use of hydrogen in its gaseous and liquid forms as well as its storage in either of these or other forms (hydrides). It identifies the basic safety concerns, hazards and risks, and describes the properties of hydrogen that are relevant to safety. Detailed safety requirements associated with specific hydrogen applications are treated in separate International Standards.

[5] AFNOR NF M58-003: covers the safety requirements relative to the installation of equipment for hydrogen production, equipment operating with hydrogen, hydrogen distribution systems, hydrogen storage containers, hydrogen pipes and their accessories.

l'utilisation de l'hydrogène), relatives aux composants, équipements et systèmes, normes auxquelles la réglementation se réfère et s'appuie (telles que SAE ARP4754 et SAE ARP4761, qui fournissent des "considérations de certification pour les systèmes d'aéronef hautement intégrés ou complexes").

- Un examen approfondi de l'ensemble de la réglementation aéronautique en vigueur, y compris les exigences de navigabilité EASA CS2 (Large Aircraft), CS25-130 (System Design and Analysis), CS (Engines), pour vérifier tout ce qui doit être complété, adapté, corrigé, ajouté ainsi que de nouvelles conditions spécifiques, méthodologies, moyens de mise en conformité, processus équivalents.

- L'ensemble des politiques, plans (par exemple, le Plan mondial pour la sécurité de l'aviation : GASP), normes et pratiques recommandées (SARP), manuels, orientations et autres documents et rapports élaborés par l'OACI refléteront nécessairement les aspects spécifiques liés à l'hydrogène dans le transport aérien.

Annexe 10 - Projets Airbus

Annexe 10.1 Regional short-haul concept

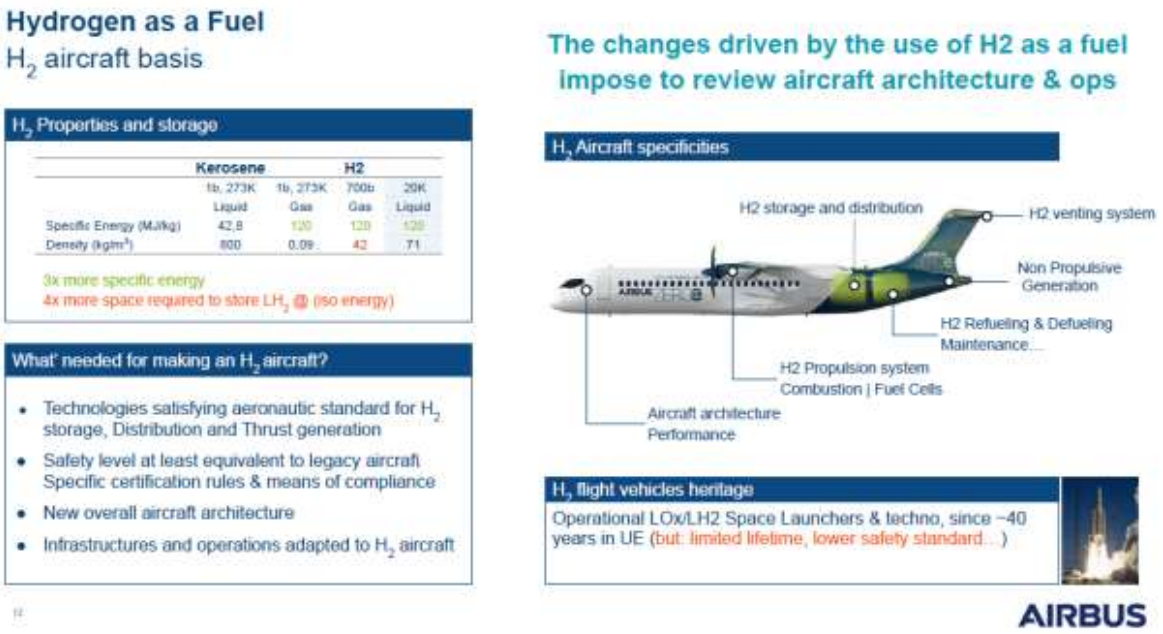
Guillaume Faury, PDG d'Airbus dans son interview avec Aviation Week du 5 juillet 2022 a déclaré :

However, the liquid hydrogen-powered aircraft Airbus plans to develop for 2035 will not be a direct replacement of today's single-aisle products. "Our first aircraft will probably be near the smaller size [of less than 100 passengers with a range of 1,000 nm], but it's just my guess, not the conclusion of the study," Faury says. "It is going to be more regional." Faury also pointed to the fact that "a very large number of flights are below 1,000 nm."

The narrowing down of the first aircraft in Airbus' ZEROe program to a regional profile would still leave a requirement for a potentially conventional replacement of today's large narrowbodies in the 2030s.

In spite of the technology challenges, Faury remains strongly supportive of hydrogen as a future fuel. "Will it be a big share of the carbon savings by 2050? No, it will still be small, there will be initially one plane and to be there in 2035 we need to start now," he says. "[But] at the end of the century, hydrogen will be a very significant part of the fuels we are using."

La complexité du développement des aéronefs hydrogène, ainsi que le nécessaire développement concomitant de la logistique associée font que le premier développement commercial pourrait concerner un concept d'aéronef **régional** voire "**super régional**" d'une capacité de 100 pax et d'un rayon d'action de l'ordre de 1000 NM pour mise en service vers 2035.



Le gain sur les émissions d'autres gaz à effet de serre direct ou indirect (NO, NO_2, CH_4, O_3) lié à l'utilisation de LH_2, reste à être évalué.

L'introduction de tels avions dépendra d'efforts considérables de R&D et du développement de structures de production d'hydrogène et d'avitaillement aéroportuaire sur des aéroports internationaux mais aussi régionaux.

Selon une source : *'Si ces avions ne comptent que pour un peu moins de 25% des émissions de CO_2, ils pourraient présenter un intérêt en termes de politique locale de transports mais aussi de marché, notamment en Europe (environ 75% des vols font 1000 NM ou moins, mais transportent de 150 à 200 pax). En particulier des compagnies low cost comme Easyjet ou Ryanair pourraient s'y intéresser'*.

https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2022/19-07-2022-easyjet-and-rr-pioneer-hydrogen-engine-combustion-technology-in-h2zero-partnership.aspx

'*Ces avions pourraient répondre aux éventuelles politiques de restriction de vols qui pourraient être mises en place au niveau local en présentant une alternative zero CO_2* '.

Le Mercure, avion qui visait le marché des étapes de moins de 1000 km n'a été produit qu'à 10 exemplaires et utilisé uniquement par Air Inter. Lancé par Dassault en 1969 avec l'aide de l'Etat, au vu de la répartition des vols courts et moyens courriers (90% des vols de moins de 1000km), il s'est avéré que les compagnies aériennes ont préféré des avions à utilisation plus polyvalente et à plus long rayon d'action (B737 et A320). Y aurait-t-il une niche hydrogène pour les vols courts ?

Plus la niche H_2 se rétrécit, moins l'investissement en R&D se justifie. Investir dans des avions radicalement nouveaux, fortement différents du reste de la flotte dans leur exploitation, juste pour pallier d'éventuelles restrictions politiques sur quelques vols domestiques ? Ne seraient-ils pas trop petits pour être rentables sur des lignes à fort trafic, trop complexes pour les petites lignes vraiment régionales, inutiles sur les lignes déjà doublées par des TGV efficaces (Paris-Bordeaux, etc).

Puisque les SAF seront disponibles et simples à utiliser par leur capacité 'drop-in', et que "par construction" ils répondront assez bien au besoin de décarbonation, quel serait l'intérêt de mettre ce segment du marché au régime hydrogène ?

Annexe 10.2 Questionnement sur un avant-projet de moyen-courrier à hydrogène

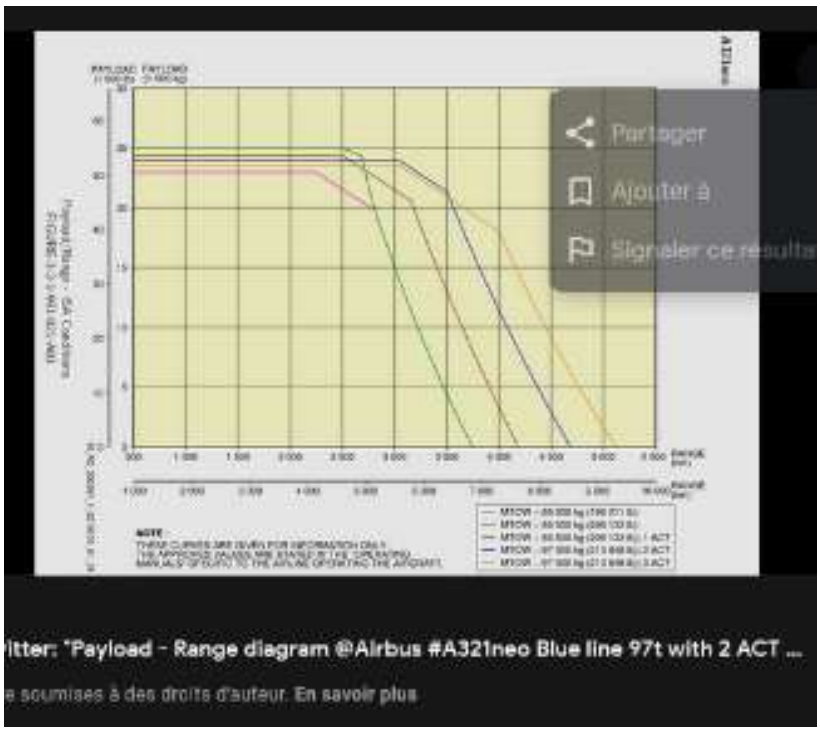
Parmi les trois concepts d'avions à hydrogène présentés par Airbus, un moyen-courrier utilise de l'hydrogène liquide pour alimenter deux turboréacteurs classiques.

En supposant tous les points de définition et de sécurité résolus, un groupe d'ingénieurs de l'AAE/C2E a tenté de réaliser une étude de pré-avant-projet d'un tel moyen-courrier H2 sur la base d'un A321-neo qui serait capable d'étapes de 2000 NM environ avec environ 150 passagers (A321 neo-H2).

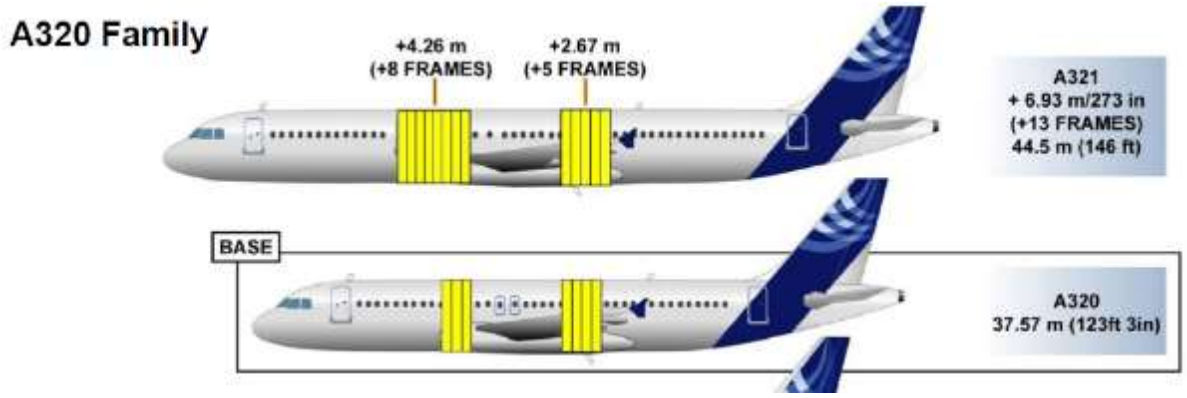
Quelles sont les difficultés de ce type de projet ? Comment peuvent-elles être résolues ? En combien de temps ? Quels seraient les besoins en production d'hydrogène pour avitailler ces avions ? Avec quelle énergie fabriquer cet hydrogène ? Quels seraient les coûts d'utilisation comparés par rapport à l'utilisation de SAF ? En quoi cette solution apporterait-elle une meilleure réponse que les SAF aux défis climatiques et économiques du transport aérien ?

Caractéristiques estimées de l'A321 neo-H2 (valeurs à confirmer)

- Masse maximale au décollage (MTOW) = 97 t (celle de l'A321 neo)
- Masse à vide = 46.3 t (celle de l'A321 neo) + Δ modifications LH2
- Payload/Range avec Jet-A1 → 4200+ NM pour 13.5 t pax avec 26 t de carburant



Propulsion 2*LEAP ou 2*PW1100 modifiés pour utiliser H2. Poussée ~2*145 kN
On suppose que LH2 peut être embarqué sur une longueur d'environ 10 m en supprimant environ 90 à 100 sièges.



Quantité d'hydrogène embarqué : les dimensions internes du fuselage limitent le volume, et donc la quantité d'hydrogène à emporter. Bien que l'hydrogène soit 2.8 fois plus énergétique que le kérosène, il faut tenir compte d'un rendement de la chaîne de propulsion d'au mieux 40%, inférieur au rendement de la propulsion par kérosène estimé à 45%. En conséquence, les 5 tonnes d'hydrogène sont équivalentes à 12 .5 tonnes de kérosène ce qui pourrait permettre des étapes d'un peu plus de 2000 NM (à vérifier).
Architecture de la chaîne de propulsion : l'hydrogène doit être réchauffé et pressurisé à 150 bars avant d'alimenter les réacteurs, ce qui nécessite d'installer des échangeurs d'une puissance de l'ordre de 1 à 2 MW.

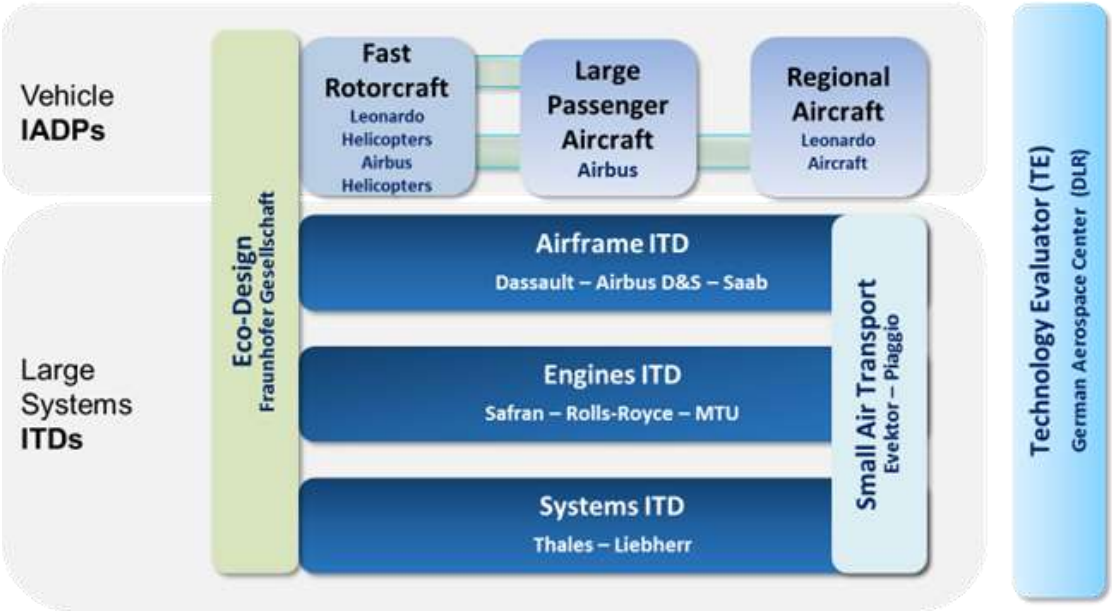
Distances franchissables : Où peut-on aller avec 5 tonnes d'hydrogène ?

Sous réserve d'un bilan de masse qui prenne en compte environ 10 tonnes pour la masse des réservoirs H2 ayant un indice gravimétrique 0.35 (masse d'hydrogène liquide / masse réservoir+LH2), et les delta masses liés à toutes les évolutions des systèmes, des réacteurs et de structure, avec un total qui ne dépasserait pas la masse maximale au décollage des avions actuels il apparaît que ces avions seraient capables de réaliser des étapes d'environ 2000 NM (3700 km), mais avec une capacité d'emport de passagers réduite à environ 150 pax.

Annex 11 - Summary of Clean Aviation JU activities (as of October 2022)

Predecessor: Clean Sky 2 - 2014-2023 - 1755 M€ funding

- CS2 Structure



- Socio-economic impact of the CS2 programm: refer to https://www.clean-aviation.eu/sites/default/files/2022-07/Socio-economic_study_on_the_impact_of_Clean_Sky_2.pdf)

Clean Aviation program (2022-2030)

- Structure: **built** around three key *thrusts*, aiming at technology readiness TRL6 and aircraft EIS 2035:
  - H2 powered aircraft with disruptive enabling technologies
  - Ultra-efficient Short Medium Range aircraft
  - Hybrid-electric Regional Aircraft

- **Targets**

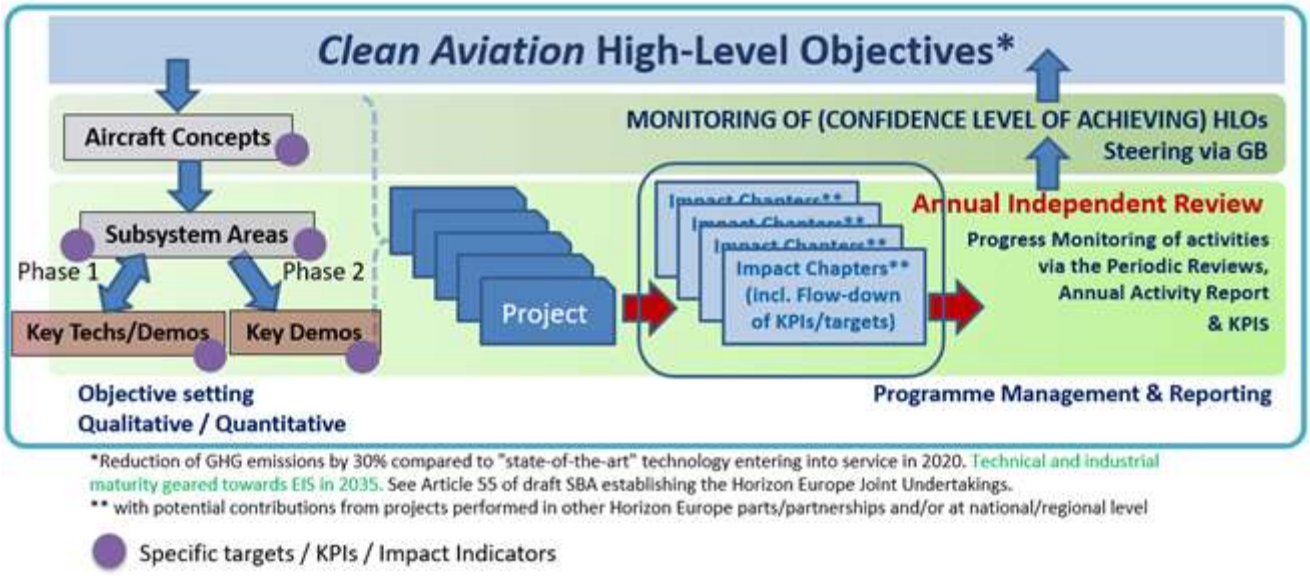
Aircraft Class	Key technologies and architectures validated at aircraft level	Earliest entry into service (EIS)	Fuel burn reduction (technology[1])	Net emissions reduction incl. fuel effect[2]	Current share of air transport emissions
Regional Aircraft	Hybrid-electric, distributed propulsion coupled with highly efficient aircraft configuration	~2035	-50%	-90%	~5%
Short-Medium Range Aircraft	Advanced ultra-efficient aircraft configuration and ultra-efficient gas turbine engines, ultra-high bypass	~2035	-30%	-86%	~50%

1. *defined as fuel burn reduction compared to 2020 state-of-the-art aircraft available for order/delivery*

2. *assumes full use of SAF at a state-of-the-art level of net 80% carbon footprint (or where applicable zero-carbon electric energy).*

- Impact Monitoring Framew

ork (schematic)



*Reduction of GHG emissions by 30% compared to "state-of-the-art" technology entering into service in 2020. Technical and industrial maturity geared towards EIS in 2035. See Article 55 of draft SBA establishing the Horizon Europe Joint Undertakings.
** with potential contributions from projects performed in other Horizon Europe parts/partnerships and/or at national/regional level

Specific targets / KPIs / Impact Indicators

- Overall vision / path to Climate Neutrality
- Programme planning
  - Initiation date : 2021
  - 1st phase ~ 2022-2026 – TRL 4/5
    - 1st call

- Launch: March 2022 – 13 topics covering the 3 thrusts + transverse topics + 1 on coordination
- Indicative funding ~ 736 M€
- Call closure: June 2022 - Evaluation: July-August 2022
- Call outcome: Sept. 2022 - 20 projects retained (see next 2 pages)
- Final project definition & funding TBC by Dec 2022 (projects may start earlier)

- 2nd call
  - Launch: Spring 2023 - Indicative Funding ~ 153 M€
  - Topics considered (TBC subject to CA priorities & gaps analysis further to call #1)
    - LH2 fuel distribution technologies
    - Long Term Disruptive Technologies for Hydrogen-Powered Aircraft
    - Innovative Fuselage/Empennage Design for Hybrid-Electric Regional A/C
    - Digitalisation of the Design Process for Hybrid-electric Regional Aircraft
    - Sustainable Industrialisation of Short Range and Short-Medium Range A/C

- 2nd phase ~ 2026-2030 – TRL 6 (*towards EIS 2035*)

- Reference documents:
  - Call #1 text : CAJU-GB-2022-03-16 Annex-Call-1-topics-descriptions_published.pdf
  - Work prog. 2022-2023: CAJU-GB-2022-03-16-Amended-WP-Budget-2022-23_en.pdf
  - Strategic Research and Innovation Agenda: CAJU-GB-2021-12-16-SRIA_en.pdf

Call #1 Summary (1)							
TOPIC ref	TOPIC title	Indicative Funding M€	TRL (end of project)	Objectives	Proposal acronym	Coordinator	Dur. months /Nb partners
HPA-01	Direct Combustion of Hydrogen in Aero-engines	115	4 - 5		HYDEA	GE Avio	42 / 35
					CAVENDISH	Rolls-Royce	48 / 20
HPA-02	Multi-MW Fuel Cell Prop. System for Hydrogen-Powered Aircraft	50	4 - 5	Power 2 - 4 MW Fuel Cell stack eff ≥ 45%	NEWBORN	Honeywell	42 / 18
					HyPoTraDe	Pipistrel	36 / 6
HPA-03	Large Scale Lightweight liquid H2	10	4 - 5	150 kg LH2, scalable to 600 kg H2	H2ELIOS	Aciturri	36 / 14
					fLHYing	Pipistrel	36 / 5

	Integral Storage Solutions						
HPA-04	Near-Term Disruptive Technologies for Hydrogen Powered-Aircraft	(7 M€ - TRL5) ➔ Call #2					
TBD call#2	LH2 Distribution	➔ Call #2					
HER-01	Multi-MW Hybrid-Electric Prop. System for Regional Aircraft	75	4 – 5	Contribution ≥ 30% GHG emiss & ≥ 50% a/c fuel burn reduction *	AMBER	GE Avio	39 / 22
					HE-ART	RRD	36 / 38
HER-02	Thermal Management Solutions for Hybrid-Electric Regional Aircraft	40	5 (sub-systems)	Min handling capable 1 MW / weight penalty < 30% vs convention.technology	TheMa4HERA	Honeywell	40 / 24
HER-03	Electrical Distribution Solutions for Hybrid-Electric Regional Aircraft	40	5 (sub-systems)	Voltage capability≥ 800 V weight penalty ≤ 20% vs convention.technology Thermal energy eff ≥95%	HECATE	COLLINS	36 / 38
HER-04	Innovative Wing Design for Hybrid-Electric Regional Aircraft	20	5 (overall wing system)	>15% FB reduction (integrated wing level) & contribution to 50% a/c FB reduction * Overall full wing structure weight reduction of 20%	HERWINGT	AIRBUS D & S	36 / 36
TBD call#2	Airframe Integrated Fuselage	➔ Call #2					
Call #1 Summary (2)							
SMR-01	Ultra Efficient Propulsion Systems for Short and SMR Aircraft	175	5 (system level)	Prop. Syst. FB reduction ≥20% & contribution to a/c FB reduction ≥ 30% (extended to 30% GHG emission reduction) *	SWITCH	MTU	36 / 23
					HEAVEN	Rolls-Royce	48 / 20
					OFELIA	SAFRAN	38 / 30
SMR-02	Ultra Performance Wing for Short and SMR Aircraft	55	4 - 5	Increased energy eff 10-13% integrated wet wing level / 15-17% dry wing, contributing to overall a/c FB / GHG reduction of 30% *	Up Wing	Airbus Ops GMBH	42 / 32
SMR-03	Advanced Low Weight Integrated Fuselage and Empennage for SMR (a/c powered by hydrogen)	40	4 (system level)	Fuselage weight reduction > 20% / min a/c energy consumption reduction of 15% and contribution to a/c GHG reduction 30% *	FASTER-H2	Airbus Ops GMBH	39 / 41
TRA-01 **	Architectures and	90		FB reduction ≥ 50% (Regional a/c)	SMR ACAP	Airbus Ops GMBH	42 / 31

	technology integration for A/C concepts		≥ 4 for all key technologies	≥ 30% (SR & SMR a/c) Energy reduction ≥ 15% (for H2 a/c) *	HERA	LEONARDO	48 / 48
TRA-02 **	Novel Certif. Methods & Means of Compliance for disruptive techno.	18	As per roadmap for maturity level to EIS 2035	Time to market & certification cost reductions = 30% * ^	CONCERTO	DASSAULT AVIATION	48
CSA ***	Develop Integrated EU Clean Aviation Regional Ecosystem	0.72	N/A	Foster synergies, networking,coordination, dissemination, etc.	ECARE	Aerospace Valley≥	24 / 4

Académie de l'air et de l'espace
Ancien observatoire de Jolimont
1 avenue Camille Flammarion
31500 Toulouse - France
Tél. +33-(0)5.32.66.97.96
Email : contact@academieairespace.com
academieairespace.com