**Les combustibles du futur pour l’aéronautique et l’Espace**

DV

# Les enjeux environnementaux

# L’impact de l’aéronautique et du spatial sur l’environnement

## L’impact du transport aérien

## L’impact du transport spatial

# Les objectifs et engagements des différents acteurs

# Les alternatives aux combustibles actuels pour l’aéronautique et le spatial:

## Les combustibles de synthèse liquides drop-in ou non

## Les carburants gazeux conventionnels (CH4, H2, ...)

Hydrogène liquide

 Utilisation industrielle de l’hydrogène liquide :

Le japon et la Corée mettent en œuvre des flottes de voitures à hydrogène. Pour les alimenter, le Japon a construit un navire avec une grande citerne d’hydrogène liquide afin de s’approvisionner en Australie, le Suiso Frontier. Il peut embarquer 1250 m3 de LH2 (~80 tonnes).

C’est le prototype d’un navire transportant 4 x 40 000 m3 de LH2 dans 4 sphères isolées sous vide.

Des navires de transport de passagers sont alimentés en hydrogène (liquide ou gaz haute pression ) comme le Hylias (400 kg d’hydrogène HP stocké à bord, 2 moteurs de 250 kW alimentés par pile à combustible) pouvant transporter 200 passagers dans le golfe du Morbihan en 2023.

 Lanceurs

L’hydrogène liquide est utilisé sur les lanceurs depuis plus de 60 ans. L’expérience est très bonne et la technologie bien maîtrisée.

Par contre les quantités produites sont modestes (quelques centaines de tonnes par an par pays utilisateur).

En France, l’usine de Wazier (Air Liquide) est un bon exemple d’unité de liquéfaction.

L’hydrogène est prélevé sur une usine de production d’ammoniac située à proximité.

 La liquéfaction est obtenue en refroidissant l’hydrogène dans des turbines de détente centripètes reliées par des échangeurs à contre-courant.

Kourou met en œuvre actuellement une usine de production d’hydrogène liquide à partir de méthanol produit aux USA.

Pour viser les quantités requises par l’aéronautique (même limitée aux courts- moyens courriers) il faut augmenter les quantités produites de plusieurs ordres de grandeur. Dans cette optique il faudra augmenter le rendement des unités de liquéfaction, qui sont « accusées » de consommer jusqu’à 30% de l’énergie contenue dans l’hydrogène liquide.

Quels sont les postes du liquéfacteur les plus faciles à améliorer ?

* La compression : comme dans le cas de l’hélium, elle est assurée par des compresseurs à vis dont le rendement est de 50% seulement. La vitesse du son dans l’hydrogène ne permet pas en effet d’effectuer une compression par turbomachine à température ambiante.
* Les turbines de détente : elles sont en général freinées par des dissipateurs. On peut récupérer le travail de détente par des moteurs électriques et améliorer ainsi le rendement total.
* La liquéfaction proprement dite : elle est en général effectuée par une détente Joule- Thomson, solution simple mais de faible rendement (détente isenthalpique) . En effet les constructeurs évitent les risques d’une turbine de détente fonctionnant en diphasique. Il y a cependant une solution simple : utiliser une turbine de détente liquide alimentée en fluide supercritique. Il n’y a pas de changement de phase. C’est assez facile avec l’hydrogène.

Hydrogène gazeux haute pression

Comme dans le cas de l’hydrogène liquide, il faudra diminuer les pertes des unités de compression.

L’une des méthodes consiste à partir d’une production d’hydrogène à haute pression (3 à 10 MPa) à l’aide d’électrolyseurs haute pression ce qui diminue l’énergie de compression.

On peut y associer une deuxième méthode. Refroidir l’hydrogène gazeux à 80 K avant compression. La puissance compression sera sensiblement divisée par trois. Un échangeur à contre-courant permet de récupérer l’enthalpie de l’hydrogène comprimé pour pré-refroidir l’hydrogène à comprimer. Il faut cependant absorber la puissance de refroidissement isotherme à 80 K.

Il existe déjà des gazoducs transportant de l’hydrogène gazeux haute pression en Europe (France, Benelux, Allemagne) et aux USA (Louisiane, Texas). Cette tendance est appelée à se développer.

Réfs :

[www.h2-mobile.fr](http://www.h2-mobile.fr) actus Un navire transporteur d'hydrogène liquide présenté au Japon

Afhypac : Mémento de l’Hydrogène FICHE 4.1 LE TRANSPORT D'HYDROGÈNE

Méthane liquide

Contrairement à l’hydrogène liquide, l’expérience industrielle du méthane liquide est vaste. Les quantités manipulées se comptent en centaines de millions de tonnes par an. Les méthaniers les plus récents transportent 160 000 m3 de GNL. Le chargement et le déchargement implique deux ou trois postes par méthanier avec des débits de 3000 m3 / h par poste.

Les usines de liquéfaction occupent une superficie importante (plusieurs centaines de mètres de long). Elles comportent une unité de purification (élimination du CO2 et des composés soufrés) ainsi qu’une séparation méthane / hélium.

De plus, le méthane est beaucoup plus facile à liquéfier que l’hydrogène.

Dans le domaine spatial, le méthane liquide devant alimenter Ariane 7 serait produit en Guyane à partie de biomasse. D’après l’Air Liquide, c’est le moyen le plus simple pour produire du méthane liquide de bonne qualité sans processus de purification compliqué.

Cela pourrait faire école dans le domaine industriel classique.

Dans le domaine aéronautique, la production de GNL à partir de biomasse peut être une solution attractive pour les sites isolés dans les pays en développement (avions de troisième niveau et hélicoptères)

**Défis technologiques associés au niveau avion/ lanceur et moteurs**

**Lanceurs**

La mise en œuvre de l’hydrogène liquide pour les lanceurs est très bien maîtrisée.

Les progrès peuvent être attendus dans deux domaines :

* La simplification de la mise en œuvre du lanceur. On reproche (d’une manière injuste) la complexité de la mise en œuvre d’un lanceur à la mise en œuvre de l’hydrogène liquide. DC-X a été un contre-exemple : ce petit démonstrateur LOX – LH2 à décollage et atterrissage vertical était simplement exploité à partir de camions d’avitaillement du commerce et d’un Shelter.
* Les missions orbitales : le stockage de l’hydrogène sur de longues périodes est la clé pour les missions vers la Lune et Mars. Cela passe par la maîtrise de la technique « Zéro Boil Off » -réfrigération active en orbite – et du transfert d’ergol en microgravité (ou en rotation lente).

**Avions**

Isolation thermique des réservoirs :

Contrairement à un lanceur, on ne pourra pas se satisfaire d’un flux thermique sur le réservoir de 300 W/m2 comme dans le cas d’Ariane 5 (flux thermique total de 100 kW sur le réservoir). Dans le cas d’un avion type A320, il faudra probablement réduire le flux à moins de 20 W/m2. Cela correspondrait à des pertes de l’ordre de 3,5 kW.

Pour cela, il faudra recourir à des techniques d’isolation nouvelles, comme deux couches de nid d’abeille de Nomex ® isolées sous vide et séparées par un balayage (d’azote) à 100 K. Toutes les autres solutions sont trop lourdes (isolation sous vide conventionnelle) ou trop volumineuses (isolation mousse épaisse).

Il faudra diminuer la stratification dans le réservoir, compte-tenu des faibles flux thermiques. On pourra utiliser une technique du genre « Spray bar » pour diminuer cet effet.

Exemple de dimensionnement :

Cas de l’Airbus A 320 :

Pour remplacer 18000 kg de kérosène, il faut 6000 kg de LH2, soit un volume à 0,2 MPa (réservoir) de 95,75 m3 avec un taux de remplissage de 92%. Le réservoir serait situé au-dessus du fuselage (disposition type Cryoplane).

La consommation totale d’hydrogène au décollage est de 1,056 kg/s de LH2, soit 100 fois le débit évaporé par perte thermique. Il faut donc évaporer de l’hydrogène pour maintenir le réservoir en pression.

Avitaillement :

Contraintes réglementaires :

La législation actuelle ne permet pas de remplir un avion en LH2 au pied de l’aérogare.

Il faut :

* Ou bien faire évoluer la législation.
* Ou bien effectuer l’avitaillement dans une zone dédiée loin de l’aérogare.

*Evolution favorable de la législation :*

Il faudra sans doute s’engager en contrepartie à mettre en œuvre des solutions permettant de diminuer le risque d’incident grave en dessous de 10-7, par exemple la mise en œuvre de trois barrières sur les raccords d’avitaillement (deux barrières sur le LH2, une zone sous vide dynamique et une troisième barrière vis-à-vis de l’air), redondance du verrouillage de raccord, etc… .

*Avitaillement dans une zone dédiée*

S’il n’est pas possible d’obtenir un aménagement des règles existantes, il faudra effectuer l’avitaillement en zone éloignée de l’aérogare et sans passager.

Cependant, il n’est pas nécessaire de déplacer tout l’avion si l’on accepte une modification de l’architecture : par exemple, dans le cas d’une configuration type ATR, les réservoirs peuvent être intégrés aérodynamiquement aux fuseaux moteurs et remplis en zone protégée. Il suffit ensuite de verrouiller les deux modules sur l’avion au niveau de l’aérogare.

Une modification plus radicale consiste à intégrer la turbine à gaz dans le fuseau réservoir, cela simplifie aussi les interfaces entre le réservoir et la turbine (qui promettent d’être compliquées). Dans le cas d’un avion hybride à propulsion distribuée, la turbine sera un turbogénérateur électrique.

*Durée de l’avitaillement :*

En prenant l’exemple des lanceurs, le remplissage peut prendre plusieurs heures (le réservoir pour un A 320 est sensiblement de la taille de celui de l’étage supérieur Ariane 6). Il faudra ou bien s’en accommoder (plus d’avions pour la même capacité passager) ou bien prévoir un remplissage plus rapide, source de pertes thermiques supérieures, et de complexité de mise en œuvre.

Exemple de véhicule d’avitaillement :

Pour remplir le réservoir d’un A 320, il faut un moyen sol capable de stocker 100 m3 de LH2

Cela correspond par exemple à une citerne isolée sous vide de 15 m de long et 3,24 m de diamètre externe (donc hors gabarit routier).

 Récupération des vapeurs froides :

Il est probablement hors de question de brûler les vapeurs dans une torchère sur l’aéroport.

On pourra rejeter l’hydrogène gazeux dans un réseau de gazoducs enterrés menant à une installation de torchère ou de re-liquéfaction loin de l’aérogare.

On peut éliminer les vapeurs dans une pile à combustible qui peut alimenter un cryoréfrigérateur.

Pour fixer les idées, dans le cas A 320 les pertes thermiques de 3,5 kW conduisent à un débit évaporé de 8 g/s soit une puissance thermique de l’ordre de 1 MW. Une pile à combustible de rendement 50% fournira une puissance électrique de 500 kW. Avec un cryoréfrigérateur offrant une puissance réfrigérante de 1 W pour 100 W électrique, on obtient une puissance de 5 kW, juste suffisante pour refroidir les vapeurs.

Cette solution a l’avantage d’être autonome (intégrée au camion d’avitaillement).

Il ne semble pas possible de recondenser les vapeurs par de l’hydrogène sous-refroidi.

*Mise en œuvre de l’hydrogène liquide sur l’aéroport :*

Il y a deux possibilités :

* L’hydrogène est transporté sous forme liquide sur l’aéroport
* L’hydrogène arrive sous forme gazeuse par un gazoduc, il est liquéfié sur place.

Si l’hydrogène arrive sous forme liquide, il suffit de le stocker sur place. Pour des raisons de sécurité, il faudra sans doute enterrer le ou les réservoirs (ce qui pose des problèmes de génie civil compte-tenu du volume).

S’il faut liquéfier l’hydrogène sur place, il faudra concevoir une usine compacte et enterrée (pour les mêmes problèmes de sécurité identifiées pour le réservoir) ainsi qu’une alimentation électrique en conséquence.

**GNL :**

Le GNL pose les mêmes problèmes que le LH2 mais avec des contraintes beaucoup plus simples (volume plus faible, température plus facile à maîtriser, contraintes de mise en œuvre rodées sur les terminaux GNL).

# Les synergies entre aéronautique, spatial …et les autres moyens de transport

**LH2 :**

Le LH2 sera utilisé pour avitailler les stations-services fournissant de l’hydrogène gazeux HP aux voitures et de l’hydrogène liquide aux poids-lourds.

La production mondiale va donc fortement augmenter dans les 30 prochaines années.

L’hydrogène « énergie » sera transporté ou bien sous forme liquide (tankers, péniches, semi-remorques, lignes cryogéniques isolées sous vide) ou bien sous forme gazeuse (gazoducs).

Le cas particulier des lignes cryogéniques isolées sous vide mérite un développement particulier, compte-tenu des propriétés thermodynamiques de l’hydrogène, on peut le transporter sur des dizaines de km sans unité de refroidissement intermédiaire, cela a conduit à un concept : combiner le transport d’hydrogène liquide avec des lignes supraconductrices en MgB2, permettant de transporter l’énergie électrique d’un fuseau horaire à l’autre sans perte et ceci sur des milliers de km. Le MgB2 est un supraconducteur beaucoup moins cher que les autres supraconducteurs « haute température » mais sa température critique de 39 K oblige à le refroidir avec de l’hydrogène liquide.

**GNL :**

Le GNL commence à remplacer le fuel lourd pour les porte-conteneurs et les paquebots de croisière. L’objectif est bien entendu de diminuer l’émission de CO2 à puissance donnée et de supprimer les suies et l’émission de SO2.

Il est prévisible que cette utilisation devienne une part notable de la consommation du trafic maritime dans les 30 prochaines années.