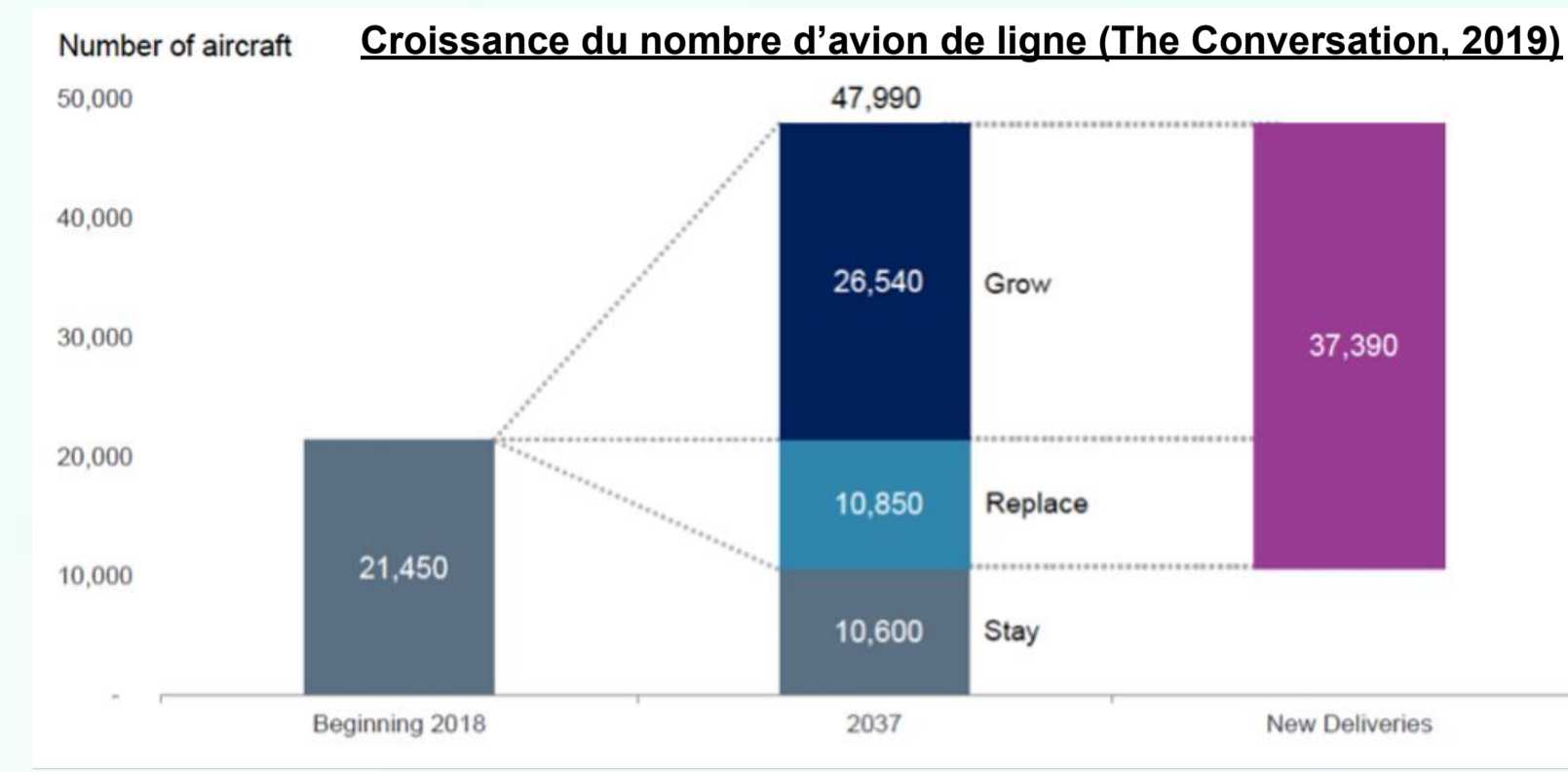


## Pourquoi l'avion à Hydrogène ? Quel sont les objectifs de la filière aéronautique ?



- L'état et le secteur de l'aéronautique se dirigent vers une réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.
- L'état français impose à l'aviation civile française la **neutralité carbone d'ici 2050**.
- L'industrie aéronautique elle promet **seulement une croissance neutre en émissions**.

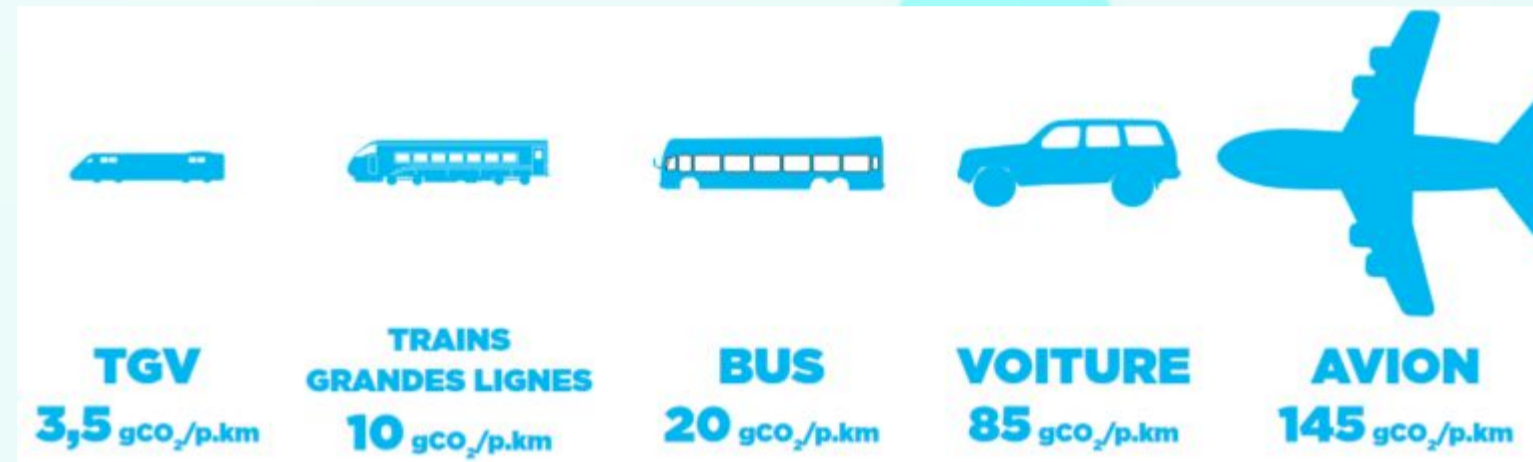


- Utilisation de carburants alternatifs comme l'hydrogène mais ce qui implique de repenser totalement l'avion et les infrastructures au sol
- Penser l'avion électrique, cette solution est écartée tant que le problème du stockage de l'énergie électrique ne sera pas résolu.

Le constat est sans appel: l'industrie aéronautique peine à trouver des solutions viables pour réduire ses émissions.

### Les pistes de réflexions: L'avion à hydrogène privilégié :

- Utilisation de l'intelligence artificielle pour optimiser les procédés déjà existant, notamment dans les systèmes d'injection, solution qui atteindra vite sa limite.
- Trouver de nouveaux matériaux, Safran a déjà arrêté sa R&D.
- Développer les biocarburants, énergie massive deux fois moindre que le kérosène.



Impact environnementale des différents moyens de transport (CO2 In The Air, 2019)

### Quel est l'impact des avions de ligne actuels ?

Principales émissions de l'aviation : CO<sub>2</sub>, les oxydes d'azote, la vapeur d'eau, des aérosols (suie, aérosols sulfatés).

Entre 1960 et 2018, les distances parcourues en avion sont passées de **109 milliards à 8269 milliards de km par an**. Les émissions de CO<sub>2</sub> de 6.8 à 1034 Tg de CO<sub>2</sub> par an.

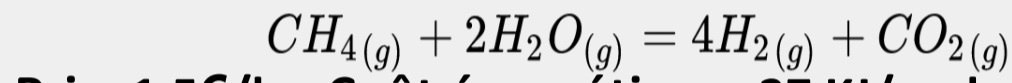
Augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> : 2,2% par an entre 1970-2012 et 5% entre 2012-2018.

**L'hydrogène est quasiment la seule piste à suivre pour construire l'avion zéro carbone d'ici 2050.**

## D'où vient l'hydrogène ?

### - Reformage à l'aide de vapeur d'eau

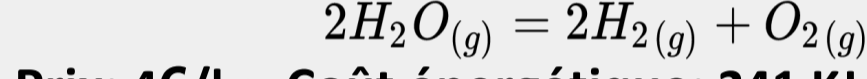
Réaction entre de l'eau et un gaz (souple du méthane):



Prix: 1,5€/kg Coût énergétique: 27 KJ/mol

### - Craquage thermique de l'eau

On "casse" les molécules d'eau en les portant à 2500°C :



Prix: 4€/kg Coût énergétique: 241 KJ/mol

### - Craquage thermique du méthane

On "casse" les molécules de méthane en les portant à 1200°C :



Prix: 1,5€/kg Coût énergétique: 37 KJ/mol

### - Electrolyse de l'eau

Production d'hydrogène en faisant passer du courant électrique dans de l'eau :  $2H_2O(l) = 2H_2(g) + O_2(g)$

Prix: entre 6 et 12€/kg Coût énergétique: 286 KJ/mol

	Reformage	Craquage thermique de l'eau	Craquage thermique du méthane	Electrolyse
<b>Avantages</b>	Coûts de production faibles + Procédé facile à mettre en place. Utilisé pour 95% de la production d'hydrogène mondial	Pas de production de CO <sub>2</sub> Aucun résidu indésirable	Pas de production de CO <sub>2</sub> Possibilité d'utiliser le carbone produit dans l'industrie	Pas de production de CO <sub>2</sub> et aucun "déchet" + L'hydrogène produit est pur contrairement aux autres procédés
<b>Inconvénients</b>	Production massive de CO <sub>2</sub> : 10kg de CO <sub>2</sub> pour 1kg de H <sub>2</sub> produit	Chauffage à 2500°C ce qui demande des infrastructures spécialisée + La production d'oxygène entraîne des risques d'oxydation	Le Carbone solide produit sous forme de Coke a tendance à boucher les conduits ce qui augmente les coûts de maintenance	Demande beaucoup d'énergie électrique, qui est souvent carbonée

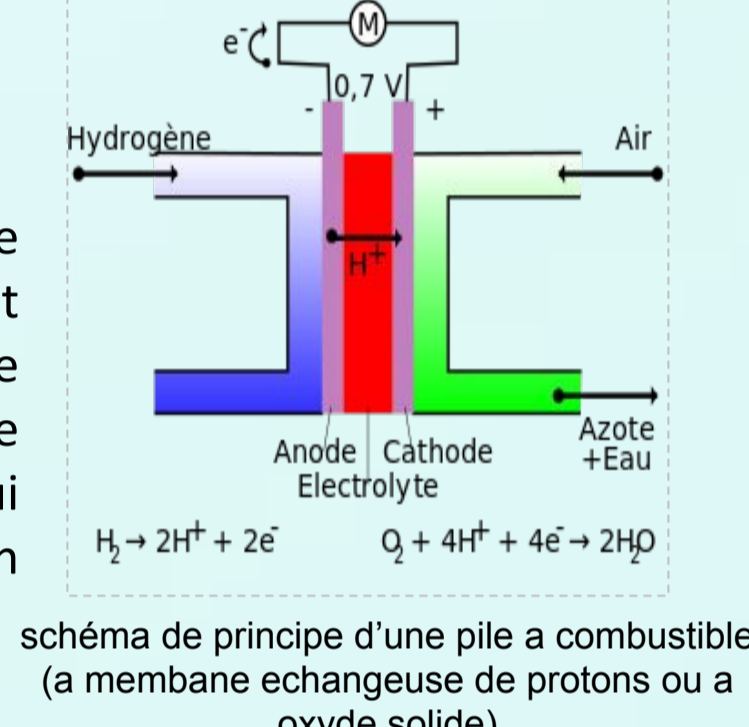
## Comment utiliser l'hydrogène dans les avions ?

### 3 types d'utilisations:

- le brûler directement dans des turbines à gaz modifiées
- le convertir en électricité dans une pile à combustible pour alimenter un moteur électrique
- le combiner à du CO<sub>2</sub> pour produire du kérosène synthétique

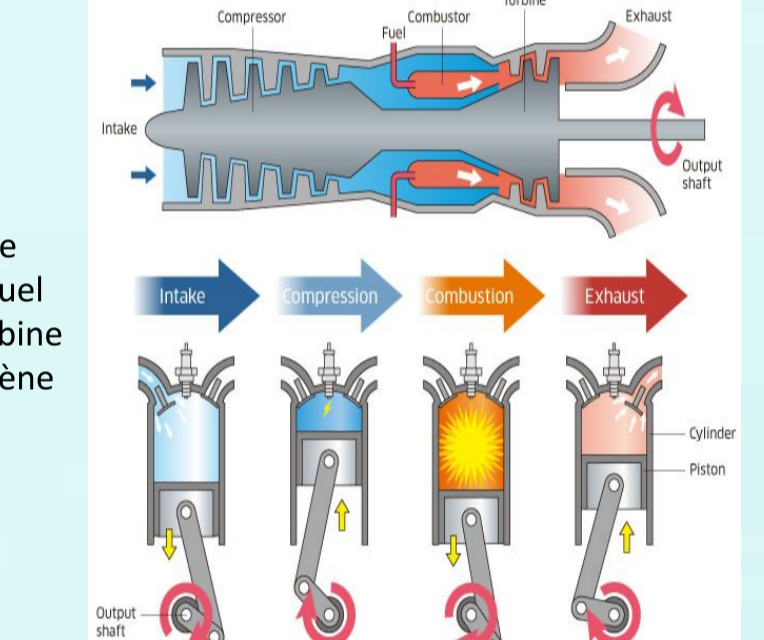
### La pile à combustible:

La pile à hydrogène utilise le dihydrogène et le dioxygène. Il s'agit d'une oxydation contrôlée de H<sub>2</sub> et de O<sub>2</sub> avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur (qui peut être récupérée) selon la réaction chimique de fonctionnement:  $2H_2(g) + O_2(g) = 2H_2O(l)$



### Les turbines:

L'hydrogène peut être brûlé directement dans des turbines à gaz, mais convertir des turbines à gaz pour les faire fonctionner à l'hydrogène implique des ajustements, notamment au niveau du principe d'injection ou de la chambre de combustion.



## Un projet réaliste ?

### Des projets déjà existants

- **Boeing** : Test de moteur à hydrogène pour le vol de croisière
- **Projet de chercheurs** en collaboration avec des industriels : (Fig 1)
- **ZeroAvia** : projet récent et prometteur pour développer le court courrier à hydrogène (Fig 2)



Fig 1 : Projet de recherche d'avion à hydrogène



Fig 2 : Avion existant ZeroAvia, entièrement à hydrogène

### Des projets à venir

- **Element One** : Projet d'avion commercial pour 2025 (Fig 3)
- **Airbus** : trois concepts qui devront voir le jour d'ici 2030 (Fig 4) :
  - Un turboréacteur, semblable à l'A320. L'hydrogène serait stocké dans la partie arrière du fuselage.
  - Un turbopropulseur (à hélices). Avion régional
  - Une aile volante qui permettrait d'adapter la taille et la forme des réservoirs aux contraintes posées par le stockage de l'hydrogène

⇒ Des projets d'avions long courriers existent mais les contours sont encore flous et les objectifs lointains.



Fig 3 : Projet d'avion commercial Element One

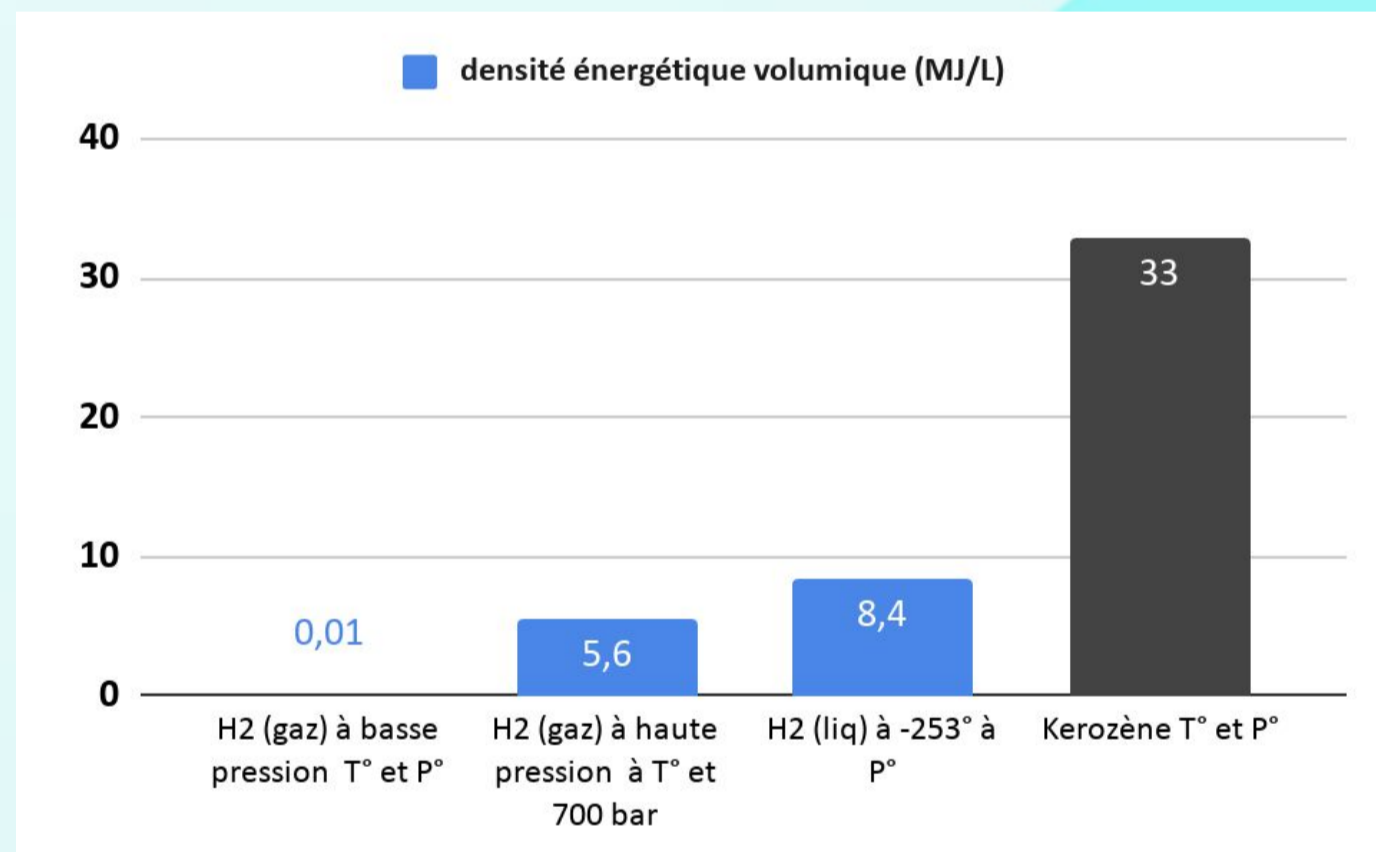


Fig 4 : Trois concepts d'avion à hydrogène Airbus d'ici 2035

### Un contexte économique et politique

- Un secteur de l'énergie prometteur
- Une réponse à la nécessité d'accélérer la transition énergétique
- Un espoir porté par des aides gouvernementales :
  - En France : plan d'investissement à 7,2 milliards d'euros pour l'hydrogène
  - Au Royaume-Uni, le plan Hyflyer pour décarboner les petits avions de transport et le projet Conseil Jet Zero dont l'ambition est de réaliser le tout premier vol passager long-courrier zéro émission.

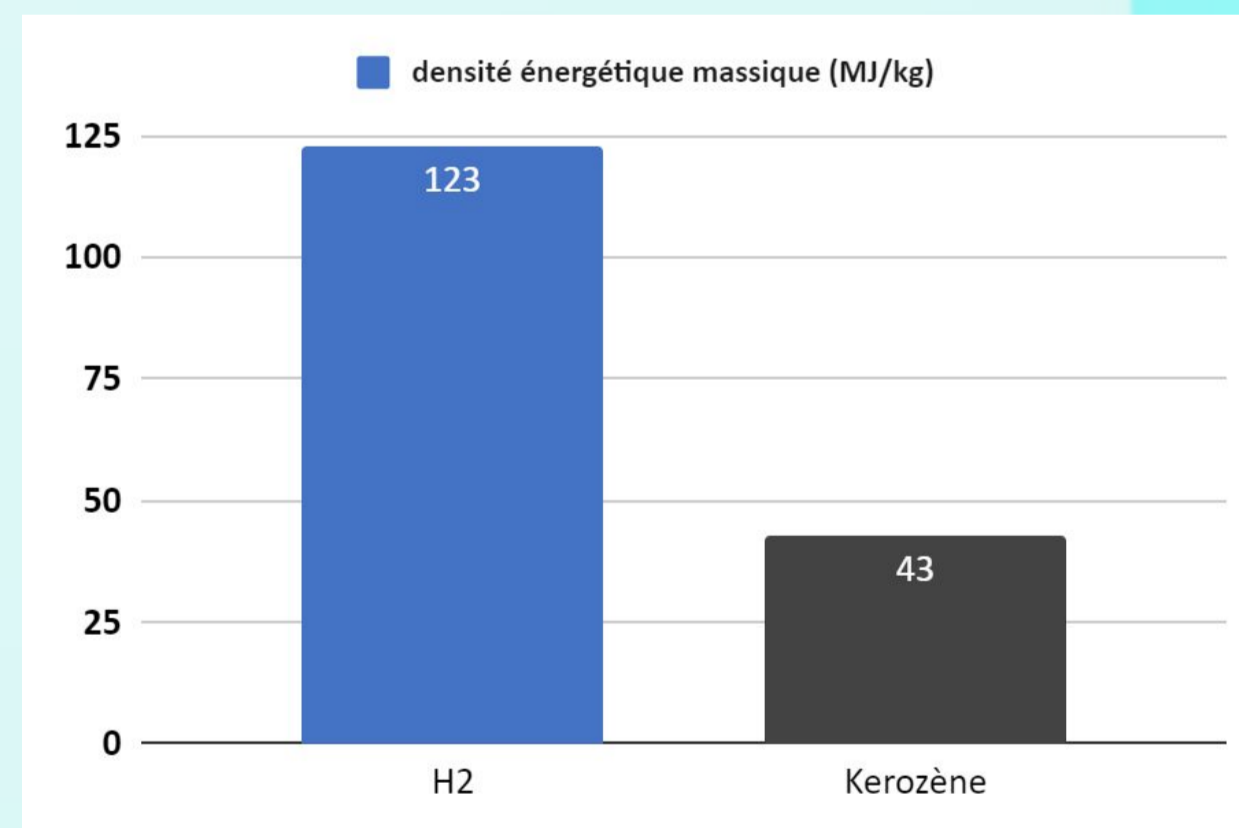
## Comment stocker l'hydrogène ?



### L'hydrogène :

- forte densité énergétique massique
- très faible densité énergétique volumique à l'état standard.

Afin qu'il soit viable dans l'utilisation aérienne, il faut augmenter cette dernière densité au maximum. → nouvelle contrainte sur sa forme de stockage.



On retiendra principalement un stockage liquide pour le secteur aérien, car le volume et la masse sont les facteurs prépondérants sur les autres. Cependant : le stockage liquide prend en moyenne 4x plus de volume que le stockage classique de kérosène.

→ la conception des avions devra être modifiée si l'on veut pouvoir effectuer des long-courriers.

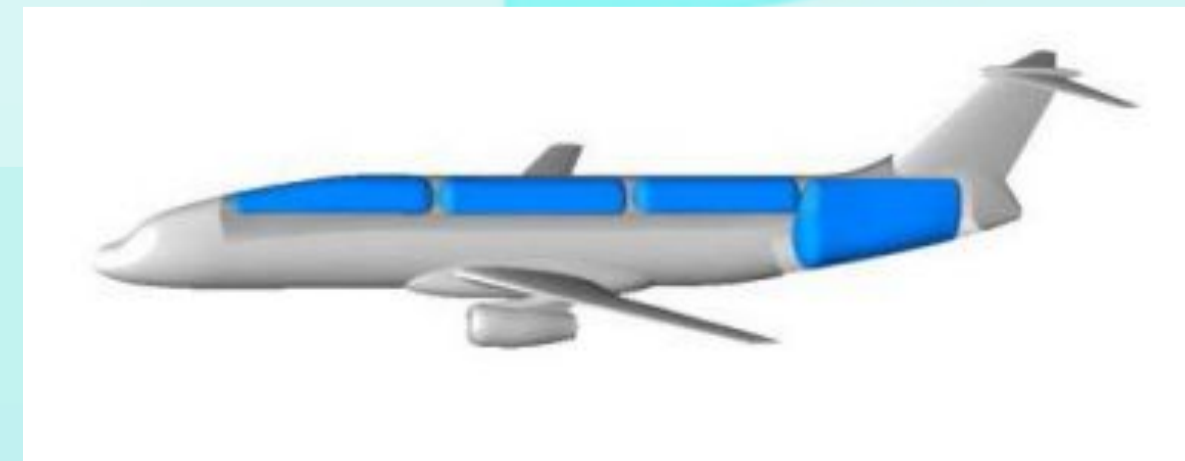


Figure 5 : Emplacement potentiel des réservoirs d'H<sub>2</sub>. Source : Airbus

Les différentes options qui s'offrent à l'aviation sont l'hydrogène comprimé à 700 bars ou l'hydrogène liquide à -253°C, les batteries ne possédant pas une densité énergétique suffisante, et les autres technologies étant encore trop précoces. [1]

	H <sub>2</sub> liq	H <sub>2</sub> comprimé (700 bar)
Densité volumique énergétique	++	--
Perte d'énergie due à la transformation	30%	10-15%
Réservoir	Sa masse représente 80% de la masse totale du stockage	Sa masse représente 85% de la masse totale de stockage.
Sécurité	Gaz à basse pression (<10 bar) sécurisé	Gaz à très haute pression peut être dangereux
Potentiel futur	Technologie innovante, sujette à de nombreuses avancées.	Technologie déjà mature, qui ne va plus énormément évoluer.

→ Pour que l'hydrogène liquide soit viable, la masse du réservoir doit être réduite de 50% par rapport aux prototypes actuels. [2]

## Verdict : L'avion à hydrogène n'est pas viable, mais c'est la seule piste à creuser à ce jour pour réinventer l'aviation civile.

Bien que le projet semble faisable pour les court-courriers, il reste des avancées technologiques majeures à effectuer afin de rendre l'avion à hydrogène viable, notamment en ce qui concerne le volume des réservoirs, la production massive de H<sub>2</sub>, et la logistique de transport et de stockage.

Néanmoins, la raréfaction des ressources en pétrole et la réduction des émissions de gaz à effet de serre vont imposer l'avion à hydrogène aux générations futures à moins de découvrir de nouvelles technologies.

L'avion à hydrogène est donc plus une promesse qu'une réalité: il permet à l'industrie aéronautique dans garder la face dans la lutte contre le réchauffement climatique.

