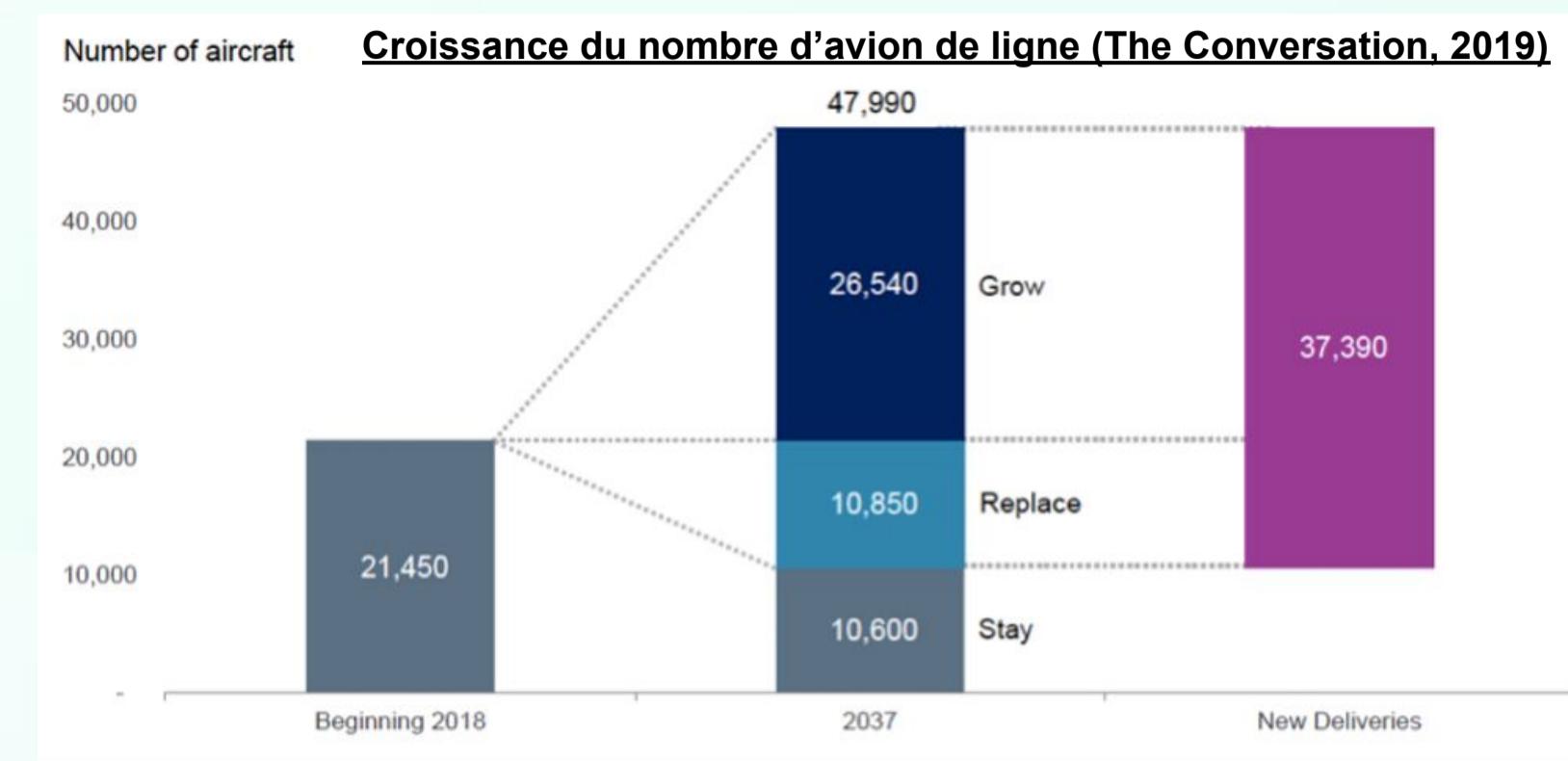


Avion à Hydrogène : espoir ou greenwashing ?

Ralf CORTES, Pierre BEAULIEU, Salomé GOBBI, Hugo DE LA MARLIER, Jean-Pierre Louis COMMUNAL

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 CO₂.
- 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.



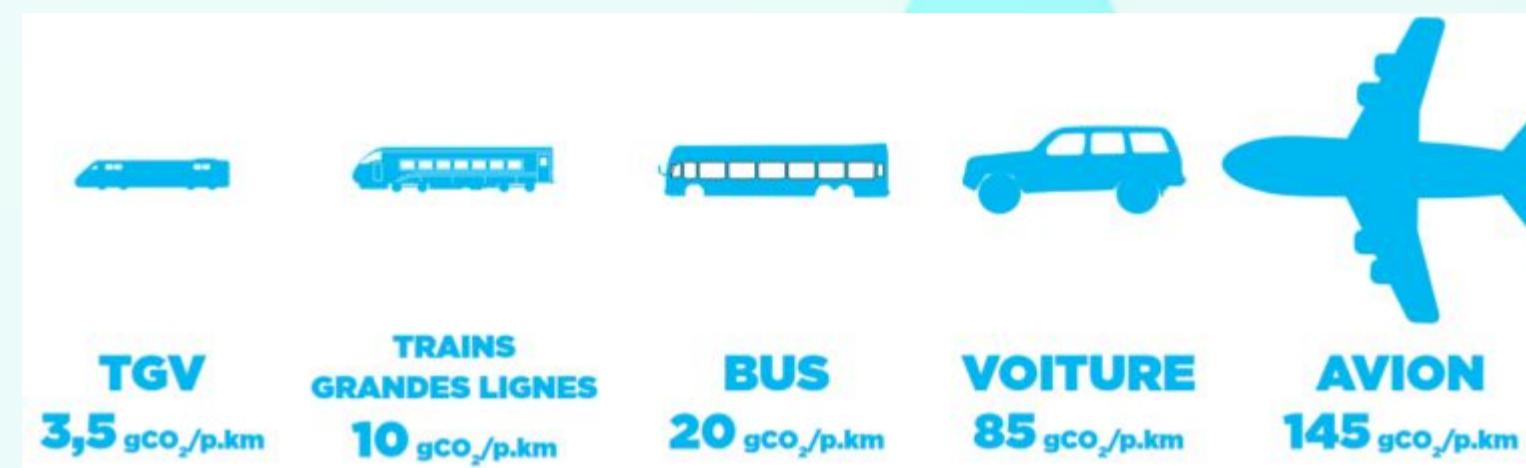
Quel est l'impact des avions de ligne actuels ?

Principales émissions de l'aviation : CO₂, 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 CO₂ de 6.8 à 1034 Tg de CO₂ par an.

Augmentation des émissions de CO₂ : 2,2% par an entre 1970-2012 et 5% entre 2012-2018.

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 massique deux fois moindre que le kérénse. ✗

- 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.



- Il reste l'espoir de trouver une nouvelle technologie de rupture comme la combustion de poudres métalliques.



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 (souvent du méthane):
 $CH_4(g) + 2H_2O(g) = 4H_2(g) + CO_2(g)$
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 :
 $2H_2O(g) = 2H_2(g) + O_2(g)$
Prix: 4€/kg Coût énergétique: 241 KJ/mol

- Craquage thermique du méthane
On "casse" les molécules de méthane en les portant à 1200°C :
 $CH_4(g) = 2H_2(g) + C(s)$
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
Avantages	Coûts de production faibles + Procédé facile à mettre en place. Utilisé pour 95% de la production d'hydrogène mondial	Pas de production de CO ₂ . Aucun résidu indésirable	Pas de production de CO ₂ . Possibilité d'utiliser le carbone produit dans l'industrie	Pas de production de CO ₂ et aucun "déchet" + L'hydrogène produit est pur contrairement aux autres procédés
Inconvénients	Production massive de CO ₂ : 10kg de CO ₂ pour 1kg de H ₂ produit	Chauffage à 2500°C ce qui demande des infrastructures spécialisées + 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

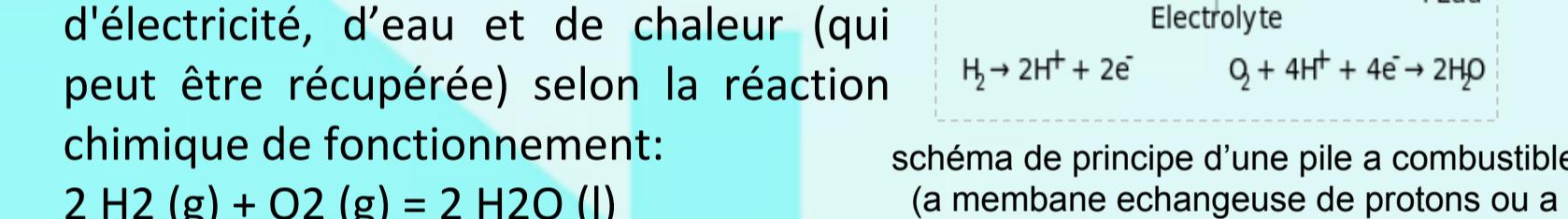
Comment utiliser l'hydrogène dans les avions ?

3 types d'utilisations:

- le bruler 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 CO₂ pour produire du kérénse synthétique

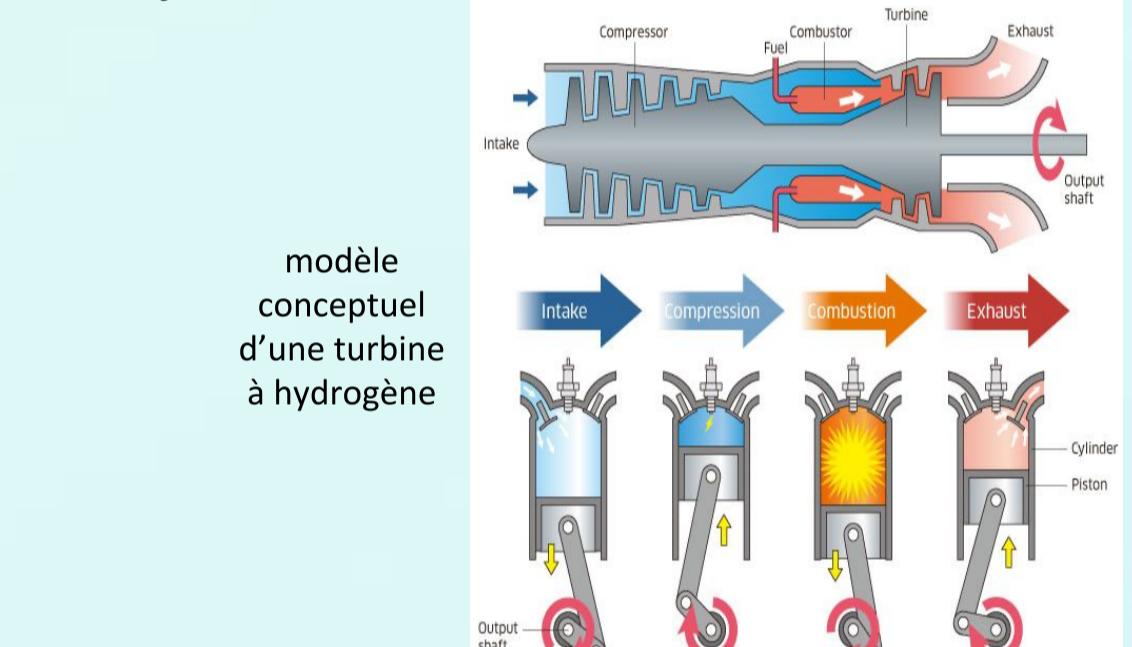
La pile à combustible:

La pile à hydrogène utilise le dihydrogène et le dioxygène. Il s'agit d'une oxydation contrôlée de H₂ et de O₂ avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur (qui peut être récupérée) selon la réaction chimique de fonctionnement:



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)

⇒ Des avions court courriers (entre 2 et 6 places) seulement. Une faisabilité technique mais des obstacles économiques à la commercialisation à grande échelle



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.

Verdict : L'avion à hydrogène n'est pas viable, mais c'est la seul 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 H₂, 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.

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

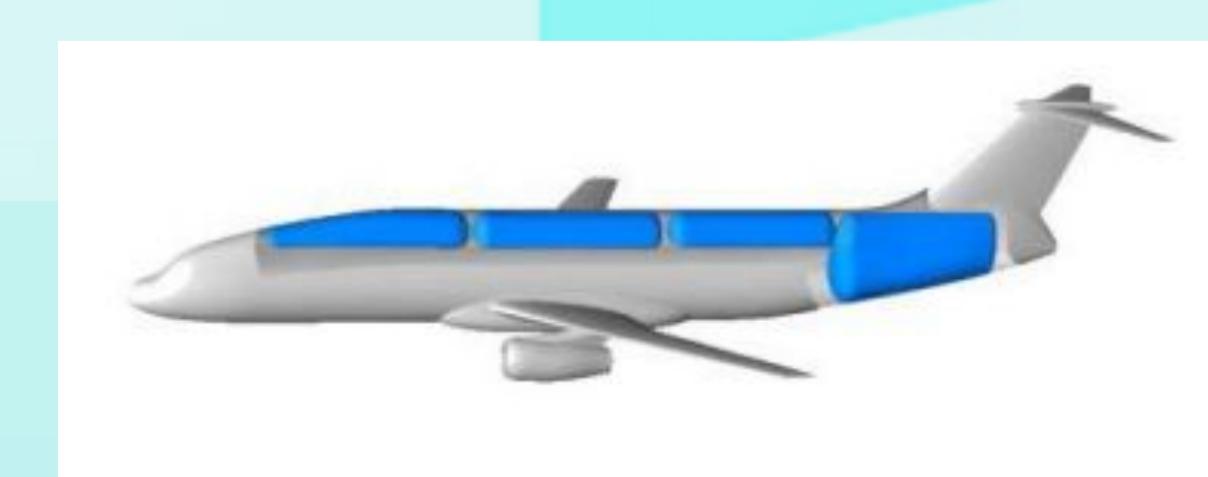


Figure 5 : Emplacement potentiel des réservoirs d'H2.
Source : Airbus

