



1 Introduction

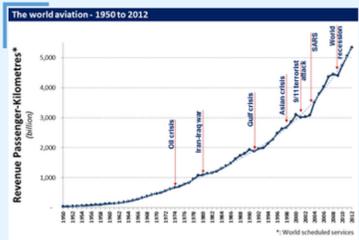
Le secteur de l'aviation a subi une **croissance exponentielle** au cours des **70 dernières années** et depuis, n'a cessé de croître. [Schéma 1]. Cet acteur économique "génère des ressources qui en ferait à lui seul l'équivalent de la 19e économie mondiale" (Les Echos)[1].

Cependant, un défi majeur se pose, celui de **réduire drastiquement ses émissions de GES (Gaz à Effets de Serre)** que sont le **CO₂** (2.5 %), les **oxydes d'azote** et la **vapeur d'eau** [2].

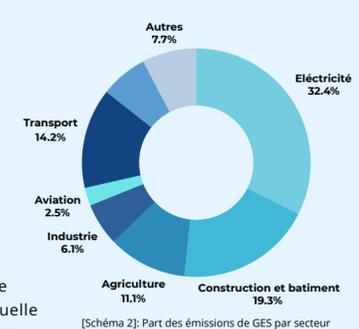
Précisons en plus, que c'est surtout lorsque l'on rapporte ses **émissions** au nombre d'**individus** qui prennent l'avion que le constat est frappant. [Schéma 2].

C'est pourquoi la transition vers une aviation plus propre devrait non seulement s'opérer par des **améliorations techniques** comme des **alternatives** au kérosène (biocarburants, batteries, hydrogène) mais aussi par des **réflexions logistiques** (régulation traffic aérien) et **sociales** (proportion de vols nécessaires, emplois).

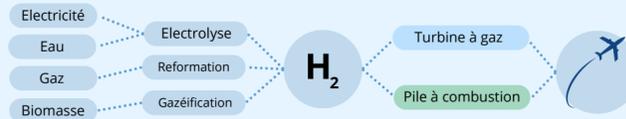
Ici, nous allons nous concentrer sur ce que les avions à hydrogène ont à offrir, leur **fonctionnement**, leur stade de **développement**, les **coûts** associés en ayant toujours comme grille de lecture, la dimension **sociale** fondamentale sans laquelle la réflexion même d'un futur plus **durable** n'aurait pas de sens.



[Schéma 2]: Part des émissions de GES par secteur



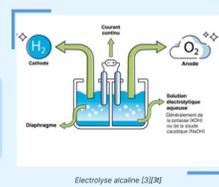
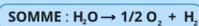
2 Technique



I - Production d'hydrogène liquide

Production renouvelable = **l'électrolyse alcaline** :

- Cathode: $2H_3O^+ + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$
- Anode: $2OH^- \rightarrow 1/2 O_2 + H_2O + 2e^-$



Stockage de l'hydrogène :

- Sous forme **liquide** à -253°C => densité de **71 kg/m³** [2t]
- Avantage** : capacité volumétrique
- Inconvénient** : demande une quantité d'énergie conséquente

Energie de liquéfaction de l'H₂ : $(J/L) : Q = \rho(C\Delta T + L)$, unités: $[kg \cdot L^{-1} (JK^{-1}K + Jkg^{-1})]$

→ à T° = 20°C : produire **1 L d'H₂ liquide** = ~ **310 KJ** [11t]

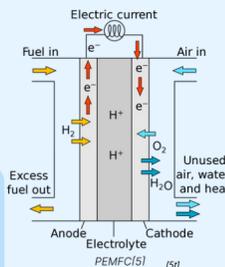
II - Piles à combustible

Aviation → **électrification des méthodes de propulsion**

Avantages : efficacité, fiabilité, bas-coût, peu de vibration, chaleur, bruit,...

Pile à combustible alcaline (AFC) :
+ développée et - coûteuse
température de fonctionnement : **150°C - 200°C**

Pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) :
+ prometteuse pour l'aviation
Température de fonctionnement : **30°C - 100°C** [4t]



III - Conception d'un avion à hydrogène

Propriété de l'hydrogène :

Densité gravimétrique **3x + grande** que le kérosène = Nécessite **4x + d'espace** :

→ Réservoirs d'hydrogène liquide + grands

→ Taille de l'avion : + grande
OU
Transporter - de passagers [6t]

Propulsion :

Turbines à gaz à hydrogène :

- Même principe que turbines conventionnelles
- rapports air/carburant + élevés + besoin de - d'énergie d'allumage => **Puissance de sortie : + faible**

Piles à combustible

N'a pas la **densité énergétique + exigences de puissance** des turbines à gaz à combustion d'H

Pour les avions **long-courriers**, les systèmes → **hybrides** des 2 technologies ou les turbines à **gaz à combustion** sont mieux adaptés. [7t]

IV - Vision

2016, H2FLY : 1er vol à plusieurs passagers à bord de leur avion **H4Y** avec uniquement un moteur électrique : des **piles à combustion à hydrogène**. [8t]

Projet d'Airbus ZEROe : déployer un **avion commercial** propulsé à l'H d'ici **2035**.

	H4Y (2016)	ZEROe (2035)	Airbus A320 (2024)
Autonomie	1'500km	3'700km	6'200km
Capacité	4 passagers	200 passagers	200 passagers

Les avions conventionnels d'aujourd'hui ont une **autonomie** d'environ = **1.7x +** que le ZEROe [9t], [10t]

3 Economie, société et sécurité

I - Economie Aviation intra-européenne à hydrogène

Coûts

Coûts **développement avions** :

- Nouveaux réservoirs → Nouveaux avions : **Volume** réservoirs cylindriques + **Matériaux** isolants / Réseau **distribution** solide → **Alourdissement** avion → **Coûts**

Coûts **distribution carburant aéroports** :

- Rentabilité économique :
- Temps de ravitaillement** hydrogène > Avions kérosène : **Durée d'immobilisation** : - 5 - 10% temps de vol/an/avion (d'après Clean Sky)

Coûts **production H₂** :

- Par reformage (hydrocarbures) : **0.1 - 0.15 €/L** MAIS **H₂ gris**
- Par électrolyse (eau) : **0.2 - 0.4 €/L** MAIS **H₂ vert**
- VS** **Kérosène : 0.96 €/L**

Investissements

- Subventions : en **France**, budget : **7 milliards d'€**
 - Soutien à la **recherche**
 - Soutien au déploiement de la **mobilité hydrogène**
 - Plan gouvernemental de relance de l'aéronautique
 - Programme d'investissement d'avenir



Institutions : Conseil national de l'hydrogène

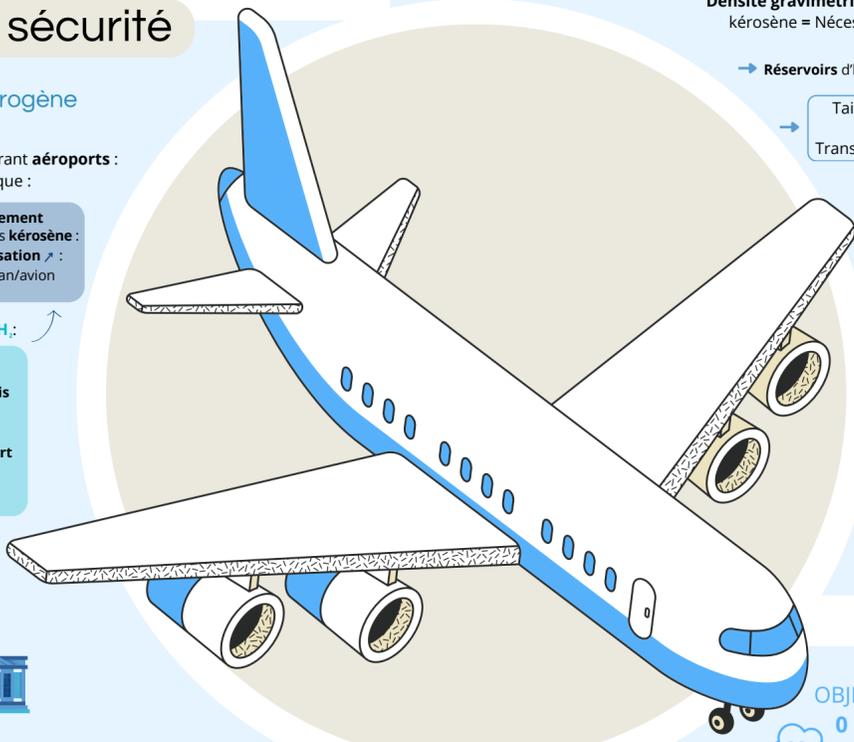


II - Sociétal :

- Electrolyse : Besoin **d'eau** et **d'électricité** :
 - Ressource** à l'état **liquide** : prisee
 - Besoin d'énergie « propre » : **Faible** disponibilité du **renouvelable**
- Création d'emplois : **France** : **100 000** emplois directs (ARHYPAC)

III - Sécuritaire :

- Risque : nouveau réservoir **cryogénique** : Isolation peut être **imparfaite** : **Non** canalisation de l'hydrogène liquide en cas de **vaporisation**
- Effet **psychologique** : a priori lié à **nouvelle technologie**



OBJECTIF **0 CO₂**

I - Empreinte Carbone de la consommation

Pacte du transport : **AUCUNE** émission durant le vol :

- Emissions de **CO₂** = **0** VS **3,83 kg de CO₂ par kg** de kérosène consommé
- Vapeur eau (**H₂O**) + oxydes d'azote (**NO_x**) (GES à durée de vie assez courte) [5e]

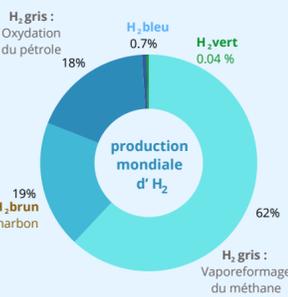
II - Empreinte Carbone de nouvelles infrastructures adaptées

- Réservoirs 4 à 6 fois + gros** que les réservoirs de kérosène [2e]
 - Réservoirs cryogéniques** : -253°C + isolés du reste de l'appareil [6e]
 - Chaîne de logistique (stockage + transport de l'H₂)** :
 - Architecture de l'aéronef** (réservoirs + moteurs + piles)
 - Cuves hyper-étanches** (liquide à enthalpie négative)
 - Infrastructures des aéroports**
- Ces aménagements contribuent fortement à l'empreinte carbone de ce nouveau secteur

Ecologie 4

III - Empreinte Carbone de la production

Etude de l'ONG ICCT : à partir de 2035, les avions propulsés à l'H₂ => **limiteront les émissions de CO₂** MAIS ne réduiront pas à eux seuls l'empreinte carbone du secteur aérien



- Production de l'H₂ : peut être **tout aussi émettrice de CO₂** que le kérosène
- H₂ à l'état naturel (**H₂ blanc**) + H₂ produits différemment (**vert, bleu, brun, gris, turquoise, jaune, rose,...**) [1e]/[8e]

Hydrogène gris

produit à partir de **combustibles fossiles** (méthane ou charbon)

Hydrogène bleu

produit à partir de **combustible fossiles** + **captage, stockage** du CO₂

Hydrogène vert

produit par **électrolyse de l'eau** (électricité renouvelable)

5 Kérosène VS Hydrogène

KÉROSÈNE (exemple : Airbus A320) vs **HYDROGÈNE**

Valeur calorifique	13 kWh/kg	39 kWh/kg	+
Densité énergétique volumétrique	9637 kWh/m ³	2359 kWh/m ³	-
Emissions carbone sur le vol	3.8kg/kg de carburant	0kg/kg de carburant	+
Autonomie	6200km	3700km (ZEROe : 2035)	-
Température de stockage	0°C	-253°C	-
Rendement	turboréacteur: 70-75%	pile à H ₂ : 50-60% turboréacteur à H ₂ : 25-40%	-
Coûts estimés	0.9€/L	H ₂ gris : 0.1- 0.15 €/L H ₂ vert : 0.2-0.4€/L	+
Consommation au km	3-4L/km	~7L/km	-
Poussée / moteur	914kW	696kW	-

[3e]/[4e]/[6e]

6 Conclusion

- Aujourd'hui, **l'aviation à hydrogène commercial** n'est malheureusement **pas encore réalisable**. En effet, les **technologies** et **infrastructures** nécessaires ne sont pas **implémentables à grande échelle** et **l'autonomie** demeure un vrai problème.
- Nous pourrions alors estimer les **1^{er} vols à hydrogène court-courriers commerciaux** d'ici **10 ans** (Projet ZEROe d'Airbus)
- Cependant, il sera difficile de dire que les **avancées technologiques** telles que les **avions à hydrogène** suffiront pour atteindre l'**objectif "Neutralité Carbone"** en 2050 (Accords de Paris), en parallèle, il sera donc pour cela primordial :

→ **De réduire drastiquement le nombre de vols** d'un facteur de **7** (étude de l'EPFL) [3c] tout comme l'utilisation de l'avion pour les **trajets non nécessaires**

→ **Et de privilégier l'usage** de ces **nouvelles technologies durables** pour les **courriers indispensables** au quotidien

« Oui, mes amis, je crois que l'eau sera un jour employée comme combustible, que l'hydrogène et l'oxygène, qui la constituent, utilisés isolément ou simultanément, fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisables et d'une intensité que la houille ne saurait avoir » Jules Verne, *L'île mystérieuse*, 1874

Bibliographie



Et en attendant ?

Dans les années à venir, avant que les technologies en développement ne soient prêtes, il sera important de commencer à **réduire l'empreinte carbone du secteur**. Cela peut se faire en partie en remplaçant partiellement le kérosène par des **biocarburants** (solution imparfaite car pas forcément plus écologique), en **modernisant la flotte** (avions plus efficaces), en **optimisant** les trajectoires d'avions et surtout en **réduisant le nombre de vols** (désavantage économique mais nécessaire).