



Aviation Légère Électrique - Pile à Combustible ou Batteries ?

Patrick Gilliéron

► To cite this version:

Patrick Gilliéron. Aviation Légère Électrique - Pile à Combustible ou Batteries ?. [Rapport de recherche] Chercheur indépendant. 2022. hal-03509424

HAL Id: hal-03509424

<https://hal.science/hal-03509424>

Submitted on 4 Jan 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright

Aviation Légère Électrique Pile à Combustible ou Batteries ?

Patrick Gilliéron, chercheur indépendant
rdmfa.pgillieron@orange.fr

Résumé/Conclusion : *L'intérêt de la pile à combustible est analysé à partir des rendements de production et de distribution de l'hydrogène. Les contraintes de distribution réduisent de manière considérable l'intérêt de la filière hydrogène. Les rendements de production de l'hydrogène à l'hélice puis du puits d'énergie à l'hélice confirment l'intérêt de la solution par reformage, montrent l'intérêt provisoire des centrales à gaz de nouvelle génération et relativisent l'intérêt de la filière nucléaire par rapport aux énergies éoliennes et/ou hydroliennes. La comparaison avec la filière électrique par batteries montre que l'efficacité énergétique de l'alimentation du moteur électrique par batteries est trois fois plus importante que l'alimentation par la pile à combustible.*

1. INTRODUCTION

Dans un contexte mondial où les émissions des produits de combustion des énergies fossiles augmentent¹ continûment [A] du fait de l'explosion industrielle des grands pays émergents (Inde, Brésil, Chine), où la concentration des gaz à effet de serre permettant de limiter l'augmentation de la température moyenne de surface planétaire à 2°C d'ici la fin du siècle sera probablement dépassée² [1-4, A], les partenaires des industries des transports mécaniques (aérien, ferroviaire, fluvial, routier, maritime) imaginent diverses solutions de substitution à l'utilisation des produits pétroliers. Parmi ces solutions, le recours à l'hydrogène, souvent évoqué en aéronautique, nécessite de fournir quelques ordres de grandeurs pour quantifier et relativiser son intérêt.

2. LE GAZ HYDROGÈNE

Le gaz hydrogène constitue le constituant principal des étoiles et des gaz interstellaires mais n'existe pas à l'état naturel sur la planète Terre. Sa production s'obtient par **reformage** de la vapeur de gaz naturel, à partir de charbon gazeifié, de naphtha³ [5] ou par **électrolyse de l'eau**.

3. ÉQUIVALENCE D'ÉNERGIE ENTRE L'HYDROGÈNE ET LES CARBURANTS USUELS

La combustion de l'hydrogène ou des produits pétroliers fournit de la vapeur d'eau qui n'est généralement pas condensée pour récupérer la chaleur latente de changement de phases (vapeur/liquide). Cette énergie de condensation n'étant pas récupérée, il est usuel de quantifier la quantité d'énergie des carburants à partir de leurs pouvoirs calorifiques inférieurs (notation PCI). Le pouvoir calorifique inférieur de l'hydrogène, égal à 120.1 MJ.kg⁻¹, est supérieur⁴ aux pouvoirs calorifiques inférieurs [6-7, B] des carburants essences aviation (AVGAS, kérosène (Jet A et A1)) et automobile de l'ordre de 44 MJ.kg⁻¹. Il y a donc approximativement trois fois plus d'énergie dans un kilogramme

¹ Les émissions de CO₂ avaient en 2019 augmenté de 14% par rapport à 2008, année de crise financière, pour se réduire de 5.2% en 2020 par rapport à 2019 suite à la crise de la Covid-19 (source Global Carbon Atlas). En 2021, avec la reprise économique mondiale, ces émissions auront sans doute retrouvé leur niveau de 2019.

² Cette perspective s'appuie sur les scénarii intermédiaires SSP2-4.5 et SSP3-7.0 [1-2] qui supposent l'engagement d'une politique climatique mondiale efficace quant à l'usage des énergies fossiles, politique encore difficile à mettre en œuvre dans le contexte international de 2022 malgré les alertes du GIEC émises depuis 1990.

³ Liquide transparent issu de la distillation du pétrole.

⁴ MJ.kg⁻¹, M pour méga, soit 10⁶.

d'hydrogène que dans un kilogramme d'essence. Ce rapport justifie à lui seul l'intérêt porté à la filière hydrogène.

4. RENDEMENTS POUR LA PRODUCTION D'HYDROGÈNE

Les rendements de production d'hydrogène sont fonctions des techniques retenues [8]. Les deux principales techniques sont le reformage et l'électrolyse de l'eau.

4.1 Reformage - Le reformage par la vapeur de gaz naturel, de charbon gazéifié ou de naphta produit du monoxyde de carbone qui s'oxyde rapidement pour devenir du dioxyde de carbone, gaz à effet de serre responsable avec le méthane d'une part importante du réchauffement climatique [1-3, 9]. Cette production s'effectue à partir de carburants fossiles sur des sites industriels dédiés ou à bord⁵ et explique l'intérêt des grandes compagnies pétrolières pour la filière hydrogène. À ce niveau, il est intéressant de noter que la production d'une tonne d'hydrogène à partir de gaz méthane s'accompagne de la production de 5.5 tonnes⁶ de gaz CO₂ (rapport de 1 à 6). La production s'effectue le plus souvent à partir du **gaz naturel** avec des **rendements proches de 0.72** [10].

4.2 Électrolyse de l'eau - L'électrolyse de l'eau consiste à utiliser un courant électrique pour décomposer l'eau liquide en oxygène et hydrogène gazeux. **Le rendement du procédé** est estimé à 0.75 en courant continu et à 0.70 en courant alternatif pour tenir compte des **pertes en ligne** et de la **transformation** du courant **alternatif en courant continu** [11]. L'électricité servant à l'électrolyse peut être produite à partir de la combustion de produits pétroliers (charbon, pétrole ou gaz naturel), d'un parc d'hélices aériennes ou hydroliennes ou encore produite⁷ à partir d'une centrale nucléaire. Dans le cas de la combustion des produits pétroliers, le meilleur rendement égal à 0.6 s'obtient dans des centrales à cycle combiné gaz [12]. Le rendement des hélices éoliennes, fixé par la limite de Betz, ne peut pas dépasser 0.59 et la production d'électricité nécessite un multiplicateur, un alternateur, un transformateur, un redresseur et des batteries.

RENDEMENTS DE PRODUCTION d'H ₂	SOURCES D'ÉNERGIE		
	CENTRALE GAZ ⁸	CENTRALE AÉRIENNE ou HYDROLIENNE	CENTRALE NUCLÉAIRE
Source → électricité	0.60	0.41	0.33
Électricité → production H ₂	0.70	0.70	0.70
Source → production H ₂	0.42	0.29	0.23

Tableau 1 – Rendements de production d'électricité par électrolyse à partir de courant alternatif et en fonction de la source d'énergie (gaz, hélices aériennes ou hydroliennes, centrales nucléaires). Les centrales nucléaires sont ici au plus des centrales de 2nd génération, voir "Sites Internet de référence" [C-D].

En pratique et en tenant compte des pertes en lignes, le rendement des hélices éoliennes ou hydroliennes⁹ pour la production d'électricité ne peut pas dépasser 70% de la limite de Betz soit 0.41 [13]. Pour les centrales nucléaires en fonctionnement aujourd'hui, le rendement est proche de 0.33 (2/3

⁵ Projet Fuel Cell Based Power Generation pour l'automobile, FCGEN, 2011-2015 : production d'hydrogène à partir de gasoil / Projet NISSAN e-Bio Fuel-Cell, 2016, production d'hydrogène à partir d'éthanol contenu dans un réservoir.

⁶ Valeurs issues de l'équation stœchiométrique ($\text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2$)

⁷ D'autres formes de production existent mais sortent du cadre de cet article.

⁸ Rendement pour les centrales à cycle combiné gaz = 0.60 [11] ; 0.62 pour la centrale de Bouchain (Nord). Ces centrales récupèrent la chaleur des gaz brûlés pour créer de la vapeur qui alimente un ensemble turbine/alternateur pour générer une production additionnelle d'électricité.

⁹ L'hydrolienne SeaGen (démonstrateur à 2 rotors de 16 m de diamètre) installée dans la baie de Strangford Lough et restée en activité de 2008 à 2016 a produit 11.6 GWh.

de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur) [14]. Ce rendement pourrait atteindre 0.45 avec le développement des centrales nucléaires de quatrième génération (concept de réacteur à très haute température, VHTR) [15]. Le rendement de la production de l'hydrogène varie alors respectivement de 0.42 à 0.23 pour les filières gaz et nucléaire, voir le tableau 1. Les productions à partir de la combustion du gaz ou à partir de la fission de matière nucléaire ne sont cependant pas satisfaisantes puisque respectivement liées à l'émission de 5.5 tonnes de gaz carbonique pour une tonne d'hydrogène produite.

D'un point de vue énergétique, la comparaison des sources de production d'hydrogène, par reformage ou par électrolyse de l'eau (gaz/hélice/nucléaire), montre l'intérêt de la production par reformage. Le rendement de production d'hydrogène par reformage est proche du double du rendement de production par électrolyse (0.72 à comparer avec 0.42, voir respectivement le §4.1 et le tableau 1 du §4.2).

5. DISTRIBUTION DE L'HYDROGÈNE

Le transport de l'hydrogène du lieu de production à grande échelle vers le lieu de distribution s'effectue en phase gazeuse ou liquide, par route ou par rail ou à partir d'un réseau de pipelines. La compression sans liquéfaction est généralement préférée à la liquéfaction (-253°C) pour réduire la dépense énergétique [16]. Le rendement de compression est estimé à 0.90.

TRANSPORT PAR CAMION DE 40 TONNES, CAPACITÉ 30 m ³			
Energie transportée si carburant essence en Joule :		95.6 10 ¹⁰	
Energie transportée si carburant essence en kWh :		265625	
HYDROGÈNE EN PHASE LIQUIDE		HYDROGÈNE EN PHASE GAZEUSE	
Masse délivrée en kg / camion	3500	Masse délivrée en kg / camion	288
Energie délivrée en J / camion	42.00 10 ¹⁰	Energie délivrée en J / camion	3.46 10 ¹⁰
Energie délivrée en kWh / camion	116764	Energie délivrée en kWh / camion	9608
Nb camions H ₂ / Nb camions essence	2	Nb camions H ₂ / Nb camions essence	28
Tableau 2 – Transport en phase liquide (-253°C)		Tableau 3 – Transport en phase gazeuse (200 bars).	

Le transport routier s'effectue à l'aide de camions de 40 tonnes qui peuvent transporter et délivrer 30 m³ d'essence ou de gazole. Dans le cas de l'hydrogène, ces camions peuvent transporter 320 kg d'hydrogène sous forme gazeuse mais délivrer¹⁰ seulement 288 kg à la pression de 200 bars [17]. Sous forme liquide et compte tenu des installations nécessaires au transport, la quantité transportée ne peut excéder 3500 kg. Dans ces conditions, 28 camions d'hydrogène gazeux ou 2 camions¹¹ d'hydrogène liquide sont nécessaires pour disposer de l'équivalent énergétique d'un seul camion d'essence (voir respectivement les tableaux 2 et 3). L'évolution des technologies pourrait cependant permettre de délivrer 400 kg d'hydrogène gazeux [17] ; dans ces conditions, **20 camions¹² d'hydrogène** seraient nécessaires pour délivrer **l'équivalent énergétique d'un seul camion d'essence**. Ces valeurs montrent clairement le faible intérêt de la solution du transport par camion.

Le ravitaillement des camions s'effectue à partir de centres de distributions alimentés par des réseaux de gazoducs ou par réseaux ferrés, fluviaux et/ou maritimes. Le transport par gazoducs¹³ doit et peut

¹⁰ La totalité embarquée ne peut être totalement délivrée compte tenu des écarts de pression entre les réservoirs donneur et receveur.

¹¹ 2.3 camions exactement.

¹² Le rapport "*The future of the hydrogen economy : bright or bleak ?*" [17] donne 22 camions pour 400 kg de gaz hydrogène délivrés. L'équivalence pour 288 kg d'H₂ transportée par camion donne 30 camions (les différences proviennent de la différence des températures, 25°C pour [17] et 15°C pour les résultats reportés dans cet article auxquelles sont respectivement associées les masses volumiques 698 kg/m³ [17] pour 750 kg/m³).

¹³ Les longueurs de gazoducs répartis sur la Terre dépassent le million de kilomètres [E].

s'effectuer à partir du réseau existant de gaz naturel pour limiter les coûts. L'hydrogène est alors mélangé au gaz naturel dans une proportion de 1 volume d'hydrogène pour 10 volumes de gaz, des pressions comprises entre 4 et 100 bars (des pressions de 150 et 300 bars sont envisagées) et la récupération de l'hydrogène s'effectue en fin de circuit à partir de membranes poreuses [17]. L'Europe de l'Ouest possède un réseau de pipelines d'hydrogène d'environ 1 600 km [18] et le projet de dorsale hydrogène européenne (EHB) offrira en 2040 un réseau de 39 700 km destiné à relier 21 pays européens ; 69% du réseau serait constitué de reconversions de réseaux gaziers existants [19]. Les transports par rail ou par mer s'effectuent sous forme liquide ou gazeuse à des pressions proches de 700 bars. Quel que soit le mode de transport (route, fer ou mer), il est nécessaire de maintenir un certain niveau d'évaporation pour maintenir la pression dans les réservoirs de stockage. Cette évaporation est comprise entre 0.2 et 0.4% de la masse transportée. À ces transports, par gazoducs, réseaux ferrés, fluviaux ou maritimes¹⁴, s'ajoutent cependant des dépenses d'énergie qui dégradent le rendement du puits d'énergie au système de traction ou de propulsion, hélice ou turbine. D'un point de vue économique, les lieux de production doivent être situés au plus près des centres de stockage pour que la distribution s'effectue au mieux par gazoducs et/ou par camion sur de courtes distances. Dans les développements qui suivent, **le système de traction ou de propulsion (turbine(s)) sera indifféremment désigné par hélice.**

5.1 Rendement pour la distribution de l'hydrogène - Le calcul des rendements doit prendre en compte l'énergie nécessaire à la compression ou à la liquéfaction pour le transport, l'énergie liée au transport des centres de production ou de stockage vers les centres de distribution puis l'énergie nécessaire pour alimenter les réservoirs des aéronefs.

ÉTAPE DE COMPRESSION		ÉTAPE DE TRANSPORT	
Pression de transport (bar) :	200	Consommation en l/100 kms	40
Rendement du compresseur :	0.90	Distance AR stockage / distribution, en kms	400
Volume après compression (m ³) :	30	Consommation totale gazole AR en kg	136
Energie dépensée (Joule) :	3.44 10 ⁹	Energie consommée lors du transport en J.	5.85 10 ⁹
Energie dépensée ¹⁵ (kWh) :	958	Energie consommée lors du transport en kWh	1624
Energie dépensée / délivrée en %	10	Energie dépensée/ délivrée en %	17
RENDEMENT de compression	0.90	RENDEMENT lié au transport	0.83
Tableau 4 – Données et rendement pour la compression du gaz hydrogène.		Tableau 5 – Données et rendement pour le transport du gaz hydrogène du lieu de production aux lieux de distribution distants de 200 kilomètres.	

Comme précédemment, la liquéfaction consommant plus d'énergie que la compression gazeuse, seule la compression gazeuse est ici analysée. Pour une compression à température constante, un rendement pour le compresseur égal à 0.90 (tableau 4, colonne de droite, 2^{ème} ligne), une compression adiabatique progressive optimale à 200 bars et un volume final d'hydrogène de 30 m³ correspondant à la capacité de stockage d'un camion citerne de 40 tonnes, l'énergie minimale nécessaire à la compression est estimée à 958 kWh, voir le tableau 4 et l'annexe 1. Cette énergie représente¹⁶ 10% de l'énergie délivrée (rendement de compression égal à 0.90).

Pour des trajets moyens de l'ordre de 200 kms entre les centres de stockage et de distribution effectués à l'aide de tracteurs dont les moteurs consomment en moyenne 40 litres de gazole aux 100 kms, l'énergie dépensée par le transport représente alors près de 17% de l'énergie transportée en phase gazeuse à 200

¹⁴ Puissance de l'Amoco Cadiz, 7.36 MWatt, 37.3 MWatt pour le Knock Nevis (le plus gros tanker).

¹⁵ Cette valeur serait égale à 979 kWh si l'évolution était isotherme.

¹⁶ Le rapport "The future of the hydrogen economy: bright or bleak ?" [17] donne 8%.

bars, voir le tableau 5, 7^{ème} ligne. Arrivé à destination, l'hydrogène est stocké dans des réservoirs à 100 bars pour être de nouveau comprimé à 300 bars lors du remplissage des réservoirs des avions. Cette compression (écart de pression de nouveau de 200 bars) nécessite une énergie estimée de nouveau à 10% de l'énergie transportée par camion (tableau 4, 7^{ème} ligne).

Le rendement du lieu de stockage au centre de distribution des avions est donc égal aux produits $0.90 \times 0.83 \times 0.90 = 0.67$, voir le tableau 6. Dans ces conditions, **33% de l'énergie transportée est perdue entre le lieu de stockage et le centre de distribution**. Dans le cas du transport de l'essence et une même distance du lieu de stockage vers le centre de distribution, le ratio entre l'énergie consommée (voir la 6^{ème} ligne et la colonne de droite du tableau 5) et l'énergie transportée (voir la 3^{ème} ligne des tableaux 2 et 3) est inférieure à 0.01. **Le rendement de la distribution égal à 0.99 (à comparer avec 0.67) explique l'intérêt économique de la filière actuelle.**

OPÉRATIONS POUR LA DISTRIBUTION	RENDEMENTS
Rendement compression 1 → 200 bars avant transport	0.90
Rendement transport par camion	0.83
Rendement compression 100 → 300 bars remplissage de l'avion	0.90
RENDEMENT FINAL POUR LA DISTRIBUTION	0.67
Tableau 6 – Rendements intermédiaires et final pour les opérations de distribution de la filière hydrogène.	

6. RENDEMENTS COMPARÉS POUR LES FILIÈRES BATTERIES ET PAC

Les rendements du puits d'électricité à l'hélice puis du puits d'énergie à l'hélice pour l'électricité du réseau utilisée pour **recharger une batterie** ou produire de l'hydrogène destiné à **alimenter une pile à combustible** sont successivement déterminés puis comparés. Dans tous les cas, l'électricité produite alimente un même moteur électrique dont le rendement est estimé à 0.90. Le rendement de transmission entre le moteur et l'hélice, fonction de divers paramètres (pas, réducteur...) n'est pas pris en compte.

6.1 Rendement du puits d'électricité à l'hélice - Dans le cas du stockage de l'énergie électrique par **batteries**, les pertes entre la centrale de production¹⁷ et la prise électrique puis de la prise à la batterie, en prenant en compte les processus successifs de charge et de décharge, peuvent respectivement être estimées à 0.10 et 0.05 fois la quantité d'énergie consommée. Le rendement de la centrale à la batterie est donc proche de 0.90×0.95 soit 0.85, voir le tableau 7.

Dans le cas de la **pile à combustible** (PAC), l'hydrogène stocké dans le réservoir est produit par électrolyse à partir du réseau électrique puis distribué dans un réseau spécialisé. Le rendement du réseau électrique au réservoir d'hydrogène de l'avion est alors égal à 0.47 (le produit de 0.70×0.67 , voir les paragraphes 4.2 "Électrolyse de l'eau" tableau 1 ; 5.1 "Rendement pour la distribution de l'hydrogène" tableau 6 et le tableau 7, colonne de droite, 5^{ème} ligne à partir du haut). Quarante sept pour cent (47%) **de l'énergie électrique utilisée pour produire l'hydrogène se retrouve alors dans le réservoir des avions.**

L'hydrogène du réservoir alimente alors une pile à combustible dont le rendement de production d'électricité est proche de 0.50 et l'électricité produite est utilisée pour alimenter le moteur électrique de l'avion. Le rendement du réservoir d'hydrogène de l'avion à l'hélice est donc égal à $0.50 \times 0.90 = 0.45$ (voir le tableau 7, colonne de droite, 8^{ème} ligne). Ce rendement est supérieur de 50% à celui des avions à combustion interne encore proche de 0.30. Cette valeur peut alors être utilisée pour arguer de l'intérêt de la PAC dans la mesure où l'électricité n'est pas produite à partir de produits carbonés fossiles et où l'autonomie permettrait de franchir des distances au moins équivalentes aux avions à moteurs thermiques. Au final, entre le réseau électrique et l'hélice, le rendement est au plus égal à 0.21. **Soixante-**

¹⁷ De préférence une centrale qui ne produit pas de gaz à effet de serre.

dix-neuf pour cent (79%) de l'énergie distribuée par le réseau électrique est ainsi dissipée sous forme de chaleur.

Dans le cas de l'aéronef tout électrique (batteries) , le rendement du réservoir d'énergie de l'aéronef à l'hélice est égal à 0,76 (0.85×0.90), voir le tableau 7, 5^{ème} ligne, 2^{ème} colonne à partir de la gauche. Ce rendement représente deux fois et demie (2.5) le rendement des aéronefs à combustion interne proche de 0.30. Cette valeur confirme l'intérêt de la filière tout électrique et montre l'intérêt de consacrer des ressources suffisantes au développement de batteries à haute densité énergétique massique¹⁸.

ÉLECTRICITÉ ISSUE DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE			
ÉLECTRICITÉ → BATTERIES		ÉLECTRICITÉ → H ₂ → PAC	
Rd réseau électrique à la batterie	0.85	Rd électricité → production H ₂	0.70
		Rd distribution → réservoir H ₂	0.67
		Rd électricité → réservoir H₂	0.70 * 0.67 = 0.47
		Rd PAC (production d'électricité)	0.50
		Rd moteur électrique	0.90
Rd Moteur électrique	0.90	Rd réservoir H₂ → hélice	0.50 * 0.90 = 0.45
RENDEMENT À L'HÉLICE	0.76	RENDEMENT À L'HÉLICE	0.21
Tableau 7 – Rendements comparés du puits d'électricité à l'hélice pour les solutions pile à combustible (PAC) et batteries électriques destinées à alimenter un moteur électrique.			

Les rendements du puits d'électricité à l'hélice pour les filières **batteries et PAC** sont alors respectivement égaux à **0.76 et 0.21**. Compte tenu des progrès réalisés sur les durées de vie de ces deux filières, près de 3000 heures [20-21], **l'efficacité énergétique des aéronefs à stockage électrique d'énergie est donc au moins trois fois plus importante que l'efficacité énergétique de la solution pile à combustible.**

6.2 Rendement du puits d'énergie à l'hélice - Les résultats fournis au paragraphe précédent ne prennent pas en compte les rendements de conversion des énergies primaires destinées à alimenter les centrales aérauliques, hydrauliques, thermiques à charbon, thermiques à gaz ou nucléaires. Un rendement moyen de conversion peut être estimé en prenant en compte la contribution de chacune d'elles dans les productions mondiale ou nationale d'électricité. Au niveau mondial, la contribution des centrales à énergie renouvelable (hydro, aéro, solaire), thermiques à flammes et nucléaire représente respectivement 23.6, 63.9 et 10.1% de la production totale d'électricité [F]. Le rendement de production d'électricité à partir des énergies renouvelables ne nécessitant aucune transformation ou manipulation lorsque l'installation existe, les rendements de production¹⁹ sont pris égaux à l'unité. Pour les autres centrales, la conversion de l'énergie primaire en énergie électrique s'effectue pour des rendements²⁰ moyens respectivement estimés à 0.30 pour le charbon, le pétrole, le gaz²¹ et le nucléaire²². Le rendement moyen de production mondiale d'énergie électrique pour les filières considérées est alors proche de 0.47,

¹⁸ 5042 kg de batteries d'énergie massique 200 Wh/kg seraient nécessaires pour disposer de l'équivalent énergétique de 110 litres d'AVGAS (750 kg/m³ et 44 MJ/kg).

¹⁹ Ces énergies sont disponibles immédiatement mais aléatoires.

²⁰ Les rendements de ces différentes opérations varient en fonction de la nature de l'énergie et de la situation géographique du site de production.

²¹ Valeur minimisée car ne prenant pas en compte l'augmentation des rendements rendue possible via la cogénération.

²² Une tonne de minerais composés de pechblende et de coffinite fournit entre 1 à 4 kg d'uranium.

valeur²³ déterminée à partir de la relation $(0.236*1 + 0.639*0.30 + 0.101*0.30)*100/N$. Estimés à partir des énergies primaires utilisées pour la production électrique, les rendements à l'hélice des filières batteries et pile à combustible sont alors respectivement égaux à 0.35 ($0.76*0.47$) et 0.09 ($0.21*0.47$), voir le tableau 8.

Pour la France en 2019, les centrales à énergies renouvelables, thermiques à flammes et nucléaire représentaient respectivement 40.6, 13.3 et 44.4% [G] mais leurs contributions à la production totale d'électricité s'élevaient respectivement 19.7, 7.9 et 70.6% [F]. Pour les rendements rappelés au paragraphe précédent, le rendement moyen de production française d'énergie électrique pour les filières considérées est alors proche de 0.43²⁴. Cette valeur est inférieure à la valeur "monde" car la part du nucléaire en France est très supérieure à la part moyenne "monde" (respectivement 44.4 et 10.1%). Pour ce rendement moyen, les rendements à l'hélice pour les filières batteries et pile à combustible sont alors respectivement égaux à 0.32 ($0.76*0.43$) et 0.09 ($0.21*0.43$), voir le tableau 9.

RENDEMENTS MOYENS MONDE ISSUS DE L'ÉNERGIE PRIMAIRE			
BATTERIES		PAC	
Rd moyen MONDE énergie primaire → électricité	0.47	Rendement moyen MONDE énergie primaire → électricité	0.47
Rd électricité → hélice*	0.76	Rd électricité → hélice*	0.21
RENDEMENT ÉNERGIE PRIMAIRE À L'HÉLICE	0.35	RENDEMENT ÉNERGIE PRIMAIRE À L'HÉLICE	0.09

Tableau 8 – Rendements comparés **monde** du puits d'énergie primaire à l'hélice pour les solutions pile à combustible (PAC) et batteries électriques destinées à alimenter un moteur électrique. * Voir tableau 7.

RENDEMENTS MOYENS FRANCE ISSUS DE L'ÉNERGIE PRIMAIRE			
BATTERIES		PAC	
Rd moyen FRANCE énergie primaire → électricité	0.43	Rendement moyen FRANCE énergie primaire → électricité	0.43
Rd électricité → hélice*	0.76	Rd électricité → hélice*	0.21
RENDEMENT ÉNERGIE PRIMAIRE À L'HÉLICE	0.32	RENDEMENT ÉNERGIE PRIMAIRE À L'HÉLICE	0.09

Tableau 9 – Rendements comparés **France** du puits d'énergie primaire à l'hélice pour les solutions pile à combustible (PAC) et batteries électriques destinées à alimenter un moteur électrique. * Voir tableau 7.

Disposer d'un parc important de centrales nucléaires ne constitue donc pas un avantage d'un point de vue rendement. Les avantages portent principalement sur la réduction nécessaire des émissions de gaz à effet de serre, sur la diminution progressive de la pollution atmosphérique et l'indépendance énergétique tant que l'approvisionnement en matières radioactives reste compétitif.

Le rendement des avions électriques alimentés par des ensembles de batteries apparaît alors incontestablement supérieur au rendement de la filière hydrogène/pile à combustible et justifie le succès de la société PIPISTREL. Cette société produit en série l'avion électrique Vélis Électro certifié EASA [H] et retenu par la Fédération Française Aéronautique (FFA) pour initier la transition énergétique dans les écoles de pilotage (formation de base et tours de piste), annexe 2.

²³ Avec $N =$ somme des contributions en % des filières énergies renouvelables, thermique à flammes et nucléaire soit 23.6, 63.9 et 10.1.

²⁴ Sans prendre en compte l'amélioration des rendements ($Rd=0.60$) des centrales gaz à cycles combinés (11 centrales à gaz possèdent des tranches à cycles combinés en 2021) et le potentiel d'amélioration des rendements des centrales nucléaires de quatrième génération (Rd proche de 0.45).

7. RENDEMENTS POUR LA PILE À COMBUSTIBLE

Les rendements de la production d'hydrogène à l'hélice puis du puits d'énergie à l'hélice pour la pile à combustible sont successivement analysés pour chaque source primaire d'énergie. Dans les deux cas, l'électricité produite alimente un même moteur électrique dont le rendement est estimé à 0.90. Comme précédemment, le rendement de transmission du moteur à l'hélice, fonction des paramètres mentionnés précédemment, n'est pas pris en compte.

7.1 Rendement de la production d'hydrogène à l'hélice - Les rendements de la production d'hydrogène à l'hélice pour les solutions reformage et électrolyse de l'eau sont reportés dans le tableau 10. Ces valeurs sont déterminées en choisissant de ne pas prendre en compte les énergies nécessaires à l'extraction et au transport du site d'extraction d'énergie primaire au lieu de production d'hydrogène (raffinerie pour le pétrole et le gaz, centrale atomique pour les produits de fission nucléaire). Les rendements sont inférieurs à 0.22. Cette valeur, associée au meilleur rendement, s'obtient pour la solution par reformage de produits pétroliers dont les réserves s'épuisent et dont la combustion contribue à la production des gaz à effet de serre.

RENDEMENTS GLOBAUX	REFORMAGE	ÉLECTROLYSE		
	GAZ ISSU DU PÉTROLE	CENTRALE GAZ NATUREL	HÉLICES AÉRO/MARINE	CENTRALE NUCLÉAIRE
Rd sources production H ₂	0.72	0.42 ²⁵	0.29	0.23
Rd distribution route ²⁶	0.67	0.67	0.67	0.67
Rd moteur électrique ²⁷	0.45	0.45	0.45	0.45
Rendements finaux	0.22	0.13	0.09	0.07

Tableau 10 – Rendements globaux de la production d'hydrogène à l'hélice pour les solutions reformage et électrolyse de l'eau. La solution par reformage utilise la chaîne existante de raffinage des dérivés pétroliers, les investissements restent faibles.

Le meilleur rendement relevé pour la solution reformage peut être comparé à la filière du moteur à combustion interne. Pour cette filière, les rendements de distribution et de combustion sont respectivement proches de 0.99²⁸ et de 0.30. Le rendement global à comparer avec les résultats du tableau 10 est alors égal à 0.30 (0.99 * 0.30). Le rendement comparé du moteur à combustion interne est alors supérieur au rendement de la pile à combustible avec reformage (voir la seconde colonne et avant dernière ligne du tableau 10). Ces rendements, supérieurs aux rendements des autres filières pour la pile à combustible, expliquent évidemment le succès du moteur à combustion interne, l'intérêt et le soutien que peuvent apporter les sociétés pétrolières à la filière reformage.

7.2 Rendement du puits d'énergie à l'hélice - Les rendements du tableau 10 sont déterminés sans prendre en compte les coûts d'extraction et/ou de conditionnement des énergies primaires qui sont utilisées pour la production d'électricité.

Pour des rendements d'extraction et/ou de conditionnement pour le reformage, pour les centrales thermiques à gaz²⁹, pour les réseaux d'hélices aériennes ou hydroliennes et les centrales nucléaires respectivement voisins de 0.90, 1.00, 1.00 et 0.95, les rendements finaux de chacune de ces filières sont

²⁵ Voir le tableau 1, paragraphe 4.2.

²⁶ Voir le rendement final pour la distribution déterminé au tableau 6.

²⁷ Voir le tableau 7, colonne de droite, 8^{ème} ligne.

²⁸ Valeur déterminée à partir des tableaux 5 et 3 (énergie consommée lors du transport pour 400 kms AR = 1624 kWh (tableau 5) / énergie transportée par camion de 40 tonnes = 265625 kWh (tableau 3)).

²⁹ Les pertes en lignes sur le réseau de pipelines et diverses canalisations sont quasi nulles comparées à l'énergie délivrée.

reportés sur la septième ligne du tableau 11. Le meilleur rendement relevé pour la filière reformage égal à 0.19 est trois fois plus important que le rendement issu de la filière nucléaire, deux fois plus important que le rendement issu de la filière éolienne ou marine, une fois et demie plus important que le rendement issu de la filière gaz naturel. L'application de ces rendements ne change pas la hiérarchie du tableau 10.

RENDEMENTS GLOBAUX	REFORMAGE	ÉLECTROLYSE		
	GAZ ISSU DU PÉTROLE	CENTRALE GAZ NATUREL	HÉLICES AÉRO/MARINE	CENTRALE NUCLÉAIRE
Rd extraction énergie	0.90 ³⁰	1.00	1.00	0.95 ³¹
Rd production H ₂	0.72	0.42	0.29	0.23
Rd distribution route	0.67	0.67	0.67	0.67
Rd moteur électrique	0.45	0.45	0.45	0.45
Rendements finaux	0.19	0.13	0.09	0.06

Tableau 11 – Rendements globaux du puits d'énergie à l'hélice pour les solutions reformage et électrolyse de l'eau. La solution par reformage utilise la chaîne existante de raffinage des dérivés pétroliers, les investissements restent faibles. Les lignes de couleur grise sont identiques aux trois lignes du tableau 10 positionnées au-dessus la ligne "Rendements finaux".

L'intérêt énergétique des énergies fossiles carbonées pour la pile à combustible apparaît clairement et la comparaison des résultats finaux repositionne l'intérêt de la filière nucléaire par rapport aux filières gaz naturel, aérienne ou marine. Les rendements de ces deux dernières filières, hélices aériennes ou hydroliennes, supérieurs de 50% au rendement de la filière nucléaire, explique la prolifération de ces solutions dans le monde. Ces résultats ne doivent cependant pas faire oublier l'importance de rechercher des solutions pour s'affranchir des effets délétères de l'utilisation des ressources carbonées fossiles et réduire très rapidement l'accroissement des émissions des gaz à effet de serre [1].

CONCLUSION

Dans un contexte de réduction nécessaire d'utilisation des réserves de pétrole pour limiter le réchauffement climatique lié aux activités humaines, le recours à l'hydrogène est souvent évoqué. Cette perspective nécessite alors de fournir des ordres de grandeur pour quantifier et relativiser son intérêt. Les équivalences énergétiques entre l'hydrogène et les carburants d'aviation sont, dans un premier temps, rappelées. Les rendements de production et de distribution de l'hydrogène puis les rendements des puits d'électricité et d'énergie à l'hélice pour la recharge de batteries et la production d'hydrogène par électrolyse sont étudiés. Les rendements de production d'hydrogène pour la pile à combustible des puits d'électricité à l'hélice puis des différents puits d'énergie à l'hélice sont enfin analysés.

La comparaison des pouvoirs calorifiques inférieurs de l'hydrogène avec les carburants aéronautiques justifie à lui seul l'intérêt de l'hydrogène mais les contraintes de transport et de distribution réduisent de manière considérable l'intérêt de la filière. Un tiers de l'énergie transportée est ainsi consommé entre les centres de stockage et les réservoirs des aéronefs. S'agissant de la filière électrique utilisée pour produire l'hydrogène, l'efficacité du stockage d'énergie par batteries est au moins trois fois plus importante que l'efficacité de la solution pile à combustible. En choisissant enfin de prendre en compte les rendements de conversion des énergies primaires destinées à alimenter les centrales électriques (aérolignes, hydrauliques, thermiques à flammes et nucléaires), l'efficacité du stockage d'énergie par batterie s'affirme de nouveau. Les rendements "Monde" du puits d'énergie à l'hélice pour les filières batteries et pile à combustible sont ainsi respectivement proches de 0.35 et 0.09 ; resp. 0.32 et 0.09 pour la France. Les

³⁰ <https://www.gazdebordeaux.fr/l-energie-et-nous/les-avantages-du-gaz-naturel>

³¹ D'après H. Kerdjoudj, Commissariat à l'Énergie Atomique (USTHB-CEA), [I].

rendements de production de l'hydrogène à l'hélice puis du puits d'énergie à l'hélice pour la pile à combustible confirment l'intérêt de la solution par reformatage, montrent l'intérêt provisoire des centrales à gaz de nouvelle génération et relativisent l'intérêt de la filière nucléaire par rapport aux énergies éoliennes ou hydroliennes. Dans le cas de la pile à combustible, les rendements du puits d'énergie à l'hélice pour ces deux dernières filières sont supérieurs de 50% au rendement de la filière nucléaire et explique la prolifération de ces solutions dans le monde. **Les résultats confirment que le rendement des aéronefs électriques alimentés par des ensemble de batteries reste très largement supérieur au rendement de la filière pile à combustible.** Le choix de la filière devra cependant prendre en compte l'énergie massique de l'hydrogène 222 fois plus élevée que celle des batteries Lithium-ion actuelles ; un avantage considérable pour l'autonomie et la puissance.

GLOSSAIRE

PCI (LHV for Lower Heating Value in english) : pouvoir Calorifique Inférieur, quantité d'énergie en Joule dégagée par la combustion complète d'un kg de combustible solide, liquide ou gazeux sans prise en compte de l'énergie de vaporisation de l'eau (chaleur latente).

PCS (HHV for Higher Heating Value in english) : pouvoir Calorifique Supérieur, quantité d'énergie en Joule dégagée par la combustion complète d'un kg de combustible solide, liquide ou gazeux avec prise en compte de l'énergie de vaporisation de l'eau (chaleur latente). La chaleur latente de vaporisation (de la phase liquide à la phase gazeuse) est récupérée par condensation de la vapeur d'eau.

Classification des centrales nucléaires : établie en 2001, la classification est associée à la date de maturité des technologies. Quatre générations sont actuellement identifiées. Les centrales de première génération sont les centrales construites avant 1970, elles utilisent la filière UNGG pour Uranium Naturel-Graphite-Gaz. Les centrales de seconde génération construites entre 1970 et 1998 sont associées à la filière REP pour Réacteur à Eau Pressurisée. Les centrales de troisième génération sont dérivées des centrales de première et de seconde générations. En France, elles utilisent la filière RPE pour Réacteur Pressurisé Européen. Les centrales de quatrième génération sont en cours de conception et devraient être déployées à l'horizon 2040-2050. Leur conception s'appuie sur l'une des six filières définies par le Forum International génération IV. La température élevée de fonctionnement de ces centrales, comprise entre 850 et 1000°C, peut être utilisée pour fabriquer l'hydrogène par voie thermochimique [C]. En parallèle de cette classification, il est d'usage de distinguer cinq grandes catégories de centrales en fonction de la nature du combustible, du fluide caloporteur et du modérateur ; substance qui ralentit les neutrons : le réacteur à eau pressurisée (REP), le réacteur à eau bouillante (REB), le réacteur à eau lourde, le réacteur à neutrons rapides (RNR) et le réacteur caloporteur gaz (RCG). En France, tous les réacteurs destinés à la production d'électricité sont des REP [D].

RÉFÉRENCES

- [1] *Climate Change 2021, The Physical Science Basis* ; Working Group 1 Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ; IPCC, 2021.
- [2] *Synthèse du rapport AR6 du GIEC publié le 9 août 2021*, synthèse vulgarisée du résumé aux décideurs du groupe de travail de l'AR6 – The Shifters.
- [3] Jean Jouzel & Baptiste Denis ; *Climat, parlons vrai*, éditions François Bourin, Harmoni Mundi livre, ISBN 979-10-252-0482-5, 2020.
- [4] Boucher O., Braconnot P., Masson-Delmotte V. et Salas y Mélia D. ; *Changement climatique : les résultats des nouvelles simulations françaises*, CNRS – Météo France et CEA, 17 septembre 2019.
- [5] Leprince P. et collectif Technip ; *Le raffinage du pétrole, procédés de transformation*, tome 3, publication de l'Institut Français du Pétrole, Éditeur Technip, ISBN 978-2-7108-0730-8, 1998.
- [6] J.-P. Wauquier ; *Le raffinage du pétrole, pétrole brut, produits pétroliers, schémas de fabrication*, tome 1, publication de l'Institut Français du Pétrole, Éditeur Technip, ISBN 978-2-7108-0668-4, 1994.
- [7] EU-ETS : liste des facteurs d'émission CO₂ et PCI.

-
- [8] Bricault et al ; *L'hydrogène décarboné : un défi pour la transition énergétique*, éditeur Lavoisier, ISBN 978-2-7430-2477-2, 2019.
 - [9] Dessus B., Laponche B. ; association Global Chance ; *Réduire le méthane : l'autre défi du changement climatique*, Agence Française de Développement (AFD), document de travail, août 2008.
 - [10] *Production d'hydrogène à partir de combustibles fossiles*, Association française pour l'hydrogène et les piles à combustibles, Mémento de l'hydrogène, fiche 3.1.1, source IFP-AFHYPAC, révision septembre 2014.
 - [11] Langlois P. ; *Rouler sans pétrole*, Éditions Multi Monde, ISBN 978-2-89544-130-4, 2008.
 - [12] Schroeder C. ; *Électrotechnique des centrales électriques*, EDF, collection EDF R&D, édition Lavoisier, ISBN 978-2-7430-2351-5, septembre 2018.
 - [13] Le Gourières D. ; *Les éoliennes, théorie, conception et calcul pratique*, Éditions du Moulin Cadiou, Diffusion Eyrolles, GEODIF/SODIS, ISBN13 978-2-953004-10-6.
 - [14] Normand T., Andreani J. et Tejedor V. ; *Les cycles thermodynamiques des centrales nucléaires*, Éditeur Transvalor – Presses des Mines, Collection Technologies, Diffusion GEODIF, 2010.
 - [15] Rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques sur *l'énergie nucléaire du futur et les conséquences de l'abandon du projet de réacteur nucléaire de 4e génération « Astrid »* ; rapport déposé sur le bureau de l'Assemblée Nationale par Cédric Villani, président de l'Office, et Gérard Longuet, premier vice-président de l'Office ; 8 juillet 2021.
 - [16] Bose T. and Malbrunot P.; *Hydrogen, facing energy challenges of the 21st century*, Editor John Libbey, diffusion Geodif, ISBN 978-2-74-200639-7, 2007.
 - [17] *The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak*; Final Report of 15 April 2003 with foreword Ulf Bossel, Baldur Eliasson and Gordon Taylor European Fuel Cell Forum, 26 February 2005.
 - [18] Boucher S. et T. Alleau T. ; AFHYPAC, *Transport hydrogène*, Fiche 4.1, 2016.
 - [19] Extending the European Hydrogen Backbone ; A European Hydrogen Infrastructure Vision Covering 21 Countries, April 2021.
 - [20] ADEME ; *Panorama et évaluation des différentes filières d'autobus urbains*, Expertise, 2018.
 - [21] ADEME ; Les potentiels du véhicule électrique, Les avis de l'ADEME, avril 2016.

SITES INTERNET DE RÉFÉRENCE

- [A] <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>
- [B] https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?pci_et_masse_volumique.htm
- [C] <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/nucleaire/essentiel-sur-generations-reacteurs-nucleaires.aspx>
- [D] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/les-differents-types-de-reacteurs-nucleaires>
- [E] <https://globalenergymonitor.org/projects/global-fossil-infrastructure-tracker/>
- [F] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-nucleaire-en-chiffres>
- [G] <https://www.rte-france.com/eco2mix/les-chiffres-cles-de-lelectricite>
- [H] <https://www.pipistrel.ad/fr/pipistrel/entrainement/velis-electro>
- [I] <https://www.yumpu.com/fr/document/read/16641182/le-traitement-des-minerais-duranium-h-kerdjoudj-> ; <https://lelementarium.fr/element-fiche/uranium/>

VALEURS ÉNERGÉTIQUES COMPARÉES – ORDRES DE GRANDEUR

- 1 tonne d'uranium → 15 119 000 kWh (13000 fois la tonne de pétrole)
- 1 tonne d'hydrogène → 33361 kWh
- 1 tonne d'AVGAS → 12222 kWh
- 1 tonne de pétrole → 11630 kWh
- 1000 m³ de gaz naturel → 10002 kWh (0.86 fois la tonne de pétrole)

1 tonne de houille → 7199 kWh (0.619 fois la tonne de pétrole)
 1 tonne de bois → 3739 kWh (0.3215 fois la tonne de pétrole)
 1 tonne de tourbe → 2646 kWh (0.2275 fois la tonne de pétrole)
 1 tonne de batteries Lithium-ions → 150 kWh (0.0129 fois la tonne de pétrole)
 Énergie massique hydrogène/énergie massique batteries Lithium-ion = 33361/150 = 222
 1 Wh = 3600 Joule et 1 Wh/kg = 1 kWh/tonne

ANNEXE 1 – Transformation adiabatique réversible

Pour une transformation adiabatique réversible permettant de comprimer un gaz d'atomicité γ du volume ϑ_e à la température T_e et à la pression extérieure P_e dans un volume ϑ_r à la pression P' , le travail des forces de pression est donné par :

$$\Delta E = \frac{1}{\gamma - 1} [P' \vartheta_r - P_e \vartheta_e] \quad (1)$$

La température de l'air T' contenu dans le volume ϑ_r (volume du réservoir Haute Pression) après la compression adiabatique s'exprime alors à partir de la relation isentropique :

$$T' = T_e \left(\frac{P_e}{P'} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \quad (2)$$

Et la pression finale P_r de l'air contenu dans le réservoir de volume ϑ_r **après refroidissement à volume constant de la température T' à la température T_e** est donnée par :

$$\frac{P_r}{T_e} = \frac{P'}{T'} \quad (\text{de } P\vartheta = nR'T, \text{ système fermé}) \quad (3)$$

La combinaison des relations (2) et (3) permet d'exprimer la pression P' en fonction des pressions P_r et P_e par :

$$P' = P_r^\gamma P_e^{1-\gamma} \quad (4)$$

Cette relation introduite dans l'équation (1) est ensuite utilisée pour exprimer le travail nécessaire pour comprimer l'air du volume ϑ_e au volume ϑ_r à la pression P_r et à la température extérieure T_e . Ce travail est donné par :

$$\Delta E = \frac{1}{\gamma - 1} [P_r^\gamma P_e^{1-\gamma} \vartheta_r - P_e \vartheta_e]$$

ANNEXE 2 – Caractéristiques du Vélo Électro

Envergure (m)	10.71
Longueur (m)	6.47
Surface alaire (m ²)	9.51
Masse à vide / maxi (kg)	428 / 600
Puissance du moteur (kW)	57.6
Vitesse de croisière (km/h)	166
Autonomie à la vitesse de croisière (km)	200
Vitesse à ne pas dépasser (km/h)	200
Finesse en croisière	15