

École polytechnique de Louvain

Faisabilité et durabilité d'une aviation commerciale décarbonisée

Auteur: **Amaury PONCIN**

Promoteur: **Jean-Pierre RASKIN**

Lecteurs: **Caroline BERNIER, Vincent DESTOOP, Laurent FRANCIS**

Année académique 2019–2020

Master [120] : ingénieur civil mécanicien

Remerciements

Mes remerciements s'adressent tout d'abord à mon promoteur, Monsieur **Jean-Pierre Raskin**, sans lequel une telle opportunité de mémoire sur un sujet aussi passionnant et qui me tient particulièrement à coeur ne se serait probablement pas présentée. Je le remercie tout particulièrement pour sa confiance, sa disponibilité, ses idées et toute l'aide apportée.

Je tiens également à exprimer ma gratitude aux organisateurs de la conférence *E²FLIGHT* 2020 à Stuttgart, et particulièrement à Madame **Sabine Winterfel**, pour m'avoir exceptionnellement permis d'y assister. Ces deux jours de conférence sur les vols sans émissions et l'aviation électrique auront été fructueux en termes de découvertes, d'informations et riches en rencontres. Je tiens d'ailleurs à remercier chaleureusement Madame **Maryam Nojabae** pour son précieux partage de connaissances concernant les batteries.

J'exprime aussi de sincères remerciements à Madame **Maïté Croonenborghs** pour son support dans la sélection de matériaux et pour ses réponses à mes questions, et à Monsieur **Maxime Frécinaux** pour son expertise financière et ses explications.

Je ne manquerai pas de remercier Monsieur **Axel Doffey** pour son temps qu'il m'a accordé afin de pouvoir réaliser une interview à propos de H55, pionniers dans l'aviation électrique.

Je remercie également Madame **Caroline Bernier**, Monsieur **Laurent Francis** et Monsieur **Vincent Destoop** pour leur intérêt et pour avoir accepté de constituer le jury de mon mémoire de fin d'études.

Enfin, je ne peux terminer sans remercier mes soeurs, **Tiffany** et **Mégane**, pour leur appui constant, mes **parents** pour leurs critiques et relectures attentives, ainsi que mes **amis** pour leur soutien, conseils et confiance. Je souhaite conclure ces remerciements en adressant une attention particulière à **Sandrine Ladam** qui m'a soutenu tout au long de la réalisation de ce mémoire, pour son encouragement sans relâche et pour ses nombreuses relectures et commentaires constructifs.

"L'aviation peut être neutre en carbone plus tôt que nous le pensons."
Richard Branson

"Il y a dix ans, les responsables des constructeurs aéronautiques juraient que jamais on ne verrait voler un avion électrique. Quand nous avons lancé le projet Solar Impulse, on nous a dit qu'on ne parviendrait pas à le faire décoller. Quand on l'a fait voler, on nous a dit qu'il se crasherait."
Bertrand Piccard

"Si les batteries atteignent une densité énergétique de 400 Wh/kg, alors les batteries battent le kérosène et les avions électriques deviennent viables."
Elon Musk

"L'aviation électrique devient une réalité et nous pouvons désormais prévoir un avenir qui ne dépend pas exclusivement du carburant pour avions."
Johan Lundgren, PDG d'easyJet

" Dans cinq ans, nous nous attendons à ce que le stockage d'hydrogène liquide soit qualifié pour la sécurité dans les avions, ce qui nous permettra d'atteindre des portées de plus de 1 000 kilomètres dans des avions encore plus grands."
Valery Miftakhov, fondateur de ZeroAvia

Résumé

L'introduction des avions à réaction a inauguré une ère de mobilité humaine sans précédent et l'aviation commerciale engendre aujourd'hui des millions d'emplois dans le monde. Cependant, l'aviation commerciale conventionnelle génère de la pollution sonore à proximité des aéroports et participe considérablement au réchauffement climatique, notamment en émettant environ 3% des émissions de dioxyde de carbone mondiales, et probablement jusqu'à 10% d'ici 2050 si aucune action n'est entreprise. Des progrès technologiques récents ont permis d'augmenter le rendement des réacteurs pour réduire progressivement la consommation de carburant et donc les émissions. Toutefois, ces améliorations sont contrebalancées par l'augmentation considérable du trafic aérien, estimée à presque 5% par an. Par conséquent, la pression est élevée pour réduire l'impact climatique de l'aviation commerciale, ce qui encourage le développement de concepts d'avions décarbonisés grâce à de nouveaux systèmes de propulsion.

L'objectif principal de ce travail est d'examiner le potentiel d'avions dotés systèmes de propulsion électrifiés, en particulier l'avion totalement électrique, à être plus durable, tout en évaluant leur faisabilité technique et économique.

Pour ce faire, ce travail s'appuie sur la méthodologie d'analyse de durabilité dite "par couche" développée par MICHAËL F. ASHBY. Après une contextualisation environnementale, sociétale et législative, la faisabilité est évaluée notamment au travers d'analyses de revues scientifiques et de calculs en besoins énergétiques pour étudier le rayon d'action d'avions totalement électriques. Ensuite, une étude estime la viabilité économique pour les compagnies aériennes à opérer des avions décarbonisés. Enfin, une méthodologie systématique permettant une sélection de matériaux durables et plus légers afin de réduire les besoins énergétiques en vol est présentée et appliquée à un cas d'étude. Ces thématiques permettront de synthétiser les freins et leviers par rapport aux piliers du développement durable. Finalement, une réflexion débouchant sur différents enjeux et perspectives d'une aviation commerciale décarbonisée sera établie.

L'analyse de faisabilité technologique révèle les nombreux challenges auxquels les avions totalement électriques devront faire face. Parmi ceux-ci, la densité énergétique des batteries devra atteindre une valeur d'environ 800 [Wh/kg] afin de permettre à ces avions décarbonisés de couvrir la moitié des vols commerciaux. Cependant, ces avions seront plus durables, particulièrement en éliminant toute émission de polluants en vol et en réduisant la pollution sonore. De plus, l'étude de la faisabilité économique démontre que leur utilisation impliquerait une réduction des frais pour les compagnies aériennes oscillant entre 20 et 43 %. L'avion totalement électrique offre de nouvelles synergies comme l'amélioration du rendement énergétique combiné à de nouvelles possibilités de conceptions et de paramètres de vols, ce qui pourrait favoriser l'essor des avions décarbonisés plus rapidement que les estimations basées sur des comparaisons analogues avec les avions conventionnels.

Liste des symboles

Abréviations

<i>ACARE</i>	Advisory Council for Aeronautics Research in Europe
<i>ACD</i>	Aviation Commerciale Décarbonisée
<i>ADME</i>	Agence De l'environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
<i>APU</i>	Auxiliary Power Unit
<i>ASN</i>	Aviation Safety Network
<i>ATAG</i>	Air Transport Action Group
<i>ATE</i>	Avion Totalement Électrique
<i>CAEP</i>	ICAO's Committee on Aviation Environmental Protection
<i>CAT</i>	Coût Actualisé du Transport
<i>CMPC</i>	Coût Moyen Pondéré du Capital
<i>CORSIA</i>	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation
<i>e – VTOL</i>	Electric Vertical Takeoff and Landing
<i>EASA</i>	European Union Aviation Safety Agency
<i>EEA</i>	European Economic Area
<i>EUETS</i>	European Union Emissions Trading System
<i>FAA</i>	Federal Aviation Administration
<i>FRC</i>	Facteur de Récupération du Capital
<i>GES</i>	Gaz à Effet de Serre
<i>GIEC</i>	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
<i>IATA</i>	International Air Transport Association

<i>ICAO</i>	International Civil Aviation Organization
<i>LCOE</i>	Levelized Cost Of Energy
<i>MEA</i>	More Electric Aircraft
<i>OMS</i>	Organisation Mondiale de la Santé
<i>PED</i>	Prupulsion Électrique Distribuée
<i>RA</i>	Rayon d'Action
<i>SRIA</i>	Strategic Research and Innovation Agenda
<i>UE</i>	Union Européenne

Liste des figures

1.1	Plan de travail basé sur l'approche par couche de MICHAËL F. ASHBY.	3
2.1	Réseau mondial de vols en 2015 par distance (1 nmi = 1.852 km) [8].	4
2.2	Émissions types d'un réacteur d'avion [14].	5
2.3	Croissance des émissions et du réchauffement lié à l'aviation [2].	6
2.4	Émission moyenne de dioxyde de carbone des différents modes de transport, exprimé en grammes par passager et par kilomètre [18].	6
3.1	Éléments chimiques constitutifs des moteurs à piston comparés aux réacteurs types turbosoufflantes modernes. Les matériaux critiques utilisés sont colorés en rouges, les autres matériaux utilisés en jaune [38].	10
3.2	Thématiques constituant la recherche de faits [6].	11
4.1	Développement d'avions à propulsion électrique [56].	14
4.2	Vahana de Airbus [66].	14
4.3	Illustration de l'E-Fan X [69].	15
4.4	Alice au Salon du Bourget 2019 [74].	15
4.5	Illustration de concept du Wright 1 [75].	15
4.6	H55 Bristell Energic [79].	16
4.7	Ampaire Electric EEL [82].	16
4.8	Illustration du E10 de Scylax [83].	16
4.9	Sous-systèmes conventionnels [90].	17
4.10	Sous-systèmes du MEA [90].	17
4.11	Représentation schématique des différentes architectures pertinentes des propulsions électriques [101].	19
4.12	Rendement de la propulsion au kérosène (turbosoufflante et turbopropulseur) par rapport à la propulsion électrique alimentée par batteries, adapté de [103].	20
4.13	Principaux challenges relatifs aux batteries.	21
4.14	Puissance de pointe requise selon les phases d'un vol (avion conventionnel de ± 150 passagers) [101].	22
4.15	Historique de coût des batteries Li-ion [111].	22
4.16	Principe de fonctionnement d'une cellule Li-S [119].	24
4.17	Résumé des prévisions concernant la densité de puissance et d'énergie des futures batteries [114].	25
4.18	Représentation schématique des configurations possibles de la cellule Li-air [129].	26
4.19	Représentation schématique et avantages principaux du passage de l'électrolyte de l'état liquide à l'état solide, selon SOLVAY [136].	27
4.20	Graphes reprenant les métaux critiques en fonction de l'importance économique et du risque de pénurie, adapté de [155].	30
4.21	Représentation schématique de l'extraction et de la transformation du lithium [156].	30
4.22	Croissance de la demande en matières premières pour les batteries Li-ion et moteurs électriques de tous véhicules électriques. (BEV : véhicule électrique à batterie. PHEV : véhicule électrique hybride rechargeable. HEV : véhicule électrique hybride) [163].	31

4.23	Principe de l'ingestion de la couche limite au niveau du réacteur [164].	32
4.24	Rendement de la propulsion turboélectrique [51].	32
4.25	Configuration d'une propulsion hybride en a) série et b) parallèle [64].	34
4.26	Représentation comparative des coûts annuels cumulés des émissions du kérosène et de l'hydrogène [178].	36
4.27	Production de H_2 : représentation schématique comparative des processus de reformage et de l'électrolyse à l'aide d'énergies renouvelables [191].	37
4.28	Concept d'une pile à combustible hydrogène [195].	38
4.29	Affiche du concept d'une propulsion électrique distribuée - <i>E²FLIGHT Conference Stuttgart 2020</i>	39
4.30	Modèle du concept d'une propulsion électrique distribuée - <i>E²FLIGHT Conference Stuttgart 2020</i>	39
4.31	Représentation simplifiée et schématique de l'équilibre des forces en vol d'un avion conventionnel.	41
4.32	Graphe (rayon d'action, densité d'énergie) pour un avion totalement électrique.	42
4.33	Graphe du rayon d'action, batteries Li-S vs Li-air.	44
4.34	Graphe du rayon d'action, kérosène vs Li-S (1000[Wh/kg]).	44
4.35	Graphe du rayon d'action en fonction de la charge utile pour un TBM 700 hybride, adapté de [206].	45
5.1	Évolution du prix annuel moyen des quotas d'émission du EU ETS, données issues de [210].	48
5.2	Croissance des émissions de l'aviation depuis 2013 [209].	49
5.3	Estimation de l'évolution du prix du quota d'émission de carbone [213].	49
5.4	Proportion de la longueur de vols et de la quantité de carburant utilisée en fonction de la distance parcourue, en 2014 [11].	55
6.1	Représentation simplifiée et schématique de l'équilibre des forces en vol.	61
6.2	Proportion de matériaux utilisés dans l'A350 [262].	62
6.3	Représentation schématique des conséquences de mauvaises propriétés mécaniques pour les matériaux des ailes d'avions	63
6.4	Représentation schématique du longeron [267].	63
6.5	Notation des grandeurs caractéristiques du longeron en poutre en I [268].	63
6.6	Représentation schématique du moment de flexion sur les ailes en vol stationnaire.	65
6.7	Contrainte normale exercée en vol stationnaire.	67
6.8	Sélection finale graphe CES EDUPACK - indices de performances P1 et P2.	68
6.9	Sélection finale graphe CES EDUPACK - indices de performances P3 et P4.	68
6.10	Procédure pour la sélection de procédés de fabrication [281].	73
6.11	Moulage [269].	74
6.12	Pultrusion [269].	74
6.13	Moulage par injection-réaction [269].	74
6.14	Placement automatique de fibres [269].	74
6.15	Extrusion de métaux à chaud [269].	74
6.16	Graphe montrant la comparaison économique des 5 procédés candidats avec celui pour le matériau de référence (courbe verte).	76
6.17	Graphe montrant la comparaison économique des 5 procédés candidats pour le composite.	76
6.18	Graphe montrant la comparaison économique des procédés en négligeant l'investissement.	77
6.19	Graphe de la comparaison des précisions dimensionnelles atteignables pour les procédés sélectionnés.	78
6.20	Graphe de la comparaison du niveau de rugosité atteignable pour les procédés sélectionnés.	78
6.21	Eco-audit du longeron fabriqué en AA7085 et en composite renforcé en fibres naturelles - empreinte carbone.	79
7.1	Synthèse - débattre de l'impact des analyses sur les trois capitaux du développement durable [293].	81
7.2	Aperçu schématique des principaux éléments abordés aux chapitres 2 à 6.	82

8.1	Projection temporelle du développement des avions à propulsion totalement électrique, hybride électrique, turboélectrique et à hydrogène en fonction des progrès au niveau de la densité énergétique des batteries.	89
-----	---	----

Liste des tableaux

4.1	Comparaison de certains sous-systèmes dans les avions conventionnels et les MEA, basé sur [92].	17
4.2	Comparaison technique des principales technologies de cellules de batteries [117, 120, 122, 127, 129, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148].	28
4.3	Comparaison de l'intensité carbone liée à la production d'électricité et de batteries.	29
4.4	Comparaison de certaines propriétés du kérosène et de l'hydrogène [178, 179].	36
4.5	Gamme d'hybridation pour les différents systèmes de propulsion électriques.	44
5.1	Résultat de calcul du FRC.	51
5.2	Comparaison du coût des émissions et de la consommation de carburant pour l'aviation. Données issues de [18, 177, 231, 232, 233, 234].	52
5.3	Comparaison du LCOE pour différentes technologies de batteries, valeurs des paramètres issus de [117, 144, 152, 217, 235, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245].	53
5.4	Résumé des paramètres de coût pour la comparaison économique.	56
5.5	CAT d'un avion conventionnel - 2020.	57
5.6	CAT d'un avion conventionnel - 2050.	57
5.7	CAT d'un ATE - 2020.	58
5.8	CAT d'un avion alimenté à l'hydrogène - 2020.	58
6.1	Évolution de la proportion massique de composite dans la structure d'avions Airbus, adapté de [256].	62
6.2	Compilation des propriétés des matériaux candidats, obtenus des graphes 6.8 et 6.9, comparé au matériaux de référence repris à la ligne verte.	69
6.3	Résultats des mesures de performance des 10 matériaux candidats, comparé au matériau de référence de la ligne verte. La mesure de performance "point" reprend la mesure de performance minimale. Seuls les résultats complets des mesures de performances pour l'objectif de réduction de masse sont affichés (m_1 , m_2 , m_3 et m_4).	70
6.4	Classement des matériaux candidats. Le matériau de référence est repris sur la ligne verte.	71
7.1	Synthèse des impacts sur les trois piliers du développement durable	83

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	iii
Nomenclature	iv
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	ix
Table des matières	x
1 Introduction	1
1.1 Objectifs	2
1.2 Champ d'application	2
1.3 Plan de travail	3
2 Contexte et problématique	4
2.1 Situation	4
2.2 Impact climatique du transport aérien	5
2.3 Éléments composant l'articulation	7
3 Méthodologie d'analyse de durabilité	8
3.1 Définition du problème	8
3.2 Acteurs de l'articulation	9
3.3 Recherche de faits	11
3.4 Synthèse et réflexion	12
4 Électrification de l'aviation	13
4.1 Contexte	13
4.1.1 Applications à l'aviation générale et commerciale	14
4.1.1.1 Mobilité aérienne urbaine	14
4.1.1.2 Projets actuels et futurs	15
4.1.2 MEA - <i>More Electric Aircraft</i>	17
4.2 Propulsion électrique	18
4.2.1 Totalement électrique	20
4.2.1.1 Challenges	21
4.2.1.2 Batteries : technologie actuelle & future	23
4.2.1.3 Bilan écologique lié à un ATE	29
4.2.2 Turboélectrique	32
4.2.3 Hydrogène & hybride hydrogène-électrique	34
4.2.3.1 Hydrogène en tant que carburant	35
4.2.4 Résumé	39

4.3	Performances	40
4.3.1	Paramètres et notations	40
4.3.2	Rayon d'action - détermination de l'autonomie	40
4.3.2.1	ATE	41
4.3.2.2	Avion hybride	44
4.4	Conclusion	46
5	Étude comparative des coûts	47
5.1	Coûts des émissions de GES	48
5.2	Coûts d'achat et d'exploitation	51
5.2.1	Coûts en capitaux	51
5.2.2	Coûts d'achat d'avions	52
5.2.3	Coûts opérationnels directs	52
5.2.3.1	Énergie (carburant)	52
5.2.3.2	Maintenance	54
5.2.3.3	Équipage	54
5.2.3.4	Charges et taxes	54
5.3	Calcul du coût actualisé du transport	55
5.4	Conclusion	59
6	Matériaux	60
6.1	Contexte	61
6.2	Objectifs & méthodologie	62
6.3	Cas d'étude - longeron d'aile	63
6.3.1	Sélection & analyse de matériaux	64
6.3.2	Sélection & analyse de procédés de fabrication	72
6.4	Conclusion	80
7	Synthèse	81
8	Réflexion	85

Chapitre 1

Introduction

L'aviation commerciale soutient 8 % de l'activité économique mondiale en termes de PIB, mais il s'agit d'un pollueur important qui contribue à environ 3 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre [1], et cela tend à croître. En Europe, ses émissions ont doublé depuis 1990, et au niveau mondial, elles pourraient, si aucune action n'est entreprise, tripler d'ici 2050 [2]. Celles-ci sont dues à l'utilisation d'hydrocarbures liquides comme carburant pour les réacteurs d'avions en raison de leur quantité élevée d'énergie par unité de poids et de volume, de leur disponibilité et de leur faible coût. En 2015, la flotte aérienne mondiale a consommé 276 millions de tonnes de kérosène, soit 7% des produits pétroliers mondiaux [3]. La combustion prenant place dans les réacteurs rejette de nombreux polluants dans l'atmosphère, le principal étant le CO_2 . Cependant, les effets liés aux autres émissions comme les NO_x ou la formation de traînées de condensation pourraient, en plus de participer au réchauffement climatique, augmenter les quelque 16 000 décès prématurés par an attribuables à la pollution de l'aviation dans le monde [4]. Les émissions doivent être réduites et ramenées à zéro d'ici 2050 pour respecter l'accord de Paris limitant l'augmentation des températures à 1.5 °C pour 2050 par rapport aux niveaux de 1990. L'aviation risque toutefois de voir ses émissions augmenter davantage en raison de la croissance du nombre de passagers qui est estimée à 4,8% par an d'ici 2030 [5]. En plus de l'impact environnemental de l'aviation commerciale, l'impact social est également lié aux réacteurs conventionnels en causant de la pollution sonore, ce qui induit des effets néfastes sur la santé parmi les populations concernées.

Pour réussir à mettre l'aviation commerciale sur la voie de la décarbonation, de nouveaux types de systèmes de propulsion doivent donc être développés. En effet, l'augmentation du rendement énergétique ou l'utilisation de carburants à faible teneur en carbone (par exemple les biocarburants) pourraient partiellement réduire les émissions de CO_2 de l'aviation, mais jamais totalement. De même, l'utilisation d'hydrogène liquide en tant que carburant pourrait réduire considérablement les émissions directes de CO_2 , mais la teneur plus élevée en hydrogène entraînerait une augmentation de la formation de traînées de condensation, accentuant l'effet de serre. Jusqu'à peu, les avions n'impliquant pas de combustion en vol n'ont pas été étudiés en profondeur. Seuls les avions totalement électriques présentent le potentiel d'éliminer, en vol, à la fois les émissions directes de CO_2 et les impacts directs non liés au CO_2 .

Ce travail a donc pour but d'étudier la décarbonation de l'aviation commerciale spécifiquement au travers de l'électrification du système de propulsion. Cela n'a du sens que si c'est durable. Dès lors, ce mémoire s'appuie sur la méthode d'analyse de durabilité développée par MICHAËL F. ASHBY.

1.1 Objectifs

Les objectifs de ce mémoire sont d'analyser la durabilité et la faisabilité technologique et économique d'une aviation commerciale décarbonisée (ACD) à l'aide de recherches et d'analyses critiques de revues scientifiques, ainsi que de les évaluer à l'aide de calculs, simulations et études. Le but final est de fournir une réflexion objective, holistique et critique à la question de recherche "*Une aviation commerciale décarbonisée est-elle faisable et durable ?*".

Objectifs de recherches Les recherches, analyses et études menées tout au long de ce travail ont pour but plus spécifique de :

- Identifier et définir le contexte et la problématique entourant l'ACD ;
- Identifier, catégoriser et décrire les technologies pertinentes pouvant rendre l'aviation commerciale plus décarbonisée et durable ;
- Analyser la faisabilité de ces technologies ;
- Analyser certains paramètres de performance clés de ces technologies ;
- Analyser les enjeux économiques de ces technologies :
 - Perspectives sur l'évolution des frais pour les compagnies aériennes ;
 - Estimation du délai de mise sur le marché (échelonnement temporel) ;
- Analyser la durabilité de ces technologies ;
- Fournir des cas concrets appliqués à l'étude afin de donner des exemples et points de référence ;
- Contribution à l'identification des éventuelles lacunes et opportunités en matière de recherche ;
- Établir une vision argumentée, claire et temporelle sur le court, moyen et long terme d'une trajectoire technologique faisable et durable amenant à une décarbonation du transport aérien commercial.

1.2 Champ d'application

La décarbonation de l'aviation commerciale, ce qui comprend le transport de biens et de personnes par avions en lignes régulières, peut être atteinte de multiples manières, notamment en optimisant et innovant le fuselage, les systèmes de propulsion, la gestion du trafic aérien et les opérations de vols. Dans le cadre de ce mémoire, l'étude se limite à l'électrification de l'avion, principalement à travers le système de propulsion. D'autres aspects menant à décarboniser l'aviation commerciale sont toutefois brièvement abordés. Il est cependant important que d'autres activités de recherches soient menées de manière approfondie également dans ces domaines afin d'accéder plus rapidement à une analyse complète.

Les spécifications techniques particulièrement détaillées des solutions de propulsion alternatives possibles et toute amélioration de la technologie de propulsion des moteurs sont exclues. En outre, toute spécification particulièrement détaillée du fuselage, de la structure de propulsion, de l'aérodynamique et des changements structurels bénéfiques ne font pas non plus partie de ce travail. En ce qui concerne la comparaison économique, l'évolution des coûts de la main-d'œuvre des compagnies aériennes due à la différence de configuration des avions, l'augmentation et la diminution de la demande en personnel navigant et le coût spécifique à la route et au modèle d'avion sont exclus et supposés rester identiques pour toutes les technologies présentées. Les systèmes de propulsion étudiés sont uniquement évalués en fonction de leur potentiel global de mise en œuvre et de leurs avantages en termes de coûts et performances pour les différentes gammes d'avions et les différentes capacités de passagers.

1.3 Plan de travail

Afin de répondre à ces objectifs de recherche, la structure de ce travail s'appuie sur la méthode d'analyse développée par MICHAËL F. ASHBY, connu mondialement dans le domaine de la science des matériaux et plus spécifiquement pour son livre intitulé "Materials and sustainable development" (*Matériaux et développement durable*) [6] et son approche *par couche*. Dès lors, le contexte et les objectifs motivant le développement de nouveaux avions décarbonisés ainsi que les acteurs ayant un rôle à jouer ou qui seront impactés sont définis. Ensuite, des recherches et analyses de faits sont réalisées sur base des impacts de l'ACD sur six thématiques que sont l'environnement, la société, la législation, l'énergie, l'économie et les matériaux, grâce à différentes sources, à savoir des articles scientifiques, des livres de référence, internet et des interviews. Enfin, ces recherches et analyses sont résumées et leurs impacts sur le développement durable sont analysés et synthétisés dans un tableau. Cela permettra de conclure le travail par une réflexion critique apportant des éléments de réponse et des perspectives à la question de recherche.

Le plan de travail de ce mémoire, basé sur cette approche, est représenté sur la FIGURE 1.1.

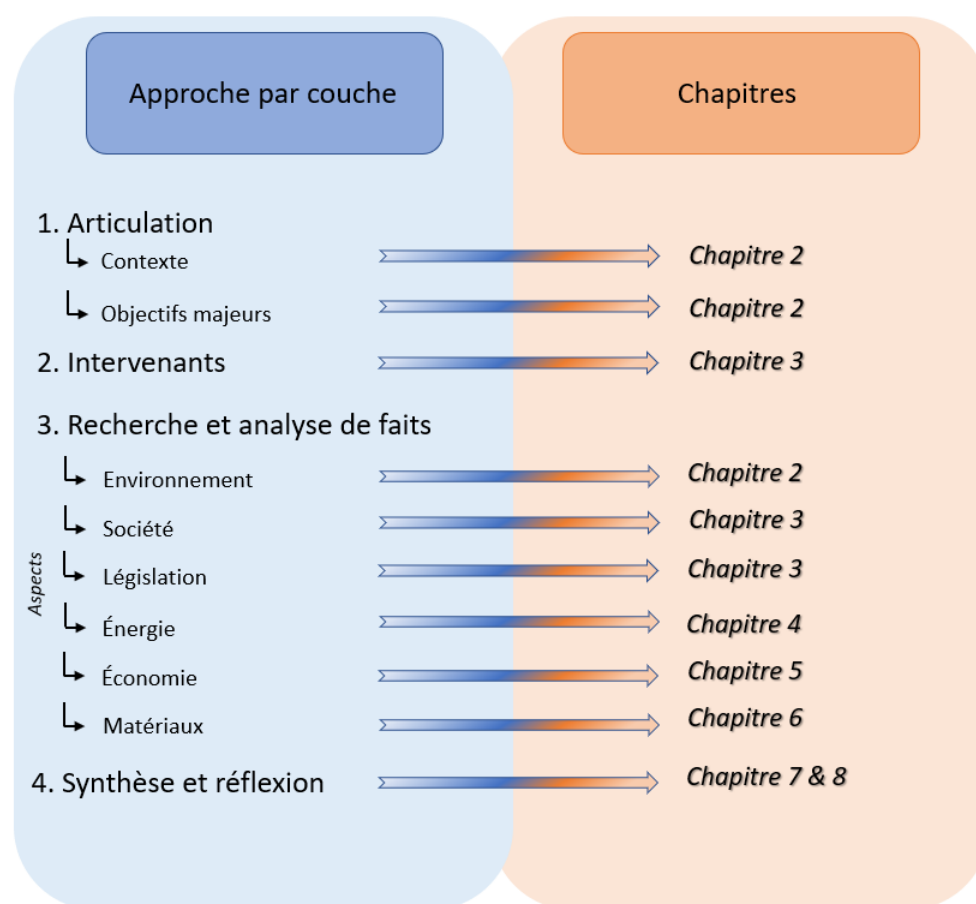


FIGURE 1.1 – Plan de travail basé sur l'approche par couche de MICHAËL F. ASHBY.

Chapitre 2

Contexte et problématique

2.1 Situation

En 2018, selon l'IATA (*International Air Transport Association*), 4,4 milliards de passagers ont pris l'avion, et ce nombre devrait approximativement doubler d'ici 2037 [5], signifiant qu'il y aura environ 280 personnes embarquant dans un avion, chaque seconde. À titre de comparaison, il y aura 2 milliards de voitures dans le monde d'ici 2040 [7]. Cette croissance de la demande en transport aérien, estimée à presque 5% par an, impliquera inéluctablement une augmentation conséquente des émissions de polluants, aggravant l'impact du secteur sur l'environnement.

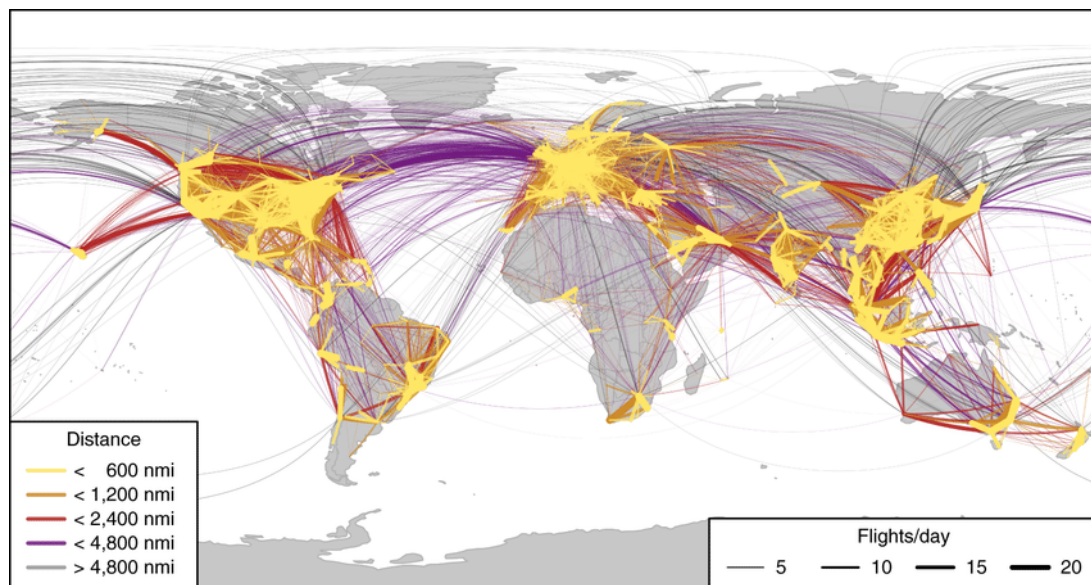


FIGURE 2.1 – Réseau mondial de vols en 2015 par distance (1 nmi = 1.852 km) [8].

Comme illustré sur la FIGURE 2.1, le nombre d'avions volant simultanément au-dessus de nos têtes est gigantesque. Il y a en moyenne 34 000 vols par jour en Europe [9]. On estime qu'il y a, dans le monde, 86 décollages toutes les minutes [10] et parmi ceux-ci, environ 80% de tous les vols mondiaux sont inférieurs à 1700 kilomètres et 90 % inférieurs à 2600 kilomètres [11].

2.2 Impact climatique du transport aérien

Il est de plus en plus largement reconnu que les impacts les plus graves du transport aérien sur la durabilité sont dus à la pollution atmosphérique, tant à l'échelle mondiale que locale [12]. En effet, l'aviation est une des sources d'émission de GES présentant la plus grande croissance, celle-ci ayant doublée par rapport à 1990 [2] et serait responsable à hauteur de 5% du réchauffement climatique causé par l'homme [2].

Cette part non négligeable du secteur aérien au réchauffement climatique est principalement liée aux émissions de CO_2 , résultant du phénomène de combustion prenant place dans les réacteurs thermiques des avions. Cependant, une partie significative du réchauffement climatique attribué à l'aviation est causé par d'autres sources de pollution (FIGURE 2.2), comme les oxydes d'azote (NO_x), dûs à la combustion à très haute température (de l'ordre de $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ¹), la suie, le dioxyde de soufre, le monoxyde de carbone ou encore les traînées de condensation, formées par la condensation de la vapeur d'eau rejetée en haute atmosphère. Celles-ci peuvent former des cirrus (nuages filamenteux) artificiels, faisant plus que doubler l'impact de l'aviation sur le réchauffement climatique, en ayant le même impact radiatif que les émissions de dioxyde de carbone liées à l'aviation [13]. Les monoxydes et dioxydes d'azote, en se couplant avec certains hydrocarbures, provoquent la formation d'ozone (O_3), qui est également un GES [9].

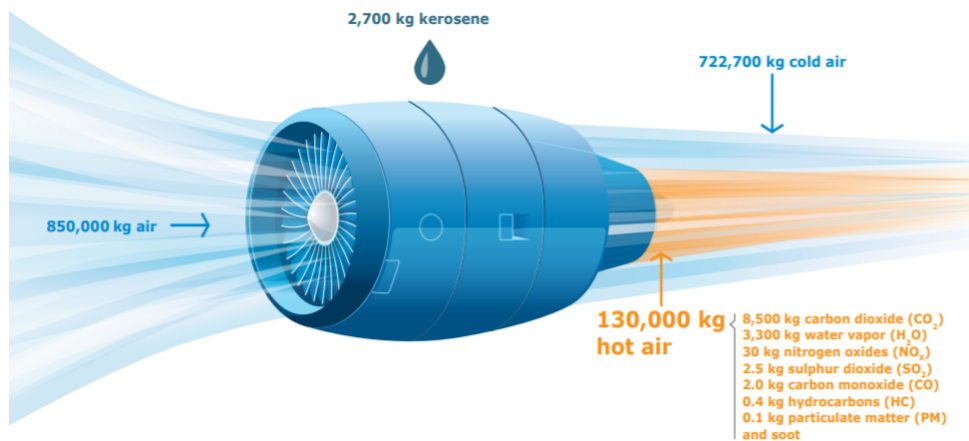


FIGURE 2.2 – Émissions types d'un réacteur d'avion [14].

Selon l'ADME (*L'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie*), la production et la combustion d'un litre de JET A1 (kérosène typiquement employé) implique la production de 3 kilogrammes de dioxyde de carbone. Chaque jour, presque 200 millions de litres de kérosène sont consommés dans le monde [3] !

En comparaison avec d'autres moyens de transport, l'aviation commerciale est celui qui présente l'empreinte carbone la plus élevée [15]. En effet, comme représenté sur la Figure 2.4, l'avion conventionnel émet en moyenne 285 grammes de CO_2 par passager et par kilomètre. En 2050, selon le GIEC (*Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*), le transport aérien pourrait même émettre environ 5 milliards de tonnes de CO_2 par an [16]. Cette croissance au niveau des émissions de polluants doit être inversée et réduite à zéro pour respecter les objectifs de l'Accord de Paris. Pourtant, l'aviation commerciale n'était pas incluse dans les objectifs juridiquement contraignants du protocole de Kyoto (accord international visant à réduire les émissions de GES) [17].

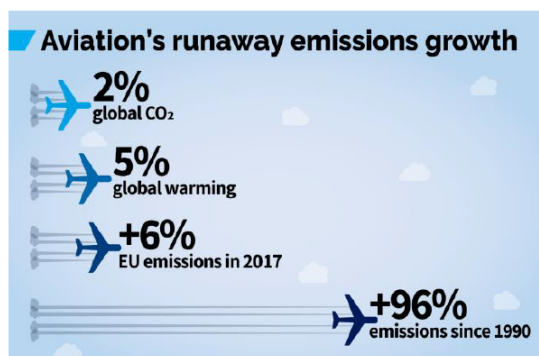


FIGURE 2.3 – Croissance des émissions et du réchauffement lié à l'aviation [2].

Le forçage radiatif est l'équilibre entre le rayonnement solaire entrant et les émissions de rayonnements infrarouges sortant de l'atmosphère (GIEC), exprimé en $[W/m^2]$. Ce bilan sera davantage positif si la présence de GES est plus grande, la Terre aura donc tendance à se réchauffer. En 2005, l'aviation commerciale correspondait à environ 5% du forçage radiatif lié aux activités humaines, se situant à une valeur comprise entre 38 et 139 $[mW/m^2]$ [19, 20].

Étant donné qu'il est devenu inconcevable de relier des longues distances internationales telles que Bruxelles-Tokyo (9500km) en voiture ou en train, c'est bien le transport aérien sur courtes distances qui présente la pollution relative la plus conséquente. En effet, les avions long-courriers accueillent généralement un nombre de passagers plus important (souvent bien supérieur à 200) permettant ainsi de réduire l'empreinte écologique par passager par kilomètre. A contrario, les vols court-courriers sont généralement réalisés par des avions plus petits (nombre de passagers généralement inférieur à 200), et donc l'empreinte carbone par passager sera plus élevée. Il est important de noter qu'il faut prendre également en considération l'empreinte liée à la production et le déploiement du carburant, au déplacement des passagers vers et en partance des aéroports respectivement de départ et d'arrivée, ainsi que l'empreinte propre des aéroports.

Face aux pressions environnementales grandissantes, l'OACI (*Organisation de l'aviation civile internationale*) a mis en place en 2016 un programme international visant à compenser les émissions de CO_2 , appelé CORSIA (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*). Il s'agit d'un accord des Nations Unies conçu pour aider l'industrie aéronautique à rendre toute croissance des vols internationaux après 2020 "neutre en carbone". C'est un premier pas vers une prise en charge de la décarbonation du transport aérien, et c'est à ce jour le seul dispositif mondial. Depuis janvier 2019, tous les transporteurs sont tenus de déclarer leurs émissions de CO_2 sur une base annuelle [21]. L'élément principal du CORSIA réside dans le fait que les compagnies aériennes devront compenser (et non réduire) les émissions supérieures au niveau d'émissions de référence [22]. Cette compensation permettrait de générer jusqu'à 35 milliards d'euros pour financer des projets écologiques [23]. Cependant, CORSIA est controversé, notamment à cause d'un manque de transparence ou d'efficacité prouvée sur le long terme [24].

Afin de polluer moins mais surtout de consommer moins, des progrès technologiques et opérationnels extraordinaires ont déjà été réalisés dans le secteur de l'aviation. Nous pouvons notamment citer l'apparition de *winglets* (profil d'aillette sensiblement vertical situé aux extrémités des ailes), l'optimisation des routes aériennes et des procédures de décollages et d'atterrissages, l'optimisation du taux de remplissage des avions, l'amélioration des propriétés chimiques des carburants, les nouvelles générations de réacteurs, ou encore l'amélioration des systèmes et des procédures de navigation, ce qui réduit les déplacements inutiles pour permettre d'économiser du carburant et de diminuer les émissions de CO_2 . L'augmentation de 96 % des émissions de CO_2 entre 1990 et 2018 de la FIGURE 2.3 sont dues au fait que, malgré les améliorations moyennes du rendement énergétique des avions de l'ordre de 1 à 2 % par an, cela ne suffit pas à compenser la croissance du trafic d'environ 5 % par an [17]. Cela signifie que les émissions de CO_2 pourraient être multipliées par 2,4 à 3,6 d'ici 2050 [24], en fonction des diverses améliorations. En effet, même si une réduction de 30% en consommation de carburant pourrait être

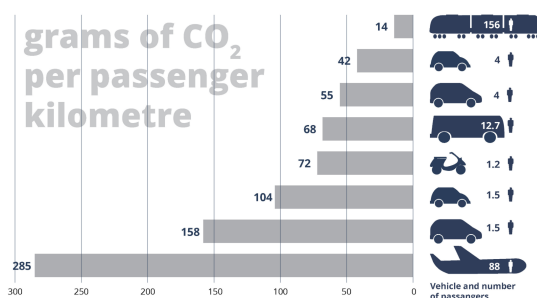


FIGURE 2.4 – Émission moyenne de dioxyde de carbone des différents modes de transport, exprimé en grammes par passager et par kilomètre [18].

atteinte uniquement à l'aide de la technologie de pointe pour réacteurs, cela ne serait pas suffisant pour soutenir une transition vers une aviation sans carbone [25]. De plus, de nouveaux développements, tels que les avions supersoniques ou le transport aérien de mobilité urbaine, vont accroître davantage les émissions.

Le secteur aérien s'intensifie à une vitesse telle que les améliorations techniques ou opérationnelles ne suivent plus le rythme. L'impact climatique de l'aviation est donc grandissant, et il est nécessaire de trouver des solutions pour un avenir plus durable pour l'aviation. Airbus, par exemple, s'est engagé à atteindre les objectifs internationaux de l'ATAG (*Air Transport Action Group*) de l'industrie aéronautique visant à réduire la consommation en carburant de 1,5 % par an en moyenne de 2009 à 2020, à stabiliser les émissions à partir de 2020 grâce à une croissance neutre en carbone et à réduire les émissions nettes de l'aviation de 50 % avant 2050. Ces objectifs ne pouvant pas être atteints avec les technologies actuelles, Airbus investit et concentre ses efforts de recherche sur le développement des technologies de propulsion électrique et hybride électrique [26].

Il est essentiel de se pencher sérieusement sur la décarbonation du transport aérien pour lui assurer un avenir durable car, outre la problématique environnementale, l'aviation est un facteur important pour l'économie mondiale en générant environ 65 millions d'emplois et plus de 2,2 billions de dollars du PIB mondial [27, 28], malgré le fait que la répartition des bénéfices économiques du transport aérien est très inégale et que la plupart de ceux-ci reviennent aux pays et aux régions qui disposent déjà de systèmes de transport aérien bien développés [29].

2.3 Éléments composant l'articulation

L'articulation consiste donc à étudier la faisabilité quant à la réduction des émissions liées au secteur de l'aviation commerciale par le biais de l'électrification des avions, principalement au niveau du système de propulsion, afin de la rendre plus durable.

Pour ce faire, différents éléments peuvent être envisagés dont les plus pertinents sont repris ci-après :

1. Réduction des émissions : aviation électrique (ou hybride).
2. Réduction du poids des avions : nouveaux matériaux constitutifs plus légers (tout en conservant la tenue mécanique requise).
3. Augmentation de l'efficacité et amélioration du rendement énergétique des réacteurs et des carburants.
4. Perfectionnement de l'aérodynamisme du fuselage et des ailes.

Dans le cadre de ce travail, les deux premiers points vont être approfondis et étudiés quant à leur faisabilité. La notion de coûts que ces changements pourraient induire va ensuite être calculée et comparée avec la situation conventionnelle (avions à réacteurs thermiques alimentés au kérosène). Cette étude s'inscrit dans un contexte de durabilité, en suivant rigoureusement la méthode proposée par le Professeur MICHAEL F. ASHBY. En effet, la durabilité est un concept qui devient de plus en plus accepté et pris en considération par le monde des affaires, sa présence devient omniprésente et intégrée dans la pensée et la pratique des entreprises, jusqu'à atteindre les universités avec, par exemple, le plan récent d'engagement d'une "*transition vers une université durable*" de l'UCLouvain [30].

Chapitre 3

Méthodologie d'analyse de durabilité

MICHAËL F. ASHBY propose d'aborder et d'étudier le développement durable d'un produit en le décomposant en une approche "par couche" [6], présentant cinq étapes successives à réaliser, reprises ci-dessous :

1. **Définition du problème** : Définir et expliquer l'objectif premier de l'articulation, qui présente des étendues temporelles et physiques claires et réalistes. La viabilité d'un produit en développement ne peut pas se conclure sans spécifier ces notions de quantité et de durée.
2. **Identifier les acteurs de l'articulation et leurs préoccupations** : il s'agit de toute personne ou entité qui sera affectée de près ou de loin par l'articulation.
3. **Recherche de faits** : Précision de l'articulation, établissement et analyse de l'environnement requis et interagissant avec l'articulation : l'énergie, les matériaux, l'environnement, l'économie, la société et la législation.
4. **Synthèse** : Cette étape consiste à résumer l'étape 3 en formulant un jugement le plus équilibré et objectif possible concernant les implications sur les 3 piliers du développement durable, à savoir sur l'environnement, la prospérité économique et sur le capital social.
5. **Réflexion** : L'objectif de l'articulation est-il atteint ? Sur quelle échelle temporelle et physique ? Les impacts négatifs sont-ils contrebalancés par les atouts sur les piliers de la durabilité ? Existe-t-il des conclusions et des pistes d'améliorations à en tirer ?

3.1 Définition du problème

L'objectif principal et l'étendue ont été définis dans la déclaration du projet et de son contexte, au CHAPITRE 2. L'objectif principal est la décarbonation de l'aviation commerciale, afin de réduire majoritairement les émissions de carbone. L'échelle est grande (elle doit l'être pour faire une différence significative dans les émissions de carbone) et l'étude se concentre principalement sur les avions court à moyen courriers (avions à couloir unique), qui représentent un marché d'environ 75 % de la production aéronautique mondiale existante, ce qui équivaut à 30 000 appareils à construire dans les 20 années à venir [31].

3.2 Acteurs de l'articulation

Les intervenants dans l'articulation sont nombreux et variés, ayant chacun des préoccupations propres et diverses. L'objectif de cette section est de les détailler, afin de pouvoir établir les conséquences que l'aviation de demain, plus électrique, pourrait engendrer.

- ❖ *Les passagers* : les utilisateurs recherchent un vol confortable et silencieux tout en se sentant en sécurité. La motorisation électrique, en plus de diminuer les émissions de polluants, réduira considérablement les nuisances sonores liées aux réacteurs. Les conditions et le temps de vol ne doivent pas être dégradés (par exemple, si l'avion électrique doit voler à des altitudes de croisière plus basses, il devrait subir de manière plus conséquente les effets météorologiques). De plus, le sentiment de culpabilité des passagers ("*Flight Shame*" [32]) devrait sensiblement diminuer, surtout en ce qui concerne les trajets de courte distance.
- ❖ *Les compagnies pétrolières* : elles souhaitent conserver leur part du marché, le kérosène représentant tout de même 9% [33] du raffinage du pétrole brut. La consommation mondiale de kérosène s'estime actuellement à 190 millions de litres par jour [34] ! Pour ce faire, le lobby pétrolier fera pression sur le dispositif décisionnel européen.
- ❖ *Les compagnies aériennes* : elles présentent des préoccupations quant au coût, à la fiabilité, à la durée de vie, à l'autonomie et au remplacement du stockage d'énergie et du système électrique permettant la propulsion. De même, il faudra former et embaucher une équipe différente concernant les opérations de maintenance et de réparations, même si les avions électriques augmenteront la rentabilité, car un moteur électrique nécessite moins d'entretien qu'un moteur à turbine à gaz classique [35], réduisant de ce fait le temps et les coûts liés aux opérations de maintenance.
- ❖ *Les pilotes* : l'avion électrique implique un renouveau dans le design et dans la façon de voler. Cela va donc engendrer des nouvelles formations. L'électrification de l'aviation risque d'être couplée à l'automatisation. Le plaisir de voler risque d'être altéré.
- ❖ *Les aéroports* : les aéroports sont des grands acteurs de la pollution locale. En effet, l'aéroport de Bruxelles-national est la première source de pollution respiratoire sur Bruxelles [36]. De plus, de nouveaux équipements et dispositifs seront requis, tels que de nouveaux systèmes de gestion des batteries, de recharges, nouvelles portes d'embarcation en fonction du design des avions, etc.
- ❖ *Les riverains d'aéroports* : ces habitants recherchent le calme et sont donc favorables aux avions électriques, plus silencieux. De plus, les émissions de gaz d'échappement des avions contribuent à la dégradation de la qualité de l'air urbain à proximité des aéroports [37].
- ❖ *Les écologistes* : les partis, militants et associations écologiques sont en faveur et veulent prôner une aviation décarbonisée et donc plus électrique, qui réduira les émissions de carbone, dont ils sont inquiets des effets sur l'environnement. Les partis, ONG (organisation non gouvernementale) et lobbyistes pourront faire pression sur Bruxelles.
- ❖ *Les pays producteurs de ressources nationales* : ils sont susceptibles de protéger les constructeurs aériens et les fabricants de batteries nationaux plutôt que d'approvisionner les concurrents en matières premières. En le faisant, cela pourrait également engendrer des tensions géopolitiques et des pénuries d'approvisionnement.
- ❖ *Le monde politique* : les gouvernements nationaux auront tendance à encourager la décarbonation du transport aérien via le développement de l'aviation électrique, afin de respecter les objectifs de réduction des émissions de carbone.

- ❖ **Fabricants de réacteurs** : en passant à l'énergie électrique, les fabricants de turbosoufflantes thermiques désirent éviter toute perte de part du marché. De plus, ils cherchent à établir des chaînes d'approvisionnement sûres pour les matières premières des réacteurs, qui comprennent des éléments rares et critiques (matériaux à risques ayant une grande importance commerciale ou stratégique). En effet, l'évolution des réacteurs a permis d'innombrables progrès en terme d'augmentation de l'efficacité et du rendement énergétique tout en réduisant la consommation en carburant, les nuisances sonores et l'émission de polluants. Cependant, ces progrès ont des conséquences, dont la complexité et l'étendue de la composition des constituants des engins.

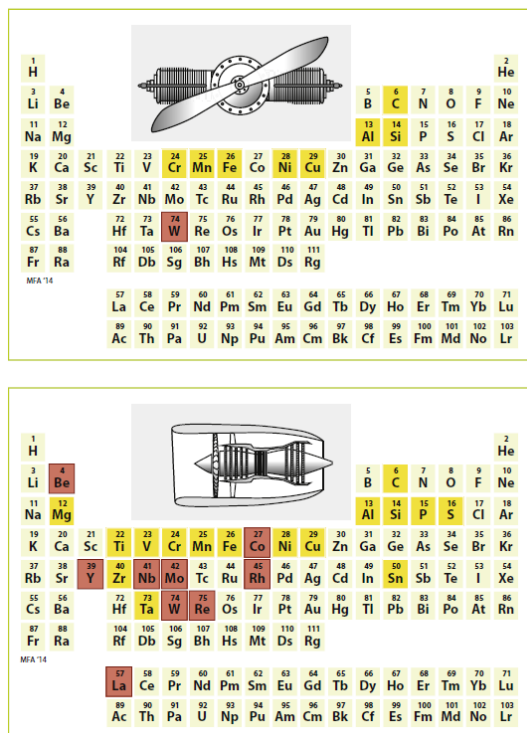


FIGURE 3.1 – Éléments chimiques constitutifs des moteurs à piston comparés aux réacteurs types turbosoufflantes modernes. Les matériaux critiques utilisés sont colorés en rouges, les autres matériaux utilisés en jaune [38].

On peut aisément constater que l'amélioration des technologies implique l'exploitation d'un panel d'éléments chimiques, parfois dits *critiques*, de plus en plus conséquent. Les matières premières critiques sont définies comme celles présentant "un risque particulièrement élevé de pénurie d'approvisionnement dans les dix prochaines années, et qui jouent un rôle particulièrement important dans la chaîne de valeur" [39]. Les matériaux critiques sont donc à éviter autant que possible pour des raisons environnementales, géopolitiques et pour des principes de durabilité. Il faut dès lors se poser les bonnes questions quant à la fabrication des réacteurs électriques et leur composition, ainsi que l'empreinte carbonée liée à la production et donc l'extraction de ces matières premières. De plus, un ensemble croissant de lois, de règlements et de normes traite de l'impact des produits et des matériaux qu'ils contiennent sur l'environnement, la santé humaine et la société. Ils touchent l'ensemble du cycle de vie des produits, des substances utilisées de la fabrication à l'élimination en fin de vie. Cette législation, en plus de créer des charges supplémentaires (mise en conformité, respect de normes, etc.) crée également des risques en rendant des matériaux clés obsolètes ou impossibles à obtenir. Pour les produits à longue durée de vie comme les avions, le risque que les matériaux qu'ils contiennent soient soumis à de nouvelles restrictions existe, ce qui nécessiterait le cas échéant de trouver des substituts et de passer, à nouveau, par tout un procédé de certification [40].

- ❖ **Producteurs de batteries** : ils partagent les préoccupations des fabricants de réacteurs, concernant cette fois la production de batteries.
- ❖ **Gestionnaire du réseau** : ils devront gérer la demande accrue pour recharger les batteries aux aéroports, ainsi que garantir un réseau fiable et efficace.
- ❖ **Le secteur public** : le secteur de l'aviation est exonéré de la TVA en vertu de la directive relative au système commun de taxe sur la valeur ajoutée (directive 2006/112/CE) et de la directive restructurant le cadre communautaire de taxation des produits énergétiques et de l'électricité [22]. Les taxes sur le carburant, actuellement en négociation, ne seront plus nécessaires. La taxation (sur le kérosène ou l'électricité consommée) pourrait davantage diminuer la tendance à la surconsommation.

3.3 Recherche de faits

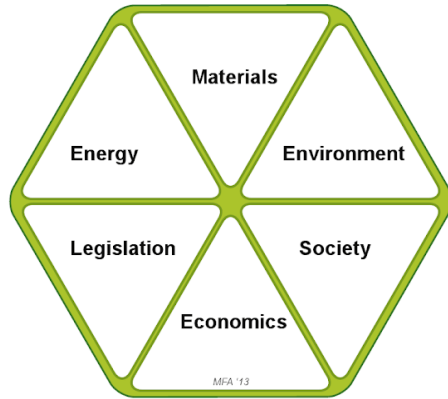


FIGURE 3.2 – Thématiques constituant la recherche de faits [6].

La partie recherche (et analyse) de faits doit s'appuyer sur les six éléments repris à la figure 3.2. Il s'agit de la partie la plus considérable et technique d'une étude de durabilité d'une articulation, et se décomposera d'ailleurs à travers tout ce travail. En effet, l'aspect "**Environnement**" a déjà été amplement abordé dans la mise en contexte de ce travail. L'enjeu a été clairement identifié et exposé, il est évident que c'est l'aspect durable le plus critique quant à l'aviation commerciale d'aujourd'hui. Les parties "**Énergie**", "**Économie**" et "**Matériaux**" seront étudiés plus en profondeur dans la suite de ce travail, respectivement concernant l'électrification de l'avion (CHAPITRE 4), l'étude comparative de coûts (CHAPITRE 5) et l'étude des matériaux (CHAPITRE 6). Dès lors, les aspects "**Législation**" et "**Société**" vont être abordés dans cette section, nécessitant moins de développements dans le cadre de l'articulation étudiée.

Société L'apparition progressive d'une aviation décarbonisée impliquera surtout et en premier lieu l'émergence du transport aérien personnel, à travers le phénomène "d'avion-taxi" (mobilité urbaine), qui est significativement en plein essor à travers de nombreux développements, comme nous le verrons plus loin. Dans cette optique, les déplacements sur courte distance et, plus largement, la mobilité de proximité des personnes et des biens sera facilitée, accélérée et amplifiée, permettant par exemple d'éviter la congestion de trafic en allant de surcroît à destination en itinéraire direct permettant ainsi un gain de temps et de confort. Cependant, la société devra accepter de voir des véhicules volants dans les villes, avec le risque que cela représente au niveau des accidents (problèmes techniques, erreurs de pilotage, attentats, piratages, etc.).

Concernant plus précisément l'aviation commerciale (lignes aériennes régulières), peu de changements sociétaux sont à envisager. Il faudra néanmoins une acceptation des nouvelles technologies de la part des voyageurs.

La santé générale de la société (et particulièrement des personnes vivant à proximité d'aéroports) sera améliorée. En effet, il est estimé qu'en moyenne, la surmortalité mondiale attribuée à la pollution de l'air, à laquelle l'aviation participe indéniablement, est de 120 décès par an pour 100.000 habitants [41]. De plus, à titre d'exemple, les niveaux de particules fines sont aussi élevés dans les zones suburbaines autour de l'aéroport de Bruxelles-National que dans le centre ville, selon une recherche menée par l'Institut flamand pour la recherche technologique (VITO) [42].

En plus de cela, la pollution sonore, provoquée par le bruit des réacteurs thermiques, est également préoccupante pour la société. Le bruit est mesuré en décibels. Les experts estiment que des niveaux de bruits continus supérieurs à 90 décibels peuvent entraîner une perte d'audition et des changements irréversibles dans le système nerveux. L'organisation mondiale de la santé (OMS) a fixé à 45 décibels le niveau de bruit sécuritaire. Dans un questionnaire distribué en 2007 à deux groupes, l'un vivant près d'un grand aéroport et l'autre dans un quartier calme, deux tiers des personnes vivant près de l'aéroport ont indiqué qu'elles étaient gênées par le bruit des avions, et la plupart a déclaré que cela perturbait leurs activités quotidiennes [43]. Ces deux tiers se plaignent davantage que l'autre groupe de troubles du sommeil, et se perçoivent également comme étant en moins bonne santé. De plus, la Commission européenne considère que le fait de vivre à proximité d'un aéroport est un facteur de risque de maladie coronarienne et d'accident vasculaire cérébral, à cause de l'augmentation de la pression sanguine due à la pollution sonore [43]. L'Union Européenne (UE) estime qu'environ 22 millions de personnes sont exposées aux niveaux de bruit des avions supérieurs à 55 décibels [44].

Législation Les réglementations et contrôles sur la sécurité dans le secteur de l'aviation sont strictes, et ont été établis par des agences comme l'EASA (*European Union Aviation Safety Agency*) pour l'Europe ou la FAA (*Federal Aviation Administration*) pour les États-Unis. Une aviation électrique ou hybride comporte des changements structuraux radicaux dans la conception des avions et dans les aménagements nécessaires aux aéroports. Dès lors, les processus de certification de nouveaux concepts tels qu'une motorisation électrique alimentée par des batteries comporte tout un éventail de nouveaux risques potentiels, qu'il faut donc réglementer et contrôler. Ce secteur étant en plein essor, les règlements sont en train d'être établis petit à petit. Une certification se réalise donc au détriment d'un coût élevé, décourageant de nombreuses start-ups de se lancer dans le projet d'une nouvelle propulsion pour avion [45].

La législation environnementale en aviation est radicalement moins réglementée. Il n'y a, actuellement, pas de taxes associées au kérosène. Pourtant, un rapport de TRANSPORT & ENVIRONNEMENT a montré qu'une introduction de mesures fiscales qui, combinées, représentent un prix du carbone équivalent à 150 euros la tonne pourrait modérer la demande de carburant [2]. Les mesures basées sur le marché, telles que les systèmes d'échange de quotas d'émission (ETS), sont utiles et sont en mesure de réduire les émissions de l'aviation de manière significative [46]. Les deux principales mesures basées sur le marché pour l'aviation sont les ETS et le système de compensation et de réduction des émissions de carbone pour l'aviation internationale (CORSIA). En 2012, les ETS ont été modifiés pour s'appliquer également aux émissions de l'aviation. Tous les vols au départ, à destination et à l'intérieur de l'espace économique européen sont inclus et le système est valable pour les compagnies aériennes basées dans l'UE et hors UE. Initialement, les vols non domestiques au départ ou à l'atterrissage dans l'EEA (*zone économique européenne*) étaient également couverts par les ETS, mais de 2012 à 2023, les exigences ont été modifiées afin de faciliter les efforts de l'OACI pour établir CORSIA [47]. Dans l'ensemble, l'intégration de l'aviation dans les ETS n'a pas eu l'impact escompté du système sur les émissions de l'aviation en raison d'une offre excédentaire de quotas et donc d'un prix du carbone trop bas.

Les acteurs du secteur de l'aviation doivent se conformer aux objectifs ambitieux des autorités locales en matière de climat, d'émissions de GES et de pollution sonore. Par exemple, l'UE a mis en œuvre la directive sur le bruit ambiant et le règlement sur l'approche équilibrée en tant que législation afin de surveiller la pollution sonore de l'environnement et sur la base desquels des actions peuvent être menées [48]. En ce qui concerne la qualité de l'air, le Comité de la protection de l'environnement en aviation (CAEP) de l'OACI est chargé de veiller au respect des normes d'émission des moteurs d'avion, qui ont été établies pour la première fois en 1981. La législation de l'UE a été élaborée sur la base de ces normes [48]. En outre, la stratégie européenne en matière d'aviation souligne la nécessité de contribuer aux activités de recherche et de développement de technologies innovantes et respectueuses de l'environnement afin de réduire les incidences de l'aviation sur l'environnement [47].

3.4 Synthèse et réflexion

La synthèse de ce travail se base sur les éléments de la recherche de faits, et est donc reprise au CHAPITRE 7. La réflexion qui s'en suit sera menée au CHAPITRE 8, en incluant une conclusion ainsi que des pistes de réflexion.

Chapitre 4

Électrification de l'aviation

4.1 Contexte

Comme il a été expliqué au CHAPITRE 2, le changement climatique, notamment dû à l'aviation commerciale comme on la connaît aujourd'hui, présente un risque pour les humains et l'écosystème en augmentant le niveau des mers, le risque de conditions météorologiques extrêmes, l'apparition de nouvelles maladies tout en réduisant la productivité agricole et provoquant une perte de biodiversité [49]. SRIA (*Agenda stratégique pour la recherche et l'innovation*) recommande que 68 % de la réduction en émission de dioxyde de carbone résulte d'améliorations technologiques majeures au niveau du système de propulsion aérien et du fuselage [50].

Aujourd'hui, typiquement deux types de réacteurs pour avions commerciaux sont utilisés (turbosoufflante et turbopropulseur). Les exigences d'un système de propulsion sont complexes : une large gamme de vitesse de fonctionnement, des températures variables, une grande tolérance aux vibrations mais il faut aussi assurer la sécurité, la fiabilité et un faible coût d'exploitation [51]. Il est donc difficile de trouver une alternative appropriée. L'IATA prévoit qu'un passage à une aviation sans combustible fossile serait irréaliste avant 2035, car les futurs avions commerciaux avec propulsion conventionnelle sont encore en phase de conception [52]. Néanmoins, les perturbations radicales et l'instabilité de l'approvisionnement en kérosène dans les années à venir [53] devrait pousser le secteur à se préparer à des alternatives non dépendantes du pétrole.

Des avions ne consommant pas de kérosène présentent un potentiel considérable pour réduire significativement les impacts du secteur de l'aviation sur le réchauffement climatique. *"Les avantages de l'avion électrique par rapport à l'avion thermique traditionnel sont nombreux : moins de bruit et de pollution (notamment autour des aéroports), le rendement de la propulsion électrique est bien plus élevé et fournit un couple plus puissant au décollage (réduisant ainsi la longueur de pistes nécessaires), [...] le moteur électrique est beaucoup plus petit, avec moins de composants et nécessite donc moins de coût et de temps de maintenance. Les coûts d'opération sont aussi plus faibles, on estime le coût à l'heure du vol à 7 € [pour un petit avion électrique biplace], contre 50 € pour son équivalent à propulsion thermique, l'intérêt pour les pilotes est donc énorme"* [54].

L'avion électrique possède le potentiel d'une conversion énergétique à meilleur rendement et les moteurs électriques, plus légers et de plus petite taille, permettent de réaliser une propulsion électrique distribuée (PED), en les utilisant en plus grand nombre. Les avantages d'une PED sont nombreux : une propulsion plus légère, plus silencieuse et plus sûre en cas de panne grâce la redondance de moteurs et une augmentation potentielle du rendement de propulsion [55].

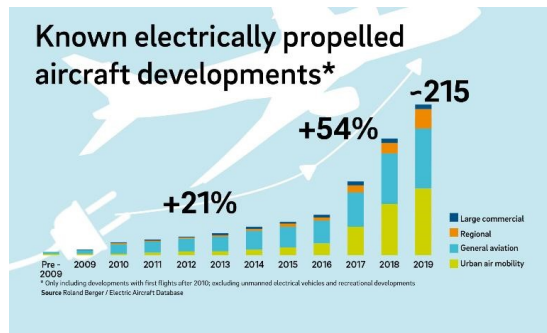


FIGURE 4.1 – Développement d'avions à propulsion électrique [56].

L'émergence de l'aviation électrique dans l'industrie aéronautique n'a débuté que récemment, à l'image du nombre de projets de recherche et développement concernant l'aviation électrique, comme en témoigne la FIGURE 4.1. Actuellement, environ 270 projets d'avions électriques sont en cours de recherche, soit une augmentation de 50% depuis Avril 2018 [57], dont une grande portion est destinée à la mobilité urbaine (avions personnels, type taxi). Cependant, beaucoup d'industriels se penchent également sur le développement de propulsions électriques pour réduire les émissions, comme *Airbus* ou *Safran Aero Boosters* mais la majorité de ces projets demeurent confidentiels, comme l'ont démontré des tentatives d'interviews, sans succès, lors de la réalisation de ce travail.

En outre, plusieurs activités sont lancées pour soutenir le passage à l'aviation électrique. Par exemple, les aéroports de Londres Heathrow et de Stuttgart [58] accorderont une année de droits d'atterrissage gratuits à la première compagnie qui y exploitera un avion commercial électrique, pour un prix d'environ un million d'euros. En outre, la Norvège soutient les infrastructures aéroportuaires qui rendent l'utilisation des vols électriques attrayante [59]. De plus, des compagnies de renom comme *British Airways*, *Finnair* ou encore *Delta* visent la neutralité carbone respectivement d'ici 2050, 2045 et 2030, notamment via des investissements dans des recherches sur des systèmes de propulsion alternatifs moins polluants [60, 61, 62].

Dans le cadre de ce chapitre, les différentes propulsions électriques alternatives pertinentes étudiées dans la littérature seront exposées et ensuite analysées. Il s'agit des propulsions turboélectriques, hybrides électriques et "totalement électriques" (sur batteries uniquement) [63]. La faisabilité (en particulier pour l'avion totalement électrique) sera également étudiée, notamment à travers une étude de performance, ainsi que la durabilité via un bilan écologique.

4.1.1 Applications à l'aviation générale et commerciale

4.1.1.1 Mobilité aérienne urbaine

L'électrification de l'aviation a permis à de nouveaux concepts d'émerger, dont celui d'e-VTOL (décollage et atterrissage vertical électrique) à travers la notion de mobilité aérienne urbaine. Les marchés dans ce secteur comprennent les navettes d'aéroport, les taxis aériens, les drones et les ambulances aériennes. Ce nouveau secteur est le mieux adapté à la propulsion électrique en raison de son rayon d'action plus court et de son facteur d'utilisation élevé [64]. La firme Uber affirme qu'il existe un marché important pour la mobilité aérienne urbaine de point à point et prévoit même de commencer ses opérations dès 2023 [65], ce qui catalyse l'activité dans ce nouveau secteur. Bien que ce soit en dehors du cadre de ce travail (aviation urbaine non régulière), ce marché suscite un tel essor qu'il semble intéressant de l'introduire.



FIGURE 4.2 – Vahana de Airbus [66].

Comme le témoigne Airbus et son Vahana, représenté à la FIGURE 4.2, ce concept se rapproche le plus d'une "voiture volante", permettant d'aller d'un point A à un point B en vol d'oiseau, pouvant de plus éviter toute congestion de trafic et voyager à une vitesse avoisinant les 200 [km/h]. Celui-ci est alimenté uniquement par batteries de 38 [kWh] et possède 8 moteurs électriques de 45 [kW] ainsi qu'un RA de 50 [km] [66].

Lilium, une start-up allemande construisant son propre e-VTOL, a comparé le trajet de l'aéroport de New-York

JFK jusqu'au centre de Manhattan, en taxi et avec son Lilium Jet; 55 minutes en taxi contre 5 avec leur e-VTOL, avec un prix de trajet jusqu'à 10 fois moins cher sur le long terme [67]. Cependant, ce genre d'opérations nécessite le survol d'habitations et de zones résidentielles à très basse altitude et cela implique que la certification devrait prendre quelques années. Ce marché n'est donc pas attendu avant 2025-2030 [45].

4.1.1.2 Projets actuels et futurs

Certains projets pertinents vont être brièvement abordés dans cette section afin d'apporter du concret à la thématique de ce travail et d'introduire les systèmes de propulsion, détaillés par la suite. D'autres projets sont repris sur la plate-forme d'innovation pour les avions électriques et hybrides de l'ICAO [68].



FIGURE 4.3 – Illustration de l'E-Fan X [69].

L'airbus E-Fan X est un projet d'avion hybride, lancé par Airbus, Rolls-Royce et Siemens pour "convaincre le centre aérospatial dans son ensemble que les vols électriques et hybrides électriques sont un avenir viable et inévitable pour l'industrie" [70].

Il s'agira du premier projet d'avion hybride volant avec un réacteur électrique d'une puissance de 2 [MW] alimenté par batteries dès 2021 (les 3 autres sont conventionnels) [69]. Il servira aussi comme base pour établir de nouvelles certifications.

Alice de Eviation est un avion totalement électrique (ATE) de 9 passagers dont la première livraison à une compagnie aérienne est prévue pour 2022. "Alice établira clairement les arguments commerciaux en faveur de l'utilisation d'avions à moteur électrique pour les vols commerciaux" [71]. Alice aurait un coût horaire d'opération de seulement 200 [USD/h], moins de 20% du prix d'un avion à turbopropulseurs de gamme équivalente [72]. Cet ATE aurait une autonomie allant jusqu'à 1046 [km] [73].



FIGURE 4.4 – Alice au Salon du Bourget 2019 [74].



FIGURE 4.5 – Illustration de concept du Wright 1 [75].

Wright Electric, partenaire de la compagnie aérienne low cost easyJet, a lancé un programme de développement de moteur pour un avion électrique de 186 sièges [76]. Wright 1, également un ATE, disposera d'une propulsion distribuée de moteurs de 1,5 MW et d'un pack de batteries interchangeable. Il devrait avoir une autonomie de vol jusqu'à 2 heures. EasyJet estime que cet ATE pourra parcourir environ 500 km, ce qui signifie qu'ils pourraient utiliser l'avion sur la route Londres-Amsterdam, la deuxième plus fréquentée d'Europe [77]. Wright a l'intention de procéder à des essais au sol de son moteur en 2021 et à des essais en vol en 2023. La société prévoit l'entrée en service de son ATE Wright 1 en 2030 [78].



FIGURE 4.6 – H55 Bristell Energic [79].

Fabriqué par BRM Aero et propulsé par le système de propulsion électrique de H55, le Bristell Energic est un avion entièrement électrique avec deux sièges pour la formation des pilotes et le vol de loisir. Cet ATE, mis en service par le pionnier de l'énergie solaire André Borschberg, a effectué son premier vol avec succès en juin 2019.

H55 a donc développé un système de propulsion totalement électrique qui a remplacé le moteur thermique d'un BRM aero Bristell NG5 existant avec le leur [54]. L'avantage d'H55 est de pouvoir jouir de l'expérience héritée du projet Solar Impulse concernant les aspects technologiques et de la certification. Cet avion a une endurance de 90 minutes, ce qui permet d'effectuer 45 à 60 minutes de vol de mission avec suffisamment de réserves, un programme d'entraînement typique pour les écoles de pilotage [54].

"Ampaire transforme les avions de passagers existants en avions électriques. Notre premier avion bimoteur (Electric EEL) est équipé d'un moteur à combustion à l'avant et d'un moteur électrique dans la queue, ce qui assure une redondance et donc une sécurité améliorée." [80]. Cet avion est donc hybride. En fait, Ampaire a remplacé le moteur à piston arrière du Cessna 337 Skymaster par un moteur électrique. Selon eux, un avion électrique réduit de 90% les coûts de carburant, de 50% ceux de maintenance et est 66% plus silencieux [81].



FIGURE 4.7 – Ampaire Electric EEL [82].



FIGURE 4.8 – Illustration du E10 de Scylax [83].

La start-up allemande Scylax "développe un avion entièrement électrique de 10 places conçu pour offrir un transport régional durable" [84]. L'avion à décollage et atterrissage sur très courte distance et entièrement fabriqué en composite, appelé E10, sera commercialisé comme une alternative à l'aviation d'affaires et commerciale. Les deux moteurs électriques de l'E10 seront alimentés par quatre batteries de 60 [kW], ce qui lui donnera une autonomie d'environ 300 [km].

Selon eux, la densité énergétique des batteries devrait être le double de ce qu'elle est actuellement, afin que l'autonomie du E10 soit de l'ordre de 600 km d'ici son entrée en service, en 2023 [84].

4.1.2 MEA - More Electric Aircraft

Les constructeurs aériens ont d'abord commencé à rendre leurs "avions plus électriques" (MEA) en incorporant de plus en plus de technologies électriques au sein des avions, comme l'Airbus A380 ou le Boeing B787 [85]. Dans les MEA, la majorité des systèmes pneumatiques, hydrauliques et/ou mécaniques, qui peuvent consommer jusqu'à 90 % de la puissance non propulsive d'un avion conventionnel [86], ont été remplacés par des systèmes électriques (FIGURES 4.9 et 4.10), offrant l'énorme avantage de réduire la consommation d'énergie tout en diminuant le poids des équipements, mais sans modifier le système de propulsion [13, 87]. Par exemple, les actionneurs hydrauliques des commandes de vol ont été partiellement remplacés par des actionneurs électriques dans l'A380 [88], et le Boeing 787 a adopté l'énergie électrique pour le système de protection des ailes contre la glace, qui était à l'origine un système pneumatique [89].

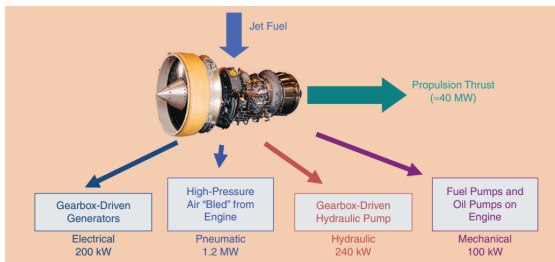


FIGURE 4.9 – Sous-systèmes conventionnels [90].

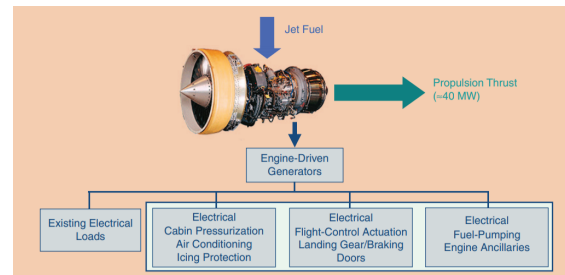


FIGURE 4.10 – Sous-systèmes du MEA [90].

Ces dispositifs fonctionnant à l'énergie électrique grâce à l'électronique de puissance (qui convertit et contrôle l'énergie électrique) [91] et présentant un meilleur rendement que les énergies pneumatique, hydraulique et mécanique [92], la part de l'énergie consommée pour la puissance non propulsive n'est que de 10% du carburant [86]. Cela ne permet donc de réduire, finalement, que légèrement la consommation en carburant mais n'est pas une solution pour supprimer de manière significative les émissions qu'un avion émet pendant le vol. Dès lors, les développements principaux des sous-systèmes électriques, repris au TABLEAU 4.1, seront brièvement cités en comparaison de ceux des avions conventionnels.

Avions conventionnels	MEA
Réacteurs conventionnels générant la puissance hydraulique, pneumatique et électrique, démarrage pneumatique	Réacteur à démarrage électrique
APU (unité de puissance auxiliaire) conventionnel, générant la puissance hydraulique, pneumatique et électrique	APU électrique, générant uniquement de la puissance électrique
Quelques convertisseurs d'électronique de puissance	Plus de convertisseurs d'électronique de puissance
Actionneurs hydrauliques et pneumatiques	Actionneurs électriques
Freins mécaniques	Freins électriques
Batteries uniquement utilisées en cas d'urgence ou pour démarrer l'APU	Batteries utilisées constamment

TABLE 4.1 – Comparaison de certains sous-systèmes dans les avions conventionnels et les MEA, basé sur [92].

Le concept MEA impose évidemment une charge beaucoup plus lourde au système électrique. La puissance installée typique du système électrique d'un B737 est d'environ 100 [kW], et pour le B787 cette puissance passe à plus de 1 [MW] [91]. Pour réduire le courant dans les systèmes électriques, et donc la masse des câbles, il faudrait envisager des systèmes électriques à plus haute tension. En effet, la tensions standard utilisée à bord des avions est de 115 [V], 400 [Hz] [93]. L'utilisation d'une fréquence élevée (comparée à 50/60 [Hz] utilisé domestiquement) permet de réduire la taille des composants nécessaires pour le traitement des signaux électriques. Cependant, le récent A350 possède des valeurs de tensions à bord de 230 [V], 400 [Hz] [94] et l'industrie prévoit même de grimper jusqu'à des valeurs allant jusqu'à 550 [V] [95], à cause de la demande croissante en puissance embarquée [96]. Cependant, cela comporte des défis comme l'augmentation du risque d'arcs électriques ou de décharges électriques, et l'isolation devient donc primordiale [95].

La notion de réduction de masse est primordiale pour les avions électriques. Un A380 comporte environ 530 [km] de câbles électriques [97], chaque composant présent dans un avion mérite donc d'être étudié quant à une réduction massique. Cette notion de réduction massique sera abordée plus en profondeur avec un cas d'étude pour les matériaux au CHAPITRE 6.

L'étape suivante menant vers une aviation moins carbonisée qui suit l'électrification des sous-systèmes est logiquement réalisée par l'électrification du système de propulsion.

4.2 Propulsion électrique

Compte tenu des efforts de réduction des émissions de GES à réaliser, les groupes motopropulseurs (appelés plus généralement propulsions électriques) électriques et hybrides sont les technologies évidentes à introduire. Elles offrent la possibilité de ne pas brûler de carburant et donc le potentiel de réduire considérablement les impacts de l'aviation sur le changement climatique afin d'atteindre les objectifs fixés parfois très ambitieux (CORSIA, SRIA, ATAG). Toutefois, dans le domaine de l'aviation, la propulsion électrique est confrontée à divers défis et exigences. Dans l'ensemble, on s'attend à ce que la propulsion électrique présente les avantages suivants : moins d'émissions de carbone, moins de bruit, des coûts d'exploitation réduits et des configurations d'avion plus souples [51]. Déjà dans les années 1970, les premiers avions à propulsion exclusivement électrique sont entrés en service [98].

Malgré un nombre croissant de projets d'avions à propulsion électrique (FIGURE 4.1), la plupart concerne des avions très petits (<9 passagers), à très courte autonomie (<500 kilomètres) [99]. Il n'existe pas encore d'avions commerciaux à propulsion entièrement électrique de la taille des types d'avions les plus courants actuellement, les monocouloirs, tels que le Boeing B737 et l'Airbus A320, sans parler des avions à couloir double (B787, A350, etc.).

Cependant, les réacteurs conventionnels alimentés au kérosène, dont l'architecture est classique et qui se composent de compresseurs axiaux, d'une chambre de combustion et de turbines, atteignent doucement la limite de rendement de Carnot, la conversion de l'énergie chimique en énergie mécanique. Pour dépasser cette limite, de nouvelles architectures de propulsions seront nécessaires [100]. Les systèmes de propulsion électriques les plus pertinents sont divisés en 3 principes : hybride, turboélectrique et totalement électrique, où les six architectures de systèmes d'alimentation les plus courantes qui pourraient être utilisées sont présentées sur la FIGURE 4.11.

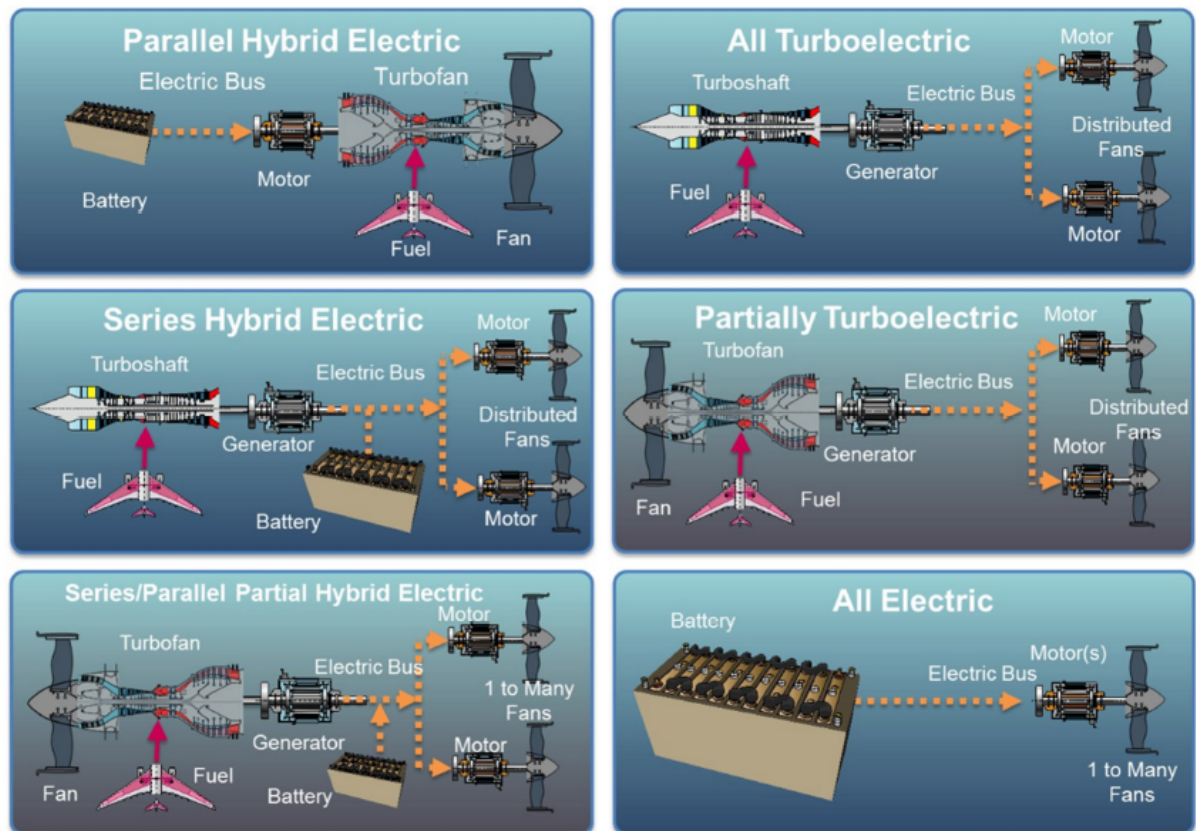


FIGURE 4.11 – Représentation schématique des différentes architectures pertinentes des propulsions électriques [101].

4.2.1 Totalelement électrique

Depuis le premier vol motorisé des frères Wright en 1903 [102], les avions commerciaux ont toujours été alimentés par des carburants hydrocarbonés. Cependant, la nécessité croissante de réduire les émissions de GES ainsi que les progrès récents dans la technologie des batteries pour automobiles ont permis un essor de l'intérêt pour la propulsion aérienne électrique. Bien que les émissions de dioxyde de carbone pendant le cycle de vie des avions entièrement électriques dépendent du mode de production de l'électricité, les émissions de combustion et donc les polluants atmosphériques directs et les impacts directs non liés au réchauffement seraient éliminés [8]. Les dispositifs en propulsion totalement électrique utilisent le stockage d'énergie électrochimique, typiquement des batteries, pour la propulsion. L'avion totalement électrique (ATE) alimenté en électricité issue de sources renouvelables est la seule possibilité d'architecture de propulsion électrique n'émettant aucune émission. Celle-ci sera la plus détaillée au cours de ce chapitre.

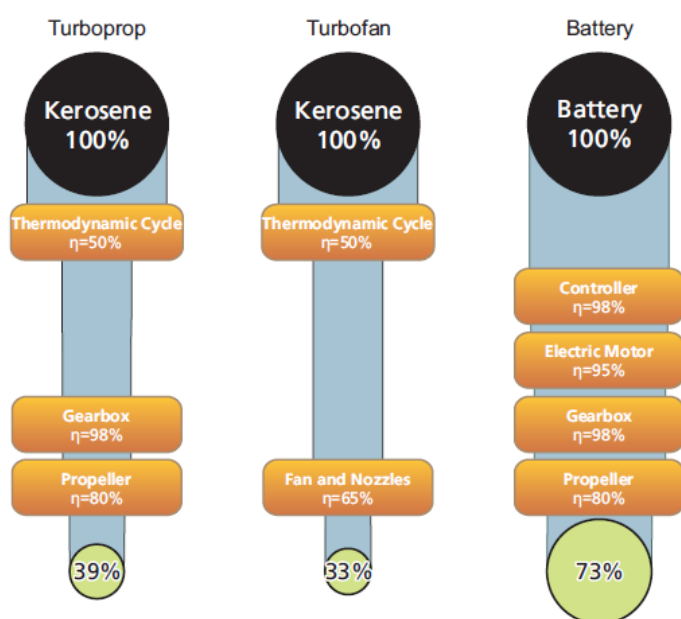


FIGURE 4.12 – Rendement de la propulsion au kérosène (turbosoufflante et turbopropulseur) par rapport à la propulsion électrique alimentée par batteries, adapté de [103].

Un atout majeur d'un ATE alimenté par batteries est que, contrairement aux réacteurs thermiques, la propulsion électrique est dispensée des limites imposées par le rendement thermique du cycle de combustion interne des réacteurs traditionnels et présentent donc un meilleur rendement de conversion d'énergie. Comme on peut le constater sur la FIGURE 4.12, où les réacteurs thermiques à turbosoufflante et à turbopropulsion sont comparés à une architecture de propulsion totalement électrique, les ATE jouissent donc d'un rendement d'ensemble plus élevé. La conversion globale de l'énergie à bord est 2,2 fois plus élevée dans les systèmes de propulsion électrique que dans les moteurs à combustion fonctionnant au kérosène [104].

Lorsque l'on parle de propulsions entièrement électriques comme alternative aux moteurs à combustion thermique, la principale limite de performance de cette technologie de propulsion est la nécessité pour les batteries utilisées d'atteindre une énergie spécifique (ou densité d'énergie) et une puissance spécifique comparables. La densité d'énergie est l'énergie par unité de masse du stockage d'énergie et la puissance spécifique est la puissance d'un composant par unité de masse. La densité énergétique du kérosène (JET A1) est de 11 900 [Wh/kg], alors que les batteries lithium-ion (*Li-ion*) actuelles présentent une densité énergétique qui tourne autour de 250 [Wh/kg] pour les meilleures, et des concepts avancés prévoient la réalisation d'une énergie spécifique allant jusqu'à 2000 [Wh/kg] pour certaines technologies de batteries (que sera discutée dans une prochaine section) [51, 105, 106]. Pour une même quantité d'énergie stockée, les batteries représenteraient donc un poids entre 10 et 50 fois plus élevé qu'une réserve de kérosène. Cependant, un avion totalement électrique, présentant un meilleur rendement d'ensemble et couplé à d'autres progrès technologiques (optimisation des opérations de vols, optimisation du fuselage, réduction du poids, etc.), permettrait de réduire la quantité d'énergie nécessaire pour réaliser un vol.

En effet, un poids plus élevé en vol a un impact significatif sur l'autonomie des avions électriques, car l'autonomie est directement proportionnelle à la densité d'énergie, comme nous le démontrerons plus loin. Cependant, en transformant simplement le stockage d'énergie sous forme de kérosène en batteries, la masse brute au décollage et à l'atterrissage des avions électriques augmenterait considérablement, ce qui accroîtrait encore la consommation totale d'énergie. De plus, le poids des avions électriques est discriminé par rapport aux avions à moteur à combustion par l'effet de diminution de la masse lors de la combustion du carburant, décrit par l'équation de Breguet qui fournit le rayon d'action (l'autonomie) RA , reprise à l'équation (4.2) (section 4.3).

De même, un avion ayant une masse fixe, comme un avion électrique, a besoin d'une énergie totale plus élevée qu'un avion à moteur à combustion dont la masse diminue au cours de la mission. Cette équation sera adaptée à un avion électrique dans la section sur les performances.

Contrairement au concept de stockage de l'électricité et de recharge des batteries des avions électriques au sol, il existe également des avions solaires photovoltaïques. Cependant, des concepts tels que le *Solar Impulse* ou le *Elektra Solar* sont loin d'être réalisables pour le transport commercial de passagers. Néanmoins, une expertise en cette technologie a permis à une compagnie comme H55 de se baser sur leurs connaissances en aviation solaire, notamment par le biais d'André Borshberg, co-pilote du Solar Impulse et fondateur d'H55, pour la production d'un système de propulsion électrique pour un avion bi-place (de loisir ou d'entraînement) [54].

4.2.1.1 Challenges

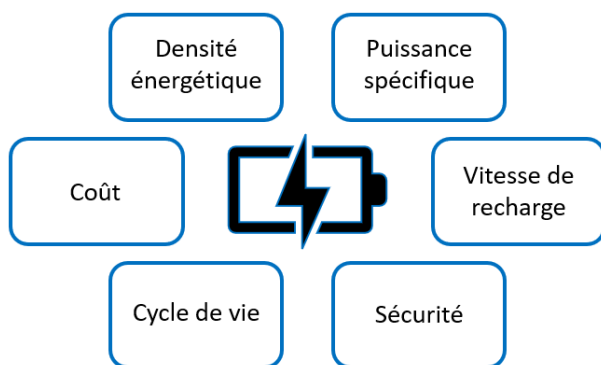


FIGURE 4.13 – Principaux challenges relatifs aux batteries.

Il existe de nombreux défis technologiques que les développements de batteries devront relever afin de pouvoir concevoir un ATE, dont les principaux sont illustrés sur la FIGURE 4.13. D'autres paramètres, non étudiés dans ce travail, sont néanmoins d'importance, comme la plage de température de fonctionnement, la capacité à s'auto-décharger ou encore le temps pendant lequel elle peut être stockée (comme inactive ou avec une utilisation minimale), de sorte que sa capacité reste supérieure à 80 % de sa capacité initiale [107]. Ces différents challenges vont être succinctement expliqués dans la suite de cette section.

Densité énergétique (Wh/kg) Comme expliqué précédemment, ce paramètre définit la masse, et donc la taille de l'avion ainsi que le nombre de passagers, qu'un ATE peut concevoir, en fonction de l'autonomie à atteindre. Il s'agit du paramètre le plus contraignant quant à la conception concrète d'un ATE ; les batteries actuelles possédant une densité énergétique environ 50 fois moindre que celle du kérosène. La consommation totale d'énergie est principalement déterminée par la durée de vol. La consommation type d'un avion long-courrier est de $100 [kWh/km]$ et celle d'un court-courrier type monocouloir vaut $38,7 [kWh/km]$ [51]. La consommation totale d'énergie nettement plus élevée d'un avion long-courrier (type deux couloirs) nécessiterait des densités d'énergie de batterie d'environ $7\,000 [Wh/kg]$ et une puissance spécifique des machines électriques de $6 [kW/kg]$ [51]. Ces performances technologiques ne sont pas couvertes par la technologie actuellement disponible. Par conséquent, les ATE ne peuvent être introduits, pour le moment, que sur de courtes distances.

Puissance spécifique (W/kg) Les avions électriques doivent également relever le défi de la variation des besoins en puissance pendant le vol (FIGURE 4.14).

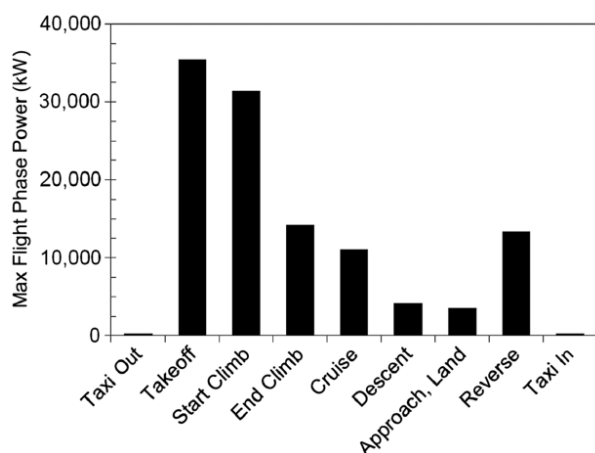


FIGURE 4.14 – Puissance de pointe requise selon les phases d'un vol (avion conventionnel de ± 150 passagers) [101].

Ces besoins sont les plus élevés au décollage, en montée et pendant l'atterrissage (lors de la poussée inverse). Les phases de vol les moins gourmandes en puissance sont la croisière (énergie uniquement utile pour vaincre les forces de frottement) et la descente (approche). Cependant, ces dernières peuvent fluctuer en fonction de l'itinéraire et des conditions de vol, ce qui complexifie la conception des batteries et, plus spécifiquement, celle du système de gestion des batteries. Ainsi, les moteurs électriques doivent être dimensionnés pour la puissance maximale requise et, par conséquent, ils sont surdimensionnés par rapport aux conditions de croisière, ce qui implique une pénalité de poids. Néanmoins, une nouvelle conception des systèmes de propulsion pourrait permettre de la surmonter.

Cela peut notamment être réalisé simplement en volant à une vitesse de croisière plus lente, ce qui réduirait l'altitude de croisière et donc les besoins en puissance de montée. En effet, en diminuant la vitesse de Mach 0,82 à Mach 0,7, 15% de l'énergie totale peut être économisée [51]. De plus, les besoins en puissance de décollage pourraient être réduits en utilisant des pistes plus longues ou en réduisant la charge alaire (rapport entre la masse de l'avion et la surface des ailes).

L'utilisation de matériaux supraconducteurs est un autre aspect qui pourrait améliorer le poids et l'efficacité de la propulsion électrique, tout en diminuant la production de chaleur des moteurs électriques. En effet, la supraconductivité est *"le phénomène par lequel la résistance électrique d'un métal disparaît lorsque celui-ci est refroidi"* [108]. Ces matériaux ont donc tendance à conduire l'électricité sous faible résistance et à réduire la production de chaleur par effet Joule. L'utilisation de matériaux supraconducteurs dans les avions permettrait d'utiliser des moteurs électriques compacts et légers qui présenteraient une densité de puissance très élevée (jusqu'à 40 [kW/kg] [109]) et entraînerait une diminution du poids (ou permettrait l'utilisation de puissances plus élevées pour un même poids) [110]. Dans une conception de moteur supraconducteur proposée pour un moteur de Cessna 172, il serait possible de réduire le poids de 56,25 % par rapport à un moteur classique [86]. Néanmoins, il est peu probable qu'une utilisation fiable de la technologie supraconductrice dans l'aviation puisse être atteinte avant 2040 [110].

Coût Le coût des batteries, actuellement élevé, devrait diminuer dans les années à venir en fonction de la demande, et surtout de l'offre, comme en témoigne l'historique du prix moyen des batteries Li-Ion sur la FIGURE 4.15.

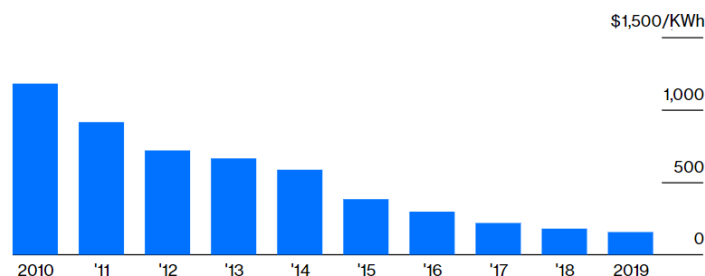


FIGURE 4.15 – Historique de coût des batteries Li-ion [111].

En ce qui concerne les compagnies aériennes, elles désireraient bien évidemment que le coût d'utilisation de batteries soit inférieur à celui du kérosène. Une étude comparative sera réalisée au CHAPITRE 5.

Cycle de vie Le nombre de cycles charge/décharge que les batteries peuvent réaliser avant de perdre en capacité de manière significative est relativement important. Cela augmentera les intervalles de maintenance nécessaires pour effectuer le changement de batteries, ainsi que les coûts de remplacement.

Vitesse de recharge Un avion reste en moyenne 45 minutes au sol entre l'arrivée et le départ pour le vol suivant. La vitesse de charge est par conséquent un paramètre très important pour garder un rendement élevé et garantir une rentabilité maximale. Si cela n'est pas possible, il faudra envisager une technologie de pack de batteries "interchangeable" afin d'échanger simplement la batterie utilisée pendant le vol avec une nouvelle qui aura été rechargée aux bornes de l'aéroport.

Sécurité et certification Afin d'assurer la sécurité des passagers et membres d'équipages, des exigences de certification pour les architectures des systèmes de propulsion électriques des avions sont requises. La majorité des études ne couvrent pas ou que partiellement les aspects relatifs à la certification. Néanmoins, les spécifications actuelles de certification des gros avions de l'Agence européenne de la sécurité aérienne (EASA) avec le CS-25 [112] ou de la Federal Aviation Administration (FAA) avec les Federal Aviation Requirements Part 25 [113] traitent des systèmes de propulsion à base de carburant, ainsi que des spécifications du système électrique utilisé pour alimenter les sous-systèmes. L'utilisation de l'énergie électrique comme alimentation électrique primaire du système de propulsion n'est actuellement pas couverte par ces spécifications. On constate donc le gros challenge auquel doivent faire face les producteurs actuels d'avions électriques : le manque de certification concernant la propulsion électrique. Les critères de conception de base peuvent être dérivés sur la base des exigences de certification existantes. Cette approche a déjà été réalisée par Stückl [114] sur la base des exigences de l'EASA CS-25.

4.2.1.2 Batteries : technologie actuelle & future

La masse étant un paramètre critique, seules des batteries ayant des propriétés intéressantes par rapport à l'aviation seront ici comparées et analysées. Actuellement, la technologie de pointe au niveau des batteries et qui servira de base de comparaison est le type Lithium-ion. Beaucoup de types de batteries Li-ion existent, définies par la composition de l'anode (souvent du graphite) et surtout de la cathode (l'option utilisée présentant la plus haute densité d'énergie est la NCA, composée de lithium, nickel, cobalt et d'oxyde d'aluminium) [115]. Le souci majeur repoussant l'apparition d'avions électriques ou même hybrides est la capacité de stockage d'énergie des batteries, très limitée. Le "state-of-the-art" de batteries Li-ion utilisées commercialement aujourd'hui possède une densité énergétique d'environ $280 [Wh/kg]$, technologie pourtant riche de plus de trente ans de recherches [116]. Étant donné qu'il faudra au minimum deux à trois fois cette valeur pour voir apparaître des avions avec une centaine de passagers [117], les technologies de batteries Lithium-Soufre (*Li-S*) et Lithium-air (*Li-air*), proposant des valeurs théoriques de densité énergétique très élevées, ainsi que les batteries à l'état solide proposant de surcroît une sécurité accrue, vont être comparées et analysées dans cette section. Selon Airbus et la communauté scientifique, la recherche sur les batteries est peut-être celle qui bénéficie des investissements les plus importants au monde à l'heure actuelle [118, 119, 120].

Lithium-Soufre Par rapport aux batteries de technologie Li-ion, une cellule Li-S présente une plus haute densité d'énergie (jusqu'à 3 fois plus élevée [121]), une sécurité accrue et un coût d'unité plus bas dû à la forte abondance du soufre [122]. Un avantage clé est sa haute densité énergétique théorique atteignable, valant $2500 [Wh/kg]$ [120]. Par conséquent, cette technologie reçoit de plus en plus d'attention de la part des scientifiques, et sera même probablement bientôt commercialisée via le leader de la technologie, *OXIS Energy*, qui prévoit de construire très prochainement une usine de production en masse [123]. Cependant, cette technologie présente des défauts à prendre en considération tels qu'une faible capacité à fournir une puissance instantanée élevée (nécessaire pendant la phase de décollage, par exemple), une tendance à s'auto-décharger et la courte durée de son cycle, en particulier en présence de courants de décharge élevés [124].

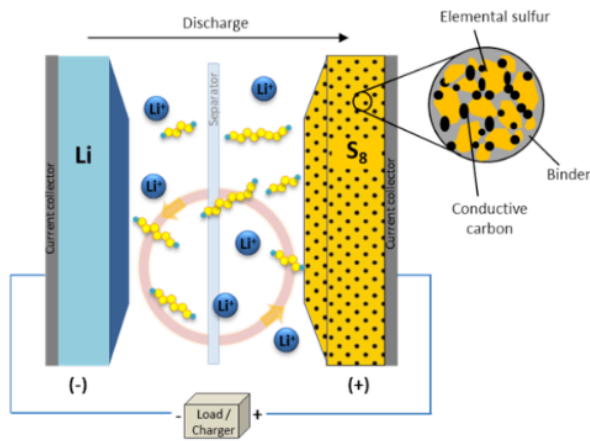


FIGURE 4.16 – Principe de fonctionnement d'une cellule Li-S [119].

Chargée, une cellule Li-S se compose d'une cathode contenant généralement du soufre, un matériau à base de carbone et un liant. L'anode est en lithium et est séparée de la cathode par un séparateur polymère et un électrolyte à base de solvant organique. Pendant le fonctionnement (en décharge), le soufre solide de la cathode se dissout dans l'électrolyte, formant $S_8(l)$. Le S_8 liquide est ensuite réduit électrochimiquement à la cathode pour former des produits intermédiaires, appelés polysulfure de lithium (Li_2S_x), avec une oxydation du métal Li en ions Li^+ à l'anode. Ces espèces polysulfurées (Li_2S_x avec $2 < x < 8$) sont solubles dans l'électrolyte liquide et diffusent de la cathode dans l'électrolyte [120]. Lorsque la décharge se poursuit, la longueur de la chaîne de polysulfure se réduit, ce qui affecte à son tour la viscosité, la mobilité et la solubilité de composés Li_2S_x .

À la fin de la décharge, le S_8 est entièrement réduit en S_2 (Li_2S) (voir eq.(4.1)) et l'anode est entièrement dépouillée d'ions métalliques de lithium [120]. Pendant la recharge, le mécanisme inverse s'opère, formant du S_8 par oxydation. Le principe de fonctionnement est schématisé sur la Figure 4.16.

La densité énergétique élevée provient de la réduction d'une molécule de S_8 à la cathode :



En pratique, on peut supposer que la densité énergétique réelle d'une batterie, en tenant compte de la masse supplémentaire requise par les accessoires des cellules (matériaux, séparateur, excès de matière active) pourrait atteindre 25-33% de la valeur théorique. De plus, un "pack" de batterie présente une énergie spécifique d'environ 80% par rapport aux valeurs d'une "cellule" simple. Dans le cas du Li-S, la densité énergétique atteignable en pratique serait de 600 à 800 $[Wh/kg]$ avant 2050 [51, 125, 126].

Malgré de nombreux avantages prometteurs, la technologie Li-S présente plusieurs problèmes, bien que certains puissent être résolus par des solutions techniques améliorées car la majorité d'entre eux sont liés au mécanisme de fonctionnement très complexe du Li-S, sensiblement différent de celui du Li-ion classique, impliqué dans la conversion du soufre élémentaire (S_8) en sulfure de lithium (Li_2S). En fait, au fur et à mesure que le processus de décharge se poursuit, la longueur de la chaîne de polysulfures solubles se réduit, ce qui affecte la viscosité de l'électrolyte. Le produit de rejet final, Li_2S_x/Li_2S , est un matériau solide et isolant qui provoque la fin prématurée de la décharge, en rendant passif la surface conductrice de la cathode, ce qui va également provoquer l'augmentation de la résistance interne, conduisant à la production de chaleur dans les cellules de grand format. Cette tendance à surchauffer est contrée en utilisant du lithium céramique ainsi qu'un électrolyte inflammable [125].

Une autre limitation importante des performances de la technologie Li-S provient de l'utilisation d'une anode en lithium métal (pur). Bien que cela contribue à une densité d'énergie élevée, le lithium pur est une cause importante de la durée de vie relativement courte des piles Li-S (des centaines de cycles lorsqu'elles sont testées dans des conditions réalistes, contre des milliers pour les piles Li-ion). Cependant, utiliser une autre enveloppe protectrice pour l'anode telle que du graphite ou du silicone augmente le nombre de cycles mais réduit la densité d'énergie, l'atout principal (et recherché!) de ce type de batteries. Un autre problème des cellules Li-S est l'utilisation du soufre comme matériau pour la cathode. Le soufre, matériau actif, est électriquement isolant, c'est pourquoi une grande quantité d'additif carboné conducteur est nécessaire pour obtenir un réseau convenablement conducteur (jusqu'à 20-30 % en poids, alors que les cathodes Li-ion nécessitent $\simeq 2-4$ % en poids) [120]. Cela peut avoir un impact sur la densité d'énergie, mais plus important encore, cela crée une structure cathodique poreuse, qui risque de s'effondrer sous l'effet de cycles répétitifs de dépôt et de dissolution [122, 127].

Lithium-air Comme affiché sur la FIGURE 4.17, la batterie Li-air présente une valeur théorique de densité énergétique extrêmement élevée. Si on tient compte de l'ensemble des composants d'une batterie (boîtier, électrolyte, canaux d'air) la densité énergétique est estimée à 1000 [Wh/kg]. Visco et Tan estime 1000 Wh/kg [128, 129], Girishkumar 1700 Wh/kg [130] et Johnson jusqu'à 2000 Wh/kg [131].

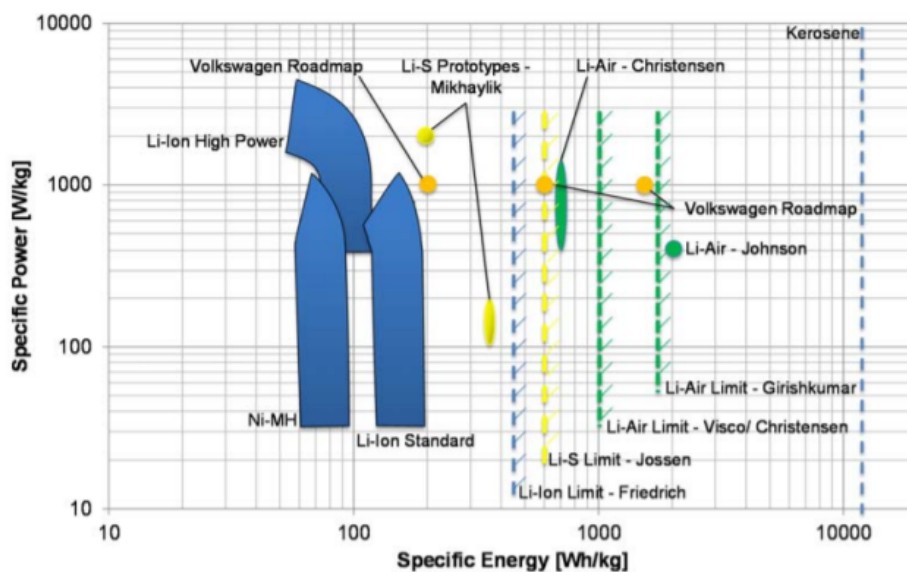


FIGURE 4.17 – Résumé des prévisions concernant la densité de puissance et d'énergie des futures batteries [114].

La différence fondamentale de ce type de cellule par rapport aux systèmes de batteries classiques est le fait que l'oxygène n'est pas stocké dans la cathode de la cellule mais fourni depuis l'extérieur. Les sources d'oxygène peuvent être un réservoir ou de l'oxygène disponible dans l'air ambiant. Les systèmes Li-air offrent donc deux avantages : premièrement, la réaction d'oxydoréduction elle-même fournit une densité d'énergie élevée et deuxièmement, l'oxygène ne doit pas être stocké dans le système cellulaire dès le début de la décharge. Par contre, étant donné que l'oxygène est prélevé dans l'air ambiant, les systèmes Li-air gagnent du poids en accumulant le produit de réaction (peroxyde de lithium) lors de la décharge [114].

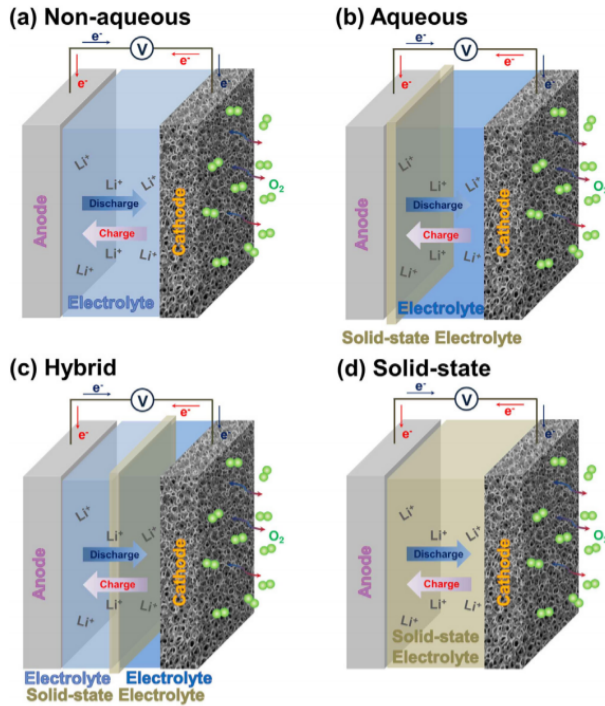
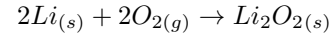
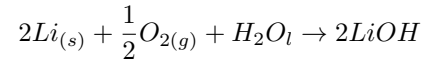


FIGURE 4.18 – Représentation schématique des configurations possibles de la cellule Li-air [129].

Comme illustré à la FIGURE 4.18, quatre types de cellules lithium-air ont été proposés et développés en fonction de la forme d'électrolyte utilisé : les cellules lithium-air non aqueuses, aqueuses, hybrides non aqueuses/aqueuses et à l'état solide (électrolyte solide). Dans le cas où les sels de lithium sont dissous dans le solvant non-aqueux (a), le couple redox dans une réaction Li-air ($Li - O_2$) est [117] :



et le produit Li_2O_2 sera formé de manière irréversible, provoquant l'obstruction de la cathode et donc une très courte durée de vie [129]. Pour remédier à cela, les différentes configurations utilisent une solution aqueuse, de réaction [132]



où une membrane a été ajoutée dans les configurations aqueuses (b) et hybrides (c) de telle sorte que l'anode ne réagisse pas avec l'eau (le lithium réagissant fortement avec l'eau). Afin d'avoir un fonctionnement plus sûr, on peut finalement utiliser un électrolyte solide (plus de fuite possible) [129].

Le défi principal consiste à stabiliser et accélérer le processus de chargement et de déchargement, car les performances de cycle de vie ne sont pas encore satisfaisantes. Pour les électrolytes non aqueux, le challenge réside dans la stabilité dans l'environnement d'oxydation, qui est la clé d'une durée de vie raisonnable du cycle. En effet, la cathode permettant à l'oxygène de diffuser, est susceptible d'être obstruée par l'espèce réactionnelle et doit être protégée efficacement contre l'humidité. L'anode, qui est constituée de lithium métallique, doit également recevoir une protection et a tendance à se dégrader rapidement après quelques cycles. [133]. Pour les électrolytes solides, une conductivité élevée des ions lithium est essentielle pour une capacité et une puissance de sortie raisonnables. Pour les électrolytes aqueux, la stabilité par rapport aux membranes à électrolyte solide est cruciale pour la performance et la sécurité, et une évaluation minutieuse est donc nécessaire [129].

Batterie à l'état solide Les batteries Li-air et Li-S suscitent un intérêt considérable en raison de leurs densités énergétiques très élevées. Cependant, malgré les progrès substantiels de leur développement, la sécurité reste un problème en raison de l'inflammabilité de leurs électrolytes organiques. De plus, la volatilisation de l'électrolyte des batteries Li-air et les réactions parasites dans les batteries Li-S entravent sérieusement leur développement [134]. L'utilisation de batteries Li-air et Li-S à l'état solide constituent une solution, en retirant les électrolytes liquides inflammables des batteries au lithium-ion et en les remplaçant par des électrolytes solides (FIGURE 4.19). Les dispositifs de stockage d'énergie ainsi obtenus sont plus sûrs, plus compacts et de plus grande capacité [135].

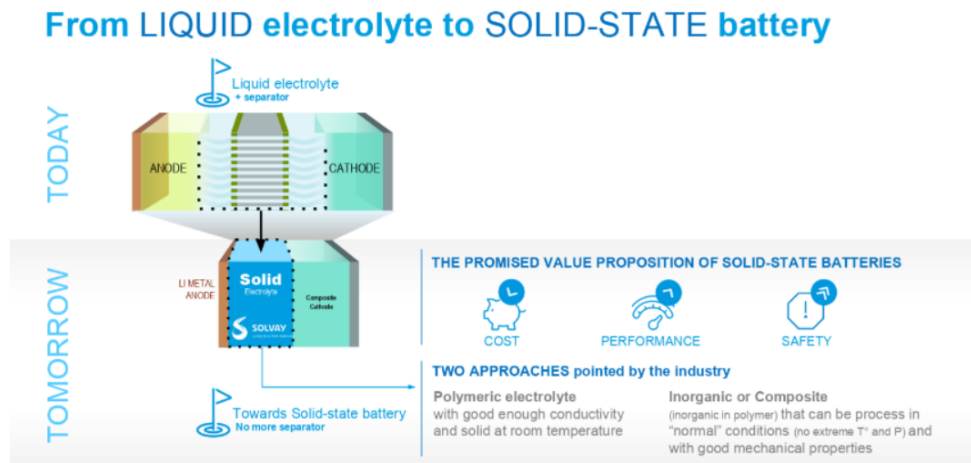


FIGURE 4.19 – Représentation schématique et avantages principaux du passage de l'électrolyte de l'état liquide à l'état solide, selon SOLVAY [136].

Dès lors, l'intérêt premier des batteries à l'état solide est la sécurité accrue, paramètre de plus haute importance lorsqu'il s'agit d'un avion. Malheureusement, même un électrolyte solide de pointe présente certains inconvénients, tels qu'une faible conductivité, une mauvaise stabilité chimique dans l'air et un changement de volume au niveau des électrodes. Par conséquent, il est crucial de trouver un électrolyte approprié ayant une excellente conductivité ionique et une stabilité chimique et électrochimique acceptable [134]. À l'heure actuelle, le système de batterie sodium-soufre à haute température est la seule technologie de stockage d'énergie viable qui utilise un électrolyte solide [137]. Cependant, certaines de ses propriétés telles que la densité énergétique théorique de $450 [Wh/kg]$ [138] ne sont pas suffisantes pour des applications en aéronautique, il reste donc d'énormes progrès à réaliser afin d'obtenir des batteries Li-S ou Li-air à l'état solide.

Résumé comparatif Même si la technologie lithium-air devenait disponible vers 2030, et dans l'hypothèse où on arriverait à obtenir une densité d'énergie concrète de 1000-2000 [Wh/kg], un grand écart d'énergie spécifique par rapport au kérosène persiste même pour les prévisions les plus optimistes. L'impact du poids qui en résulte sur les éventuels avions à propulsion électrique dépendra alors fortement de l'efficacité du système de propulsion. Cependant, pour des raisons technologiques et de sûreté, la batterie Li-S semble la plus prometteuse pour un avenir dans l'aviation, malgré le problème du poids. En effet, en raison de la réduction des coûts résultant de l'utilisation d'une cathode de soufre, les batteries lithium-soufre à haute densité énergétique sont des candidats prometteurs pour succéder aux batteries lithium-ion dans toute une série d'applications, notamment pour les véhicules électriques [137]. ELON MUSK estime que les batteries devraient atteindre une densité énergétique d'au moins 400 [Wh/kg] pour battre le kérosène et qu'un avion électrique soit viable [139]. Malgré les progrès significatifs réalisés grâce à un nombre toujours plus croissant de recherches, cette technologie de batterie est toujours confrontée à des défis techniques considérables qu'il reste à surmonter. À l'aide d'une compilation de sources scientifiques, le TABLEAU 4.2 reprend et compare les caractéristiques théoriques et techniques principales des cellules Li-S, Li-air et Li-ion.

Spécifications	Li-S	Li-air	Li-ion
Densité d'énergie spécifique théorique (Wh/kg)	2500	11680	500
Densité d'énergie spécifique maximale actuelle (Wh/kg)	470	350	280
Puissance spécifique (W/kg)	1500	460	500
Cycles (avant d'arriver à 80% de la capacité en début de vie)	500-1500	200	1500-4500
Temps de charge	moyenne	lente	très rapide à moyenne
Température de charge (°C)	-20 à 50	5 à 40	5 à 45
Coûts (USD/kWh)	100-200	250	150-1300
Avantages	Densité d'énergie élevée, soufre abondant, bon marché et non toxique	Densité d'énergie théorique très élevée	Bonne connaissance et maîtrise de la technologie, longue durée de vie
Challenges/défauts	Assez courte durée de vie, réactions compliquées, faible puissance instantanée et nécessite lithium pur	Chargement lent, durée de vie faible, stabilité, fuites, gain de masse, nécessite lithium pur, procédé de fabrication (stérile), produits de réactions	Risque d'explosion des cellules (dendrites), densité énergétique, coûts, matières premières

TABLE 4.2 – Comparaison technique des principales technologies de cellules de batteries [117, 120, 122, 127, 129, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148].

4.2.1.3 Bilan écologique lié à un ATE

En 2016, l'intensité carbone de la production d'électricité en Europe était estimée à 296 [gCO_2/kWh] [149], et il est estimé qu'il faut 162 [kWh] d'électricité pour produire 1 [kWh] de batterie [150].

Les émissions de CO_2 associées à la **production** des batteries sont également à prendre en considération. Les résultats de calculs, effectués sur différentes études [140, 145, 151, 152], sont repris au TABLEAU 4.3.

Source	Intensité carbone [gCO_{2eq}/kWh]
Production d'électricité	296
Production de batteries Li-ion	53
Production de batteries Li-air	26
Production de batteries Li-S	13

TABLE 4.3 – Comparaison de l'intensité carbone liée à la production d'électricité et de batteries.

En faisant les hypothèses qu'une batterie Li-S présentera une densité énergétique de 800 [Wh/kg] et qui consommerait 3 [$Wh/Passager/km$] [153], en considérant ensuite un ATE de 150 passagers faisant un vol d'une distance de 800 [km] et qui consommerait environ 180 [$Wh/Passager/km$] [154], cet avion électrique générerait 54 [$gCO_{2eq}/Passager/km$], ce qui serait environ équivalent à une voiture avec 4 passagers à bord (FIGURE 2.4). Par ailleurs, les effets climatiques qui ne sont pas liés au CO_2 seraient éliminés. On voit donc que pour arriver à zéro émission, la seule option est le déploiement rapide et complet d'un parc de production d'électricité exclusivement sous forme d'énergies renouvelables pour produire et alimenter les batteries des avions électriques.

Cependant, le recyclage permettrait d'éviter environ 10 à 30 % de l'impact environnemental lié à la production [145]. Les émissions en fin de vie de batterie ne sont pas pris en compte au vu du potentiel de réutilisation de telles batteries, qui pourraient avoir une seconde vie dans des applications stationnaires moins exigeantes, telles que certains services ou appareil des hôpitaux, ou encore pour des systèmes d'alarmes.

L'impact écologique ne s'arrête pas aux émissions de GES. En effet, l'exploitation de matériaux constituant les cellules de batteries (lithium, soufre) et de tous les dispositifs électriques tels que les moteurs, le câblage, l'électronique et les aimants permanents du moteur (néodyme, terres rares (praséodyme et dysprosium), cuivre) sera en forte croissance au niveau de la demande, et une question légitime se pose donc quant à leur disponibilité et la méthode d'extraction utilisée pour permettre leur production en masse. Cependant, comme représenté sur la FIGURE 4.20, la disponibilité de la majorité des éléments principaux nécessaires au déploiement des ATE ne présente pas de risque de pénurie dans le court-terme.

Les éléments principaux utilisés dans le système de propulsions électriques et dans les batteries sont représentés en cadre vert, ceux utilisés dans les technologies conventionnelles (réacteurs thermiques, batteries Li-ion) sont représentés en rouge. On constate donc que seules les "terres rares" présentent un risque de pénurie ou un conflit géopolitique considérable. En effet, en plus du caractère "rare", une matière première peut générer des conflits afin d'en garantir l'approvisionnement. A l'exception des terres rares, la grande partie des éléments très à risques employés dans les réacteurs thermiques modernes (tungstène, cobalt, béryllium, niobium) pour les matériaux nécessaires, par exemple pour les aubes du premier étage de turbine ou la chambre de combustion devant résister à des contraintes thermiques et mécaniques très élevées, ne seront plus utilisés avec des moteurs électriques.

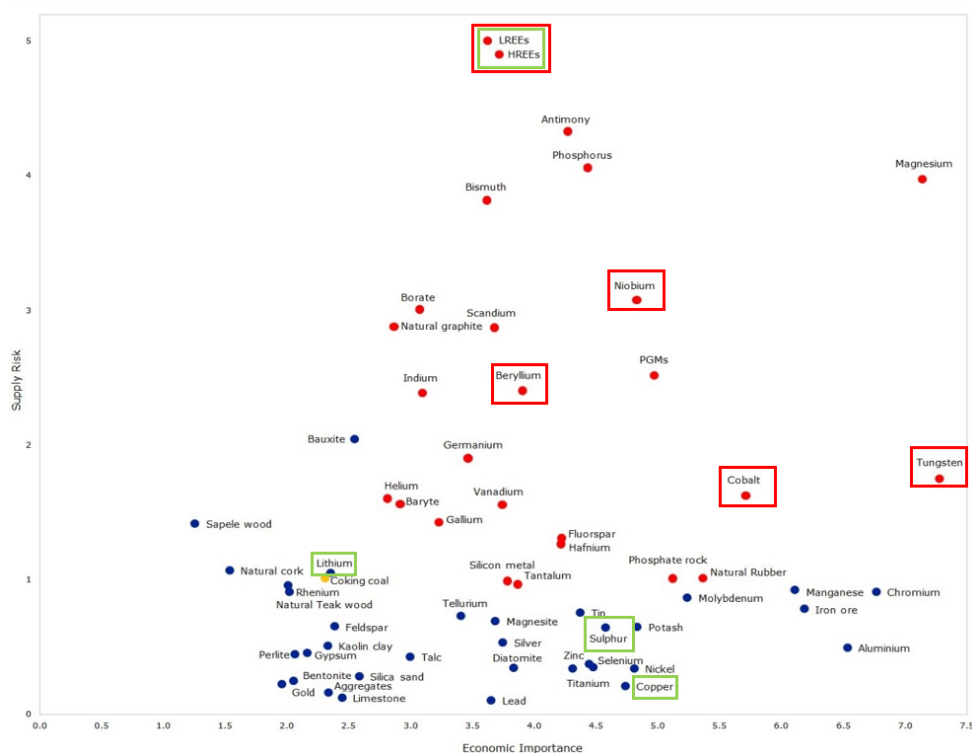


FIGURE 4.20 – Graphe reprenant les métaux critiques en fonction de l'importance économique et du risque de pénurie, adapté de [155].

Le lithium est une matière première essentielle pour la fabrication des batteries lithium-ion actuellement disponibles et des futures générations de batteries telles que les batteries lithium-air et lithium-soufre, et son impact écologique est donc à prendre en considération. Le lithium présente quelques controverses quant à son extraction et sa transformation (représentés sur la FIGURE 4.21).

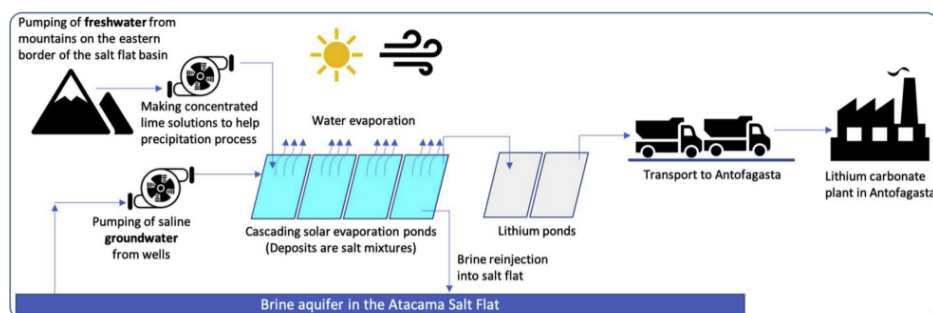


FIGURE 4.21 – Représentation schématique de l'extraction et de la transformation du lithium[156].

Actuellement, les 2/3 de la production mondiale de lithium sont extraits des saumures, une pratique qui fait évaporer en moyenne un demi-million de litres de saumure par tonne de carbonate de lithium. En outre, l'extraction est intensive en eau, en produits chimiques, est extrêmement lente et produit de grands volumes de déchets [157]. En effet, ces opérations impliquent par endroit l'utilisation de 10 litres d'eau par seconde, ce qui induit un risque de sécheresse dans les localités à proximité des sites d'extraction [158]. D'autres effets néfastes comme la pollution de l'air, la contamination de l'eau et des sols, la destruction d'espèces menacées et la fragilisation de la biodiversité [156, 159, 160] sont également à prendre en considération. Une solution serait d'utiliser une batterie type "métal-soufre", avec l'utilisation de sodium, matière première non critique, pour l'anode [141], bien que des

contraintes au niveau des performances seront donc à prévoir.

Au cours des cinq prochaines années, la production mondiale de lithium devrait augmenter de 220 % et la demande mondiale de lithium de 263 %, arrivant à la barre du million de tonnes produit en 2025 [161]. Concernant les véhicules électriques, la demande devrait augmenter de 2638% pour le lithium et de 954% pour le néodyme (moteurs électriques), comme représenté sur la FIGURE 4.22. Selon des analyses de Bloomberg et d'Albemarle, les réserves de lithium sont assurées pour au moins le 21^{ème} siècle [162].

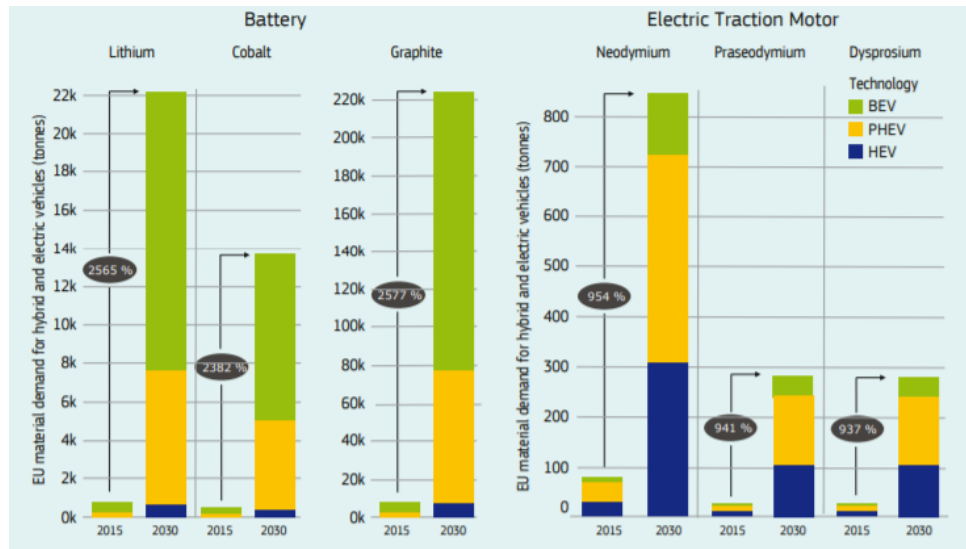


FIGURE 4.22 – Croissance de la demande en matières premières pour les batteries Li-ion et moteurs électriques de tous véhicules électriques. (BEV : véhicule électrique à batterie. PHEV : véhicule électrique hybride rechargeable. HEV : véhicule électrique hybride) [163].

Dès lors, la demande en matières premières pour les nouvelles batteries et systèmes de propulsion électriques serait plus bénéfique qu'actuellement, en réduisant drastiquement la demande de nombreux éléments critiques (cobalt, tungstène, graphite, terres rares etc.) qui ne seraient plus nécessaires. De plus, cela permettrait d'éviter des conflits géopolitiques dû à la concentration des sources de cobalt (République Démocratique du Congo) et le graphite (Chine), possédant respectivement environ 60% et 80% des ressources mondiales à eux-seuls [163].

Cependant, le lithium verrait sa croissance s'accroître, et le néodyme également. En plus du risque de pénurie pour ces matières premières, l'impact écologique de leur extraction et production, particulièrement pour le lithium, reste préoccupant.

4.2.2 Turboélectrique

La propulsion turboélectrique est l'une des trois approches prioritaires identifiées dans cette section concernant le développement de nouvelles technologies avancées de propulsion électrifiée qui pourraient être mises en service au cours des 10 à 30 prochaines années afin de réduire les émissions de CO_2 . Dans ce principe, l'énergie de propulsion est stockée sous forme de carburant liquide alimentant un moteur à combustion qui propulse un générateur entraînant un ou plusieurs moteurs électriques créant une puissance de propulsion. Il existe les configurations turboélectriques complètes et partielles, et celles-ci ne dépendent pendant aucune phase du vol de batteries pour l'énergie de propulsion. Des turbines à gaz sont employées pour entraîner des générateurs électriques, qui alimentent des onduleurs et éventuellement des moteurs individuels à courant continu qui entraînent les différents propulseurs électriques. Un système turboélectrique partiel est une variante du système turboélectrique complet qui utilise la propulsion électrique pour fournir une partie de la puissance propulsive, le reste étant fourni par une turbosoufflante entraînée par une turbine à gaz.

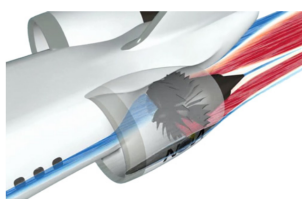


FIGURE 4.23 – Principe de l'ingestion de la couche limite au niveau du réacteur [164].

Par conséquent, les composants électriques d'un système turboélectrique partiel peuvent être développés avec des progrès moins importants que ceux requis pour un système turboélectrique complet. Comme il est relativement facile de transmettre électriquement de l'énergie à plusieurs moteurs largement espacés, les concepts de propulsion turboélectrique et autres concepts de propulsion électrique sont bien adaptés à la propulsion distribuée et ils offrent des options de conception d'avion permettant de maximiser les avantages de l'ingestion de la couche limite dans les propulseurs (augmentant le rendement, en diminuant la puissance nécessaire du moteur mais rend l'écoulement non-uniforme [165]) [166].

Dans l'ensemble, on considère que la propulsion turboélectrique est équipée de rendements électriques d'environ 90 %.

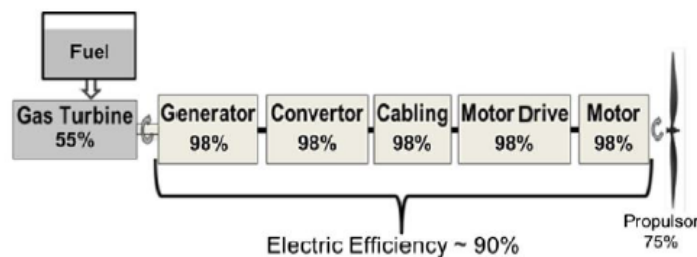


FIGURE 4.24 – Rendement de la propulsion turboélectrique [51].

Les rendements des composants de 98 % affichés ci-dessus sont des objectifs fixés par la NASA pour un système d'entraînement électrique avancé de 2,6 MW. Les Académies nationales des sciences ont fait des hypothèses plus prudentes de 95 % d'efficacité des composants électriques, réduisant l'efficacité électrique à 80 % [167]. Par rapport à l'entraînement mécanique direct, qui entraîne le propulseur avec un rendement de 99,5 %, les approches turboélectriques subissent une pénalité de 10 à 19,5 % en termes de rendement. Par conséquent, les composants du système électrique de la propulsion turboélectrique émettent plus de chaleur résiduelle que les moteurs à combustion classiques. Cela ajoute une autre diminution de 3 % de l'efficacité. La consommation de carburant et les émissions de GES inhérentes doivent donc dépasser au moins 13 % afin de rendre la propulsion turboélectrique plus intéressante pour la réduction des émissions de l'aviation que les moteurs à combustion fonctionnant uniquement au kérosène [86, 168].

En outre, les coûts d'investissement et d'exploitation du système de propulsion turboélectrique sont comparables à ceux des turbines à gaz classiques [51]. Comme les deux technologies sont nécessaires sur un avion turboélectrique, cette technologie de propulsion serait deux fois plus coûteuse que la technologie conventionnelle. En supposant que les moteurs représentent environ 20 % des coûts d'investissement des compagnies aériennes et que les moteurs turboélectriques augmenteraient les coûts des compagnies aériennes dans cette fourchette, il faudrait réaliser des économies de carburant au moins égales à ce montant [169]. On s'attend à des améliorations équivalentes des coûts d'exploitation, ce qui permettrait aux compagnies aériennes de doubler les coûts de maintenance d'un système turboélectrique [51]. Néanmoins, les prix réels sont difficiles à prévoir car les appareils nécessaires n'existent pas encore. Le coût global pour les compagnies aériennes de la propulsion turboélectrique devrait être plus élevé que celui des moteurs à combustion fonctionnant au kérosène, notamment en raison de l'immaturité de la technologie et de la redondance des technologies à transporter en vol [51].

Machines électriques et conditionnement de l'énergie

Les concepts de propulsion turboélectrique (valable également pour les systèmes hybrides ou totalement électrique!) dépendent fortement des progrès réalisés dans les technologies des systèmes d'alimentation électrique des avions [166]. Ces technologies comprennent les systèmes de générateur pour la production d'énergie électrique, l'électronique de puissance pour la conversion, les moteurs, le conditionnement, et la distribution de l'énergie. Le stockage, via les batteries, a été discuté dans la section précédente.

Une discussion et analyse approfondie des technologies de l'énergie électrique embarquée des avions et des défis associés, qui sont essentiels pour permettre les concepts de propulsion électrique au niveau de la technologie présente à bord des avions, sortent du cadre de ce travail. Néanmoins, des études approfondies sur ces sujets sont nécessaires et deux de ces enjeux et challenges particulièrement critiques vont donc être résumés brièvement.

Électronique de puissance L'électronique de puissance joue déjà un rôle clé pour les systèmes d'alimentation électrique des avions et ce rôle devient plus critique à mesure que ces systèmes d'alimentation font partie des systèmes critiques de propulsion, de l'ordre des MW . L'électronique de puissance est utilisée pour la conversion de l'énergie (y compris les entraînements des moteurs) et la distribution de l'énergie (protection des circuits). L'électronique de puissance au carbure de silicium (SiC) permet de produire la puissance nécessaire (MW) des avions grâce à son efficacité améliorée et à ses caractéristiques de performance à haute tension par rapport à l'électronique de puissance actuelle à base de silicium. La puissance spécifique des systèmes électroniques de puissance à base de silicium est aujourd'hui d'environ $2,2 [kW/kg]$ pour les applications aéronautiques, et leur utilisation pour la protection des circuits est limitée à $25 A$ à $270 V DC$ ($7[kW]$)[166]. Il est prévu que dans 20 ans, les systèmes électroniques de puissance à base de SiC pour les applications aéronautiques auront une puissance spécifique de $9 [kW/kg]$.

Gestion thermique Un autre défi qui existe est la création d'un système de refroidissement performant qui puisse être utilisé. La gestion thermique des équipements électriques nécessitera un système capable de rejeter entre 50 et $800 [kW]$ de chaleur en vol [170]. De nouveaux matériaux devront être mis au point pour améliorer les performances thermiques tout en étant plus légers, pour assurer le refroidissement de l'électronique de puissance. La supraconductivité sera nécessaire pour réduire la résistance des dispositifs électriques, et ainsi réduire l'échauffement.

La capacité des avions à gérer la chaleur générée sera un facteur limitant pour les systèmes d'alimentation électrique de grande puissance nécessaires à la propulsion électrique. Le système de gestion thermique lui-même aura besoin d'énergie électrique pour fonctionner, et cette demande d'énergie devra être prise en compte en même temps que les demandes des autres systèmes d'alimentation (secondaires) non propulsifs. Les approches de la gestion thermique des systèmes de propulsion d'avions turboélectriques de l'ordre du MW n'ont pas été abordées en détail dans des études scientifiques à ce jour.

4.2.3 Hydrogène & hybride hydrogène-électrique

Une autre solution pour atteindre un vol moins émissif en polluants serait d'utiliser des avions hybrides (comme pour l'industrie automobile), en utilisant à la fois l'énergie thermique associée à la combustion ainsi que l'énergie électrique. L'UE a publié une définition de propulsion électrique hybride [171] : "*véhicule électrique hybride*" signifie un véhicule hybride qui, aux fins de la propulsion mécanique, tire son énergie des deux sources d'énergie stockées à bord du véhicule : un combustible consommable (par exemple de l'hydrogène) et un dispositif de stockage de l'énergie électrique (par exemple une batterie)." Cela représente en effet une stratégie de transition avant de pouvoir concevoir des avions entièrement durables en fonctionnant uniquement grâce à l'électricité ou l'hydrogène [100, 172]. De plus, des études actuelles prévoient une pénurie significative du kérosène dès 2026, si la tendance de croissance en terme de passagers et donc de demandes en kérosène continue [173]. Une architecture hybride, aménagée au sein d'un avion conventionnel, présente le potentiel de réduire la consommation en carburant tout en minimisant l'impact économique de remplacer entièrement une flotte [53].

Dans un système hybride en série, seuls les moteurs électriques sont reliés mécaniquement aux propulseurs. Ceux-ci étant mécaniquement découplés de la source d'énergie, soit la batterie, soit le carburant ou les deux peuvent fournir l'énergie à la propulsion à tout moment, favorisant un fonctionnement optimal en ce qui concerne le rendement. La turbine à gaz est utilisée pour entraîner un générateur électrique, dont la sortie entraîne les moteurs et/ou charge les batteries. Les systèmes hybrides en série sont compatibles avec les concepts de propulsion distribuée. L'inconvénient de cette topologie est que toute la chaîne de transmission électrique doit être dimensionnée au moins pour la puissance de propulsion totale [100]. Dans un système hybride en parallèle, un moteur alimenté par batterie et une turbine à gaz sont tous deux montés sur un arbre qui entraîne le propulseur, la turbine à gaz ne peut, dès lors, pas être opérée indépendamment du propulseur. Le principal avantage réside dans le fait que la partie électrique ne doit pas être dimensionnée pour l'entièreté de la puissance de propulsion. Ces deux systèmes sont représentés schématiquement sur la FIGURE 4.25.

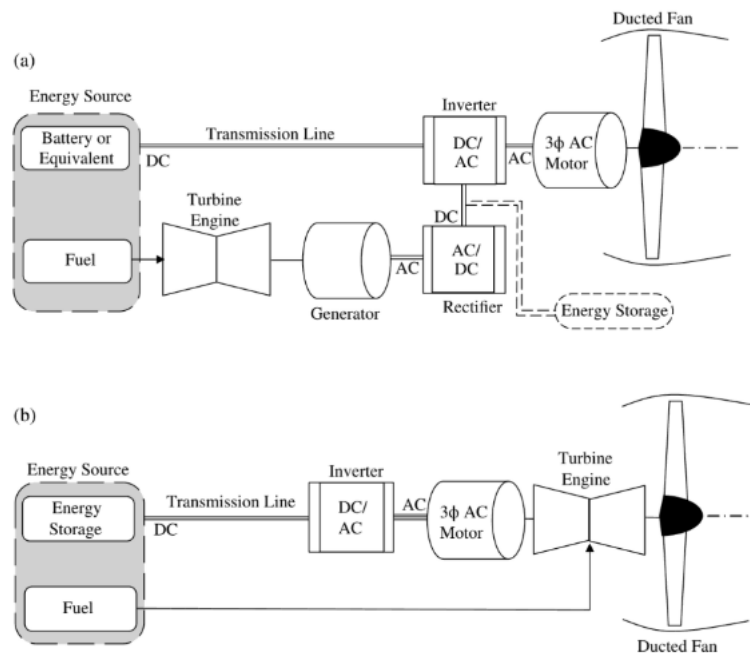


FIGURE 4.25 – Configuration d'une propulsion hybride en a) série et b) parallèle [64].

Le système hybride partiel série/parallèle comporte un ou plusieurs propulseurs qui peuvent être entraînés directement par une turbine à gaz ainsi que d'autres propulseurs, entraînés exclusivement par des moteurs électriques; ceux-ci pouvant être alimentés par une batterie ou par un générateur entraîné par une turbine [166]. Cela peut permettre d'optimiser le degré d'hybridation en fonction de chaque phase de vol. Aussi, le moteur

à combustion fait office de prolongateur de rayon d'action, et peut donc pallier au manque de technologies de pointe concernant les ATE.

Malgré l'augmentation de l'énergie totale requise due au système hybride et ses plus nombreux composants, la quantité de carburant brûlée pendant le vol et les émissions de gaz à effet de serre connexes sont réduites (lorsque la charge des batteries a lieu au sol avant le décollage) [174]. Toutefois, le poids des batteries joue un rôle important ici aussi. Le degré d'hybridation est également un paramètre essentiel, car le rendement des avions diminue fortement avec l'augmentation du taux d'hybridation en raison de la faible densité énergétique des batteries actuelles, ce qui rend les moteurs à combustion plus efficaces [50]. Seules l'introduction d'une technologie de système électrique avancée et l'amélioration de la densité énergétique des batteries de 500 à 600 % permettent de réduire de 5 % la consommation de carburant d'un avion électrique hybride type monocouloir (± 180 passagers) sur un vol de 1 700 km, dans le cas où l'électricité est issue de sources renouvelables [175].

Dans les avions électriques hybrides, les émissions globales de GES sont donc réduites. Les émissions de NO_X sont réduites grâce à la réduction de la température de pointe du moteur à combustion et à la diminution de la consommation de carburant. En outre, les émissions de CO_2 sur le cycle de vie peuvent être réduites en cas d'utilisation d'électricité renouvelable.

Du point de vue des coûts, la propulsion électrique hybride devrait être deux fois plus chère pour les compagnies aériennes, en termes d'investissements et de coûts d'exploitation, que les moteurs à combustion fonctionnant au kérosène, car les deux systèmes devraient être acquis et entretenus [51]. Un autre inconvénient majeur de la propulsion électrique hybride est l'augmentation du poids inhérent à l'ajout d'éléments constitutifs de la propulsion. Néanmoins, sans amélioration de la technologie des batteries, il est très peu probable que l'on puisse voler en mode purement électrique. Par conséquent, les solutions hybrides électriques peuvent jouer un rôle de manière significative dans la réduction des émissions de GES à plus court terme. La recherche scientifique est la clé permettant d'ouvrir la voie vers une nette amélioration de cette technologie, et plusieurs projets industriels en dépendent, comme les intentions d'Airbus d'alimenter ses futurs avions monocouloirs par une propulsion électrique hybride [118].

4.2.3.1 Hydrogène en tant que carburant

Le carburant utilisé dans l'industrie aéronautique doit présenter des caractéristiques et propriétés spécifiques à l'application, telles qu'une haute densité énergétique, une bonne atomisation, une évaporation rapide, d'excellentes caractéristiques de combustion, une faible viscosité, une bonne lubrification, un bas point de congélation, de bonnes propriétés thermiques et chimiques et, dans la mesure du possible, le plus faible impact sur l'environnement [176, 177]. Actuellement, le kérosène est le choix parfait, ses propriétés étant généralement très bonnes tout en étant le candidat le moins cher sur le marché [176].

Le TABLEAU 4.4 reprend et compare les différentes propriétés principales entre le kérosène (JET-A1) et l'hydrogène, potentiellement employable comme carburant pour l'aviation.

Comme on peut le constater, l'hydrogène pur ayant une densité d'énergie presque trois fois supérieure au kérosène, on aurait besoin d'une capacité moindre que celle du JET A1 pour effectuer un certain vol. Cependant, en phase liquide, le dihydrogène présente une densité d'énergie 4.13 fois plus petite que le kérosène [179], nécessitant de plus grands réservoirs que ceux du carburant pour un même trajet. La masse au décollage des avions longs-courriers alimentés à l'hydrogène liquide est tout de même réduite de 30%, ce qui rend cette alternative de propulsion particulièrement intéressante pour les vols à longue distance [180]. D'autre part, les avions court et moyen-courriers sont jusqu'à 18% moins efficaces sur le plan énergétique, car la réduction du poids du carburant en utilisant de l'hydrogène liquide ne peut pas compenser l'augmentation du poids et de la traînée causée par des réservoirs plus grands. La parité d'efficacité énergétique devrait être atteinte pour des distances oscillant d'environ 9000 km [181].

1. En fonction de la technologie de la chambre à combustion

Propriétés	Kérosène (Jet A1)	Hydrogène
Densité énergétique [Wh/kg]	100% (11900)	280% (33 300)
Poids	100%	36%
Volume des réservoirs	100%	430%
Masse maximale au décollage	100%	85%
Trainée	100%	110%
CO ₂ , SO, CO, HC	100%	0%
H ₂ O	100%	260%
NO	100%	5-25 ¹ %

TABLE 4.4 – Comparaison de certaines propriétés du kérosène et de l'hydrogène [178, 179].

Le produit du processus de combustion de l'hydrogène ne formerait quasiment que de l'eau (H_2O), étant donné que la vapeur d'eau produite absorbera une grande partie de l'énergie dégagée lors de la combustion, diminuant la température de la réaction et donc la formation de NO_x [182]. Néanmoins, la formation de vapeur d'eau à haute altitude créera (et amplifiera) la formation de traînées de condensation, participant au réchauffement climatique [181]. La FIGURE 4.26 compare le coût annuel cumulé des émissions, l'hydrogène profitant clairement de la baisse d'émissions de polluants.

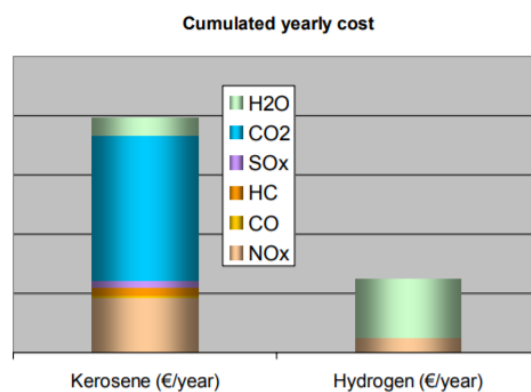


FIGURE 4.26 – Représentation comparative des coûts annuels cumulés des émissions du kérosène et de l'hydrogène [178].

L'hydrogène s'impose donc comme un candidat solide pour la transition vers une aviation décarbonisée, grâce à ses propriétés et caractéristiques intéressantes [183]. De plus, l'hydrogène est l'élément le plus simple et le plus abondant sur Terre, et est donc considéré comme source inépuisable, a contrario des carburants hydrocarbonés [184, 185].

En outre, les réacteurs à hydrogène devraient être dotés d'un équipement d'allumage plus simple, d'une température d'entrée de turbine inférieure et donc d'un coût de production et de maintenance moindre et d'une durée de vie plus longue [186, 187]. Aussi, le rayonnement d'énergie thermique créé par la combustion est jusqu'à 40°C plus faible pour l'hydrogène que pour le kérosène, ce qui réduit les besoins de refroidissement [187, 188]. Les propriétés chimiques de l'hydrogène entraînent également une capacité d'absorption de la chaleur plus élevée, ce qui permet d'utiliser le carburant plus efficacement pour le refroidissement des systèmes de l'avion [178].

L'hydrogène peut être décomposé en deux types d'utilisations distincts dans l'aviation, la première est l'utilisation de l'hydrogène comme carburant de remplacement au kérosène, et la seconde est l'utilisation en tant que réactif chimique avec l'oxygène dans une pile à combustible pour la production d'électricité [182].

Production Au cours de sa production, l'hydrogène doit être extrait de sa combinaison avec d'autres éléments, principalement des hydrocarbures tels que l'essence, le gaz naturel, le méthanol ou le propane. Bien qu'il

ne soit naturellement pas disponible pour une utilisation directe, l'hydrogène (ou plus spécifiquement le dihydrogène) peut être produit à partir de nombreuses sources différentes en utilisant une variété de méthodes qui permettent une production dans n'importe quel pays du monde [186]. Ces sources comprennent des matières premières telles que les ressources fossiles, c'est-à-dire principalement le gaz naturel ou le charbon réformé chimiquement à la vapeur, ou l'eau et la biomasse, qui sont transformées par électrolyse en utilisant des ressources énergétiques renouvelables comme énergie d'entrée [176, 189]. De même, certaines algues et bactéries qui effectuent la photosynthèse produisent du dihydrogène [185]. Un aperçu des deux méthodes les plus courantes d'obtention du dihydrogène est schématisé sur la FIGURE 4.27, où les émissions de CO_2 sont clairement représentées pour le cas du reformage. Plus de 90% de l'hydrogène produit aujourd'hui est généré par le reformage du gaz naturel en hydrogène et en dioxyde de carbone. Tout en répondant à la demande actuelle d'hydrogène industriel, l'efficacité globale de ce processus pour la production de carburants de transport devrait être remise en question car il convertit essentiellement un carburant en un autre et génère du dioxyde de carbone [190]. Il est donc essentiel, dans un but de décarbonation du transport aérien, de produire de l'hydrogène à l'aide d'énergies renouvelables pour ne pas *déplacer le problème ailleurs*.

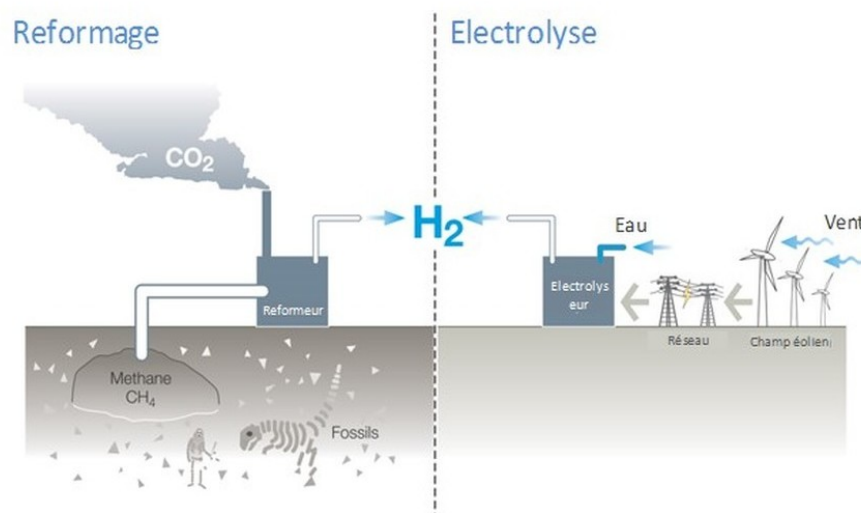


FIGURE 4.27 – Production de H_2 : représentation schématique comparative des processus de reformage et de l'électrolyse à l'aide d'énergies renouvelables [191].

Challenges En raison des contraintes de poids et de volume des avions, il est difficile de stocker, de produire et d'utiliser efficacement l'hydrogène à bord. Le stockage de l'hydrogène liquide nécessite un volume environ quatre fois supérieur au kérosène, et l'hydrogène doit être refroidi à $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour être disponible à l'état liquide ($H_{2(l)}$) [179]. Cette gamme de température et de pression pose des exigences élevées quant à l'isolation thermique du réservoir et sa tenue mécanique, et nécessite dès lors des composants spéciaux capables de fonctionner dans de telles conditions. Les meilleures capacités d'isolation sont atteintes par les réservoirs cylindriques [192].

La nouvelle conception nécessaire pour les avions à hydrogène et leurs plus larges réservoirs exige des infrastructures de production et des procédés de fabrication innovants. Les constructeurs d'avions devront réaliser des investissements élevés et de nouvelles procédures de maintenance devront être établies. En outre, l'infrastructure d'approvisionnement en hydrogène liquide n'existe pas à grande échelle [193].

La sécurité est un aspect crucial à prendre particulièrement en considération dans le domaine de l'aviation, et particulièrement en utilisant du dihydrogène, gaz invisible et très inflammable, mais non toxique [194]. Les flammes issues de la combustion du H_2 sont invisibles, rendant la détection visuelle difficile en cas de feu. Les avions à hydrogène (appelés avions à carburant cryogénique) devront clairement répondre aux mêmes exigences de sécurité que les normes conventionnelles, mais les premières évaluations semblent optimistes [178].

En effet :

- Dans l'atmosphère libre, l'hydrogène s'élève rapidement. La zone de danger est donc faible s'il y a une fuite d'hydrogène.
- L'hydrogène brûlera à des concentrations nettement inférieures au seuil de détonation.
- L'hydrogène brûle rapidement, produisant un rayonnement thermique très faible.
- Les produits de combustion ne sont pas toxiques.

Les premières évaluations de sécurité semblent donc indiquer que les moteurs à hydrogène seraient au moins aussi sûrs que les moteurs à kérosène [194].

Ce qui est donc crucial, c'est de produire de l'hydrogène de manière durable et économiquement viable, sans nuire à l'environnement. Avec les nouvelles technologies de l'énergie, le solaire et l'électrolyse devraient devenir beaucoup plus efficaces et moins coûteux [192].

Piles à combustible hydrogène Les avions à piles à combustible sont des avions électriques qui produisent de l'électricité à partir de piles à combustible à hydrogène pour alimenter un propulseur électrique. Ces avions seraient donc ravitaillés en carburant plutôt que rechargés [178].

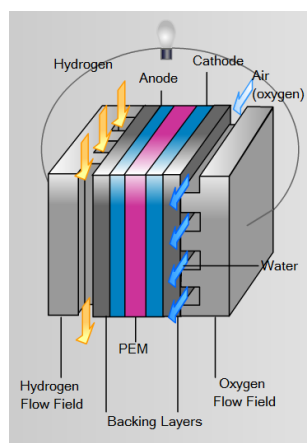


FIGURE 4.28 – Concept d'une pile à combustible hydrogène [195].

Une pile à combustible à hydrogène (H_2) est un dispositif électrochimique dans lequel l'hydrogène réagit avec l'oxygène et produit de l'électricité [183]. Une pile PEM (Proton Exchange Membrane, FIGURE 4.28) utilise l'hydrogène et l'oxygène (O_2) comme combustibles. En raison de l'absence de combustion, la vapeur d'eau sera le seul GES émis. En effet, les produits de la réaction dans la cellule sont l'eau, l'électricité et la chaleur. Il s'agit d'une amélioration considérable par rapport aux moteurs à combustion interne, aux centrales électriques au charbon et aux centrales nucléaires, qui produisent tous des produits nocifs. Comme l'oxygène est abondant dans l'atmosphère, il suffit d'alimenter la pile à combustible en hydrogène. [195]. Le H_2 va entrer dans la pile à combustible à l'anode. Ce gaz est forcé par la pression à travers un catalyseur. Lorsqu'une molécule d' H_2 entre en contact avec le catalyseur, elle se divise en deux ions H^+ et deux électrons e^- . Les électrons sont conduits à travers l'anode, où ils se fraient un chemin à travers le circuit externe (en faisant fonctionner le propulseur électrique) et retournent du côté de la cathode de la pile à combustible où, le O_2 forme deux ions d'oxygène en se réduisant à l'aide des électrons libérés. Chacun de ces ions chargés négativement vont attirer les deux ions H^+ à travers la membrane (PEM), où ils se combinent à la cathode afin de former une molécule d'eau [178, 195].

Tout au long du processus, les piles à combustible convertissent le combustible en électricité avec un rendement (de 40 à 70%) nettement supérieur à celui des moteurs à combustion (de 30 à 50%) [176, 196, 197, 198]. L'un des inconvénients des piles à combustible est leur coût élevé et leur durabilité limitée en raison de l'abrasion de leurs membranes [183]. D'autre part, les piles à combustible comportent moins de pièces rotatives et réduisent donc les coûts de maintenance [198]. Néanmoins, le remplacement d'un moteur à réaction par une pile à combustible comme principal générateur de puissance propulsive est considéré comme peu probable en raison de leur plus faible densité de puissance (50 [W/kg]) et densité énergétique (450 [Wh/kg]) atteignables [199].

4.2.4 Résumé

L'aviation complètement décarbonisée ne peut se réaliser qu'à l'aide d'ATE, en produisant l'électricité pour la production et la recharge des batteries uniquement à l'aide d'énergies renouvelables. Bien que la technologie électrique ne soit pas prête à remplacer les types d'avions les plus utilisés actuellement, à savoir les avions à couloir unique et à couloir double, elle présente tout de même encore plusieurs avantages par rapport aux turbines à gaz. Tout d'abord, une nouvelle configuration de la conception des moteurs est possible, laissant plus de liberté au design et à l'optimisation de l'efficacité. Ensuite, les moteurs électriques maintiennent les performances de propulsion à des altitudes plus élevées où les moteurs à combustion ne sont pas aussi efficaces [170]. Ainsi, moins de puissance serait nécessaire pour atteindre des vitesses comparables.

Il est donc possible d'apporter des changements novateurs grâce à l'architecture de la propulsion électrique et ses composants, permettant par exemple d'appliquer le principe d'une propulsion électrique distribuée en utilisant plusieurs petits propulseurs. C'est, d'une part, plus complexe et plus difficile à intégrer dans le fuselage et cela augmente la complexité du système de propulsion [51, 168]. Mais, d'autre part, cela permet un décollage et un atterrissage plus courts, des moteurs plus légers et plus silencieux, une redondance accrue (donc une plus grande sécurité), une efficacité améliorée et une réduction des investissements grâce à des volumes de fabrication plus importants et à une maintenance simplifiée du fait de la simplicité du moteur électrique [54, 55, 168].

La propulsion distribuée joue un rôle important pour améliorer la compétitivité de la propulsion électrique hybride, car avec ce concept, les synergies entre le fuselage et les systèmes de propulsion peuvent être améliorées [50]. Ce concept est majoritairement accepté par la communauté scientifique à ce sujet, comme en témoigne l'image de fond utilisée lors de la conférence *E²FLIGHT CONFERENCE STUTTGART 2020* et le modèle associé réalisé en miniature, repris aux FIGURES 4.29 et 4.30.



FIGURE 4.29 – Affiche du concept d'une propulsion électrique distribuée - *E²FLIGHT Conference Stuttgart 2020*.



FIGURE 4.30 – Modèle du concept d'une propulsion électrique distribuée - *E²FLIGHT Conference Stuttgart 2020*.

4.3 Performances

Pour déterminer si un avion électrique ou hybride présente un potentiel viable quant à la réduction des émissions de carbone, trois aspects principaux doivent être considérés : l'avion doit posséder un rayon d'action suffisant pour effectuer la majorité des vols d'une catégorie d'avions conventionnels similaires, il doit être en mesure d'effectuer ses vols en rejetant moins de polluants dans l'atmosphère (et idéalement, aucun) et le tout en coûtant moins à l'exploitant (la compagnie aérienne) [53]. Une étude comparative de l'autonomie sera abordée dans cette section. Les émissions de GES et leurs coûts associés seront étudiés dans le CHAPITRE 5.

4.3.1 Paramètres et notations

- e_b : densité d'énergie de batterie, unité convertie de $[Wh/kg]$ en $[J/kg]$ ($1Wh = 3600J$)
- e_c : densité d'énergie de carburant consommable (hydrogène ou kérosène), unité convertie de $[Wh/kg]$ en $[J/kg]$
- P : puissance disponible $[W]$
- $\frac{L}{D}$: finesse (design) $[/math]$
- η_p : efficacité ou rendement de la propulsion $[/math]$
- η_i : rendement dû aux pertes liées à l'intégration de la propulsion $[/math]$
- η_{th} : rendement thermique du moteur $[/math]$
- η_e : rendement total du système de propulsion électrique $[/math]$
- η_o : rendement d'ensemble $[/math]$
- η_T : rendement de la turbine à carburant du modèle hybride $[/math]$
- $PSFC$: consommation de carburant spécifique en fonction de la puissance $[kg/J]$
- m_c : masse de carburant $[kg]$
- m_b : masse des batteries $[kg]$
- m_{vide} : masse à vide de l'avion $[kg]$
- m_p : masse des passagers et cargaisons $[kg]$
- m_{TO} : masse de l'avion au décollage $[kg]$
- $\dot{m}_0$: débit d'air en amont de l'avion $[kg/s]$
- $\dot{m}_0$: débit d'air en sortie du système de propulsion $[kg/s]$
- $\dot{m}_c$: débit de carburant $[kg/s]$
- g : la constante d'accélération gravitationnelle $[m/s^2]$

La poussée d'un système de propulsion (type *air-breathing*) est définie comme suit :

$$T = \dot{m}_e \cdot V_e - \dot{m}_0 \cdot V_0 \simeq \dot{m}_0 \cdot (V_e - V_0)$$

où V_e et V_0 sont respectivement les vitesses en amont et en sortie du système de propulsion. L'avantage principal d'un propulseur à hélices est son rendement de propulsion élevé, car $\dot{m}_0$ est élevé et donc $(V_e - V_0)$ est faible (moins d'énergie cinétique perdue). Cependant, le principal inconvénient est la limitation de la vitesse de vol en raison de l'effet de compressibilité sur les pales (produisant une traînée d'ondes à haute vitesse subsonique : formation de chocs à l'extrémité des pales), limitant leur diamètre et donc $\dot{m}_0$.

4.3.2 Rayon d'action - détermination de l'autonomie

L'équation de Breguet permet de déterminer le rayon d'action (RA) des avions conventionnels (alimentés au kérosène) où l'avion est initialement dans les conditions de vol de croisière, réservoirs pleins. Il s'agit donc de la distance qu'il franchirait en palier jusqu'à épuisement du carburant. Ce concept offre l'avantage de fournir les tendances du rayon d'action avec divers paramètres. Il est défini comme suit [200] :

$$RA = V \cdot t = V \cdot \frac{L}{D} \cdot I_{sp} \cdot \ln \left(\frac{m_i}{m_f} \right) \quad (4.2)$$

Où V est la vitesse de croisière $[m/s]$, t est le temps de vol $[s]$, I_{sp} est l'impulsion spécifique (design) $[s]$, m_i et m_f sont respectivement la masse initiale et finale de l'avion $[kg]$.

4.3.2.1 ATE

Pour un avion alimenté uniquement sur batteries de type Li-ion ou Li-S et de puissance P_b [W], la masse de l'avion ne diminue pas au fur et à mesure du vol (il n'y a pas de kérosène consommé), l'équation (4.2) n'est dès lors plus valable et il faut en dériver une autre forme.

Le temps de vol peut s'exprimer :

$$t = \frac{m_b \cdot e_b}{P_b} \quad (4.3)$$

Avec

$$P_b = \frac{T \cdot V}{\eta_o} = \frac{\dot{m}_o \cdot (V_e - V_0)}{\eta_o} = \frac{V \cdot D}{\eta_o}$$

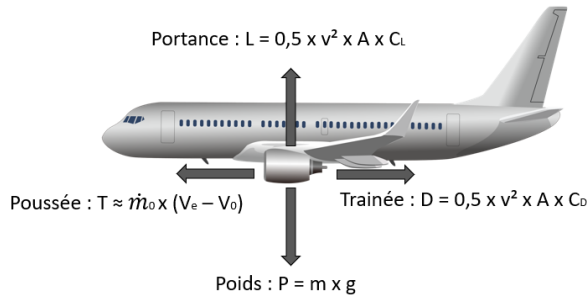


FIGURE 4.31 – Représentation simplifiée et schématique de l'équilibre des forces en vol d'un avion conventionnel.

La FIGURE 4.31^a illustre de manière simplifiée l'équilibre des forces d'un avion en croisière. La portance L est nécessaire pour contrecarrer le poids P , où m est la masse totale de l'avion et g l'accélération de la gravité terrestre. La force de portance est principalement créée par l'écoulement de l'air autour des ailes (surface de l'aile A , coefficient de portance C_L et ρ , la densité de l'air), pour laquelle un mouvement relatif de vitesse v de l'air est nécessaire. Cependant, cette vitesse provoque également une trainée, D , où C_D est le coefficient de trainée.

^a. image issue de pngtree.com

La poussée créée par les moteurs est nécessaire pour contrecarrer la trainée et réussir à maintenir la portance nécessaire à une vitesse de croisière donnée. En assumant un vol en croisière et donc établi, la trainée est égale à la poussée, et la portance est égale au poids. Nous avons également que $\eta_o = \eta_e \eta_p \eta_i$. On peut donc écrire que :

$$D = \frac{m_{TO} \cdot g}{\frac{L}{D}} \quad (4.4)$$

Pour ensuite obtenir :

$$P_b = \frac{V \cdot g \cdot m_{TO}}{\eta_o \cdot \frac{L}{D}} \quad (4.5)$$

Du coup, la vitesse de croisière peut être déterminée :

$$V = \frac{P_b \cdot \eta_o \cdot \frac{L}{D}}{m_{TO} \cdot g} \quad (4.6)$$

Dès lors, nous pouvons obtenir le RA pour un ATE à masse constante en injectant (4.3) et (4.6) dans (4.2) :

$$RA_b = \frac{m_b \cdot e_b \cdot \eta_o \cdot \frac{L}{D}}{g \cdot m_{TO}} \quad (4.7)$$

En faisant les hypothèses de considérer un ATE ayant une finesse de 20 (type 737), un rendement de transport et distribution d'électricité d'environ 93% [201], un rendement de charge de batteries à 95 % (typique des batteries Li-ion [202]) et une efficacité énergétique du système de propulsion de 85% [203], la combinaison de ces pertes

se traduit par une efficacité (rendement d'ensemble) de 75%. Le RA en croisière peut dès lors être calculé et le résultat obtenu est représenté à la FIGURE 4.32 pour différentes densités d'énergie et différents rapports de masse entre celle de la batterie et celle de l'avion brut.

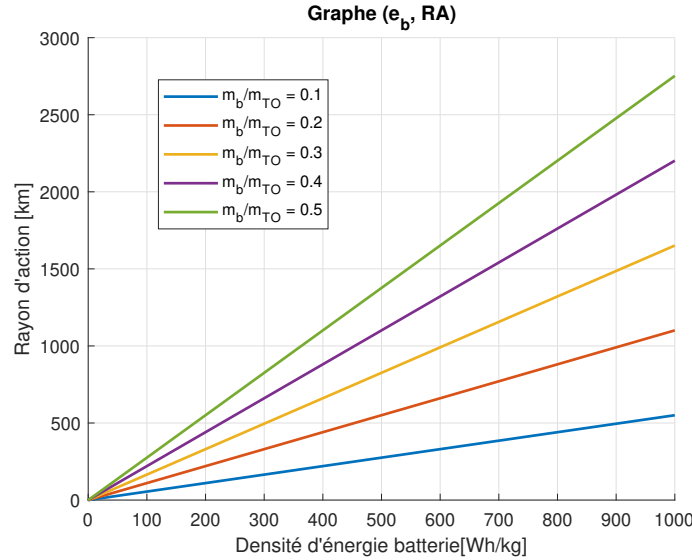


FIGURE 4.32 – Graphe (rayon d'action, densité d'énergie) pour un avion totalement électrique.

Cependant, l'éq. (4.7) n'est valable que dans le cas d'utilisation de batteries dont la masse ne varie pas pendant la décharge. Pour une technologie de batterie où la masse augmente pendant l'utilisation (par exemple, Li-air), la variation de masse [kg/s] peut s'obtenir en reprenant l'éq. (4.3) : $\frac{dm}{dt} = \frac{k \cdot P_b}{e_b}$ où k est le rapport de la masse d'oxygène gagnée sur la masse de la batterie. Dès lors, en injectant l'éq. (4.5) nous obtenons :

$$dm = \frac{k \cdot V \cdot g \cdot m_{TO} \cdot dt}{e_b \cdot \eta_o \cdot \frac{L}{D}}$$

Le gain en masse s'obtient donc en intégrant cette équation :

$$\ln \left(\frac{m_f}{m_i} \right) = \frac{k \cdot V \cdot g \cdot t}{e_b \cdot \eta_o \cdot \frac{L}{D}}$$

Avec $m_i = m_{TO}$ et m_f les masses initiales et finales de l'avion. Sachant que $RA = V \cdot t$ (eq. (4.2)), et que $m_f = m_i + k \cdot m_b$ nous obtenons finalement pour un avion alimenté par des batteries Li-air gagnant en masse un rayon d'action de :

$$RA_{li-air} = \frac{\ln \left(1 + k \cdot \frac{m_b}{m_{TO}} \right) \cdot e_b \cdot \eta_o \cdot \frac{L}{D}}{k \cdot g} \quad (4.8)$$

On constate donc dans les éq. (4.7) et (4.8) que la vitesse de croisière n'a pas d'influence sur le RA d'un avion électrique, et donc que la contrainte de voler à vitesse réduite due aux effets de compressibilité ne présente pas de conséquences en terme de distance à parcourir. De plus, on constate bel et bien l'importance de la densité énergétique des batteries (e_b) concernant l'autonomie des avions, ainsi que celle du poids de la batterie (par rapport à celle de l'avion, qu'on veut minimale), du coefficient de portance et de traînée (la finesse est à optimiser via le design de l'avion) et du rendement d'ensemble (à optimiser, mais meilleur dans un avion à propulsion électrique que hydrocarbonée, cfr. FIGURE 4.12).

Cependant, concernant l'équation (4.8) (RA_{Li-Air}), il serait intéressant d'estimer la valeur du paramètre

$$k = \frac{\text{masse d'oxygène supplémentaire}}{\text{masse de la batterie}} = \frac{m_{ox}}{m_b}$$

En faisant l'hypothèse d'employer un avion de type B737/A320 ($\simeq 150$ -180 passagers), effectuant un vol de croisière d'une heure, il consommera environ 2.5 tonnes de kérosène [204]. En faisant ensuite la simulation de remplacer simplement le kérosène par un pack de batteries type Li-air, en assumant tout autre paramètre de vol comme constant (même efficacité, même fuselage, besoin en énergie identique, etc.), et sachant que la densité énergétique d'un ensemble de batteries Li-Air serait à la valeur maximale théorique de 2000 [Wh/kg], soit 6 fois moins que le kérosène, il faudrait donc 15 tonnes de batteries, la demande en puissance serait donc de 30 000 [kWh]. De plus, la capacité spécifique théorique d'une telle batterie est de 3840 [Ah/kg]. Sur base du fait que, chaque seconde, dans un courant d'un Ampère, 6.10^{18} électrons se déplacent [205] et que la réaction prenant place dans un tel type de batterie est, pour rappel, $2Li_{(s)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} + H_2O_l \rightarrow 2LiOH$ (électrolyte aqueux, plus avantageux), la consommation en O_2 de l'avion pour l'heure de croisière est donc estimée à :

$$6.10^{18} \cdot 0.25 \cdot 3600 \cdot 3840 \cdot 15000 = 3.11 \cdot 10^{29} \text{ molécules d}'O_2.$$

Ou, de manière équivalente,

$$\frac{3.11 \cdot 10^{29}}{6.02 \cdot 10^{23}} \cdot 32[g/mol] = 16530[kg] \simeq 12200[m^3] \text{ d'oxygène}(O_2)$$

Ces 12 200 [m^3] seront utilisés par les batteries pendant le vol. D'ailleurs, Christensen et Al. [133] estiment qu'il faut un réservoir de 75[L] pour 140 [kWh] d'énergie consommée, ce qui corrobore les résultats obtenus. Le k ainsi obtenu vaut 2.6.

Sachant que des réservoirs de 10 [m^3] pèsent environ 70 [kg]², il faudrait prévoir une masse à bord supplémentaire totale de 85 tonnes. On voit donc bien que ce type de technologies de batteries n'est pas envisageable pour une utilisation sur avion, où il est nécessaire d'utiliser l'oxygène embarqué, et non en le tirant de l'extérieur comme ce serait le cas pour une voiture, par exemple. De plus, comme on peut le voir sur la FIGURE 4.33, même en négligeant la masse de réservoir supplémentaire requise, l'autonomie est moindre via l'utilisation d'une batterie Li-Air. Pour réaliser un vol en croisière de 1000 [km], il faudrait une densité énergétique presque 1.5 fois supérieure en utilisant une batterie Li-air. Ces calculs, bien que basés sur des hypothèses, démontrent l'importance de créer un système de batteries Li-air capable d'utiliser l'oxygène de l'atmosphère plutôt que de le stocker à bord (ce qui représente une difficulté majeure dans des avions à moteurs électriques), même si les résultats pourraient être améliorés avec un matériau plus léger pour le réservoir (par exemple en fibre de carbone) ou une pression plus élevée (et donc un plus petit volume de réservoir). De plus, avoir un réservoir d'oxygène sous pression peut présenter des risques pour la sécurité. La FIGURE 4.34 compare le RA entre un avion alimenté au kérosène et en batterie Li-S (1000[Wh/kg]), en fonction du rapport massique entre la source d'énergie (batterie ou kérosène) et le poids de l'avion.

2. https://industrie.airliquide.fr/sites/industry_fr/files/2016/06/24/gamme-bouteilles_air-liquide-france-industrie_4310879549933597796.pdf

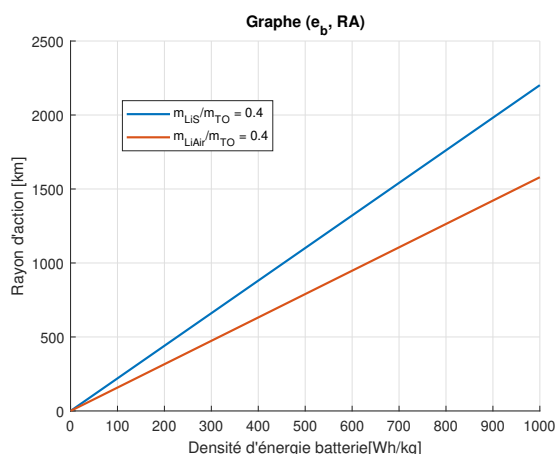


FIGURE 4.33 – Graphe du rayon d'action, batteries Li-S vs Li-air.

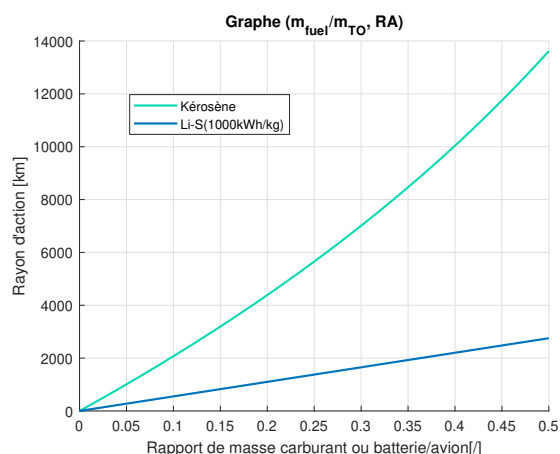


FIGURE 4.34 – Graphe du rayon d'action, kérosène vs Li-S (1000[Wh/kg]).

4.3.2.2 Avion hybride

Les avions peuvent être classés en fonction du degré d'hybridation de leur puissance (H_P) et, plus communément, de leurs sources d'énergie (H_E), ce qui permet d'établir l'équation du rayon d'action adaptée à un cas général. Un avion hybride électrique est un avion où l'énergie est fournie exclusivement par l'électricité, mais où l'électricité est produite par une turbine (alimentée au kérosène ou à l'hydrogène) avec générateur ou par un bloc de batteries. L'autonomie d'un avion hybride sera toujours plus grande lorsque le carburant consommable (kérosène, hydrogène) sera utilisé avant l'énergie des batteries, ayant généralement un poids fixe.

$$H_P = \frac{P_{me}}{P_{total}} \quad (4.9)$$

Et

$$H_E = \frac{E_b}{E_{total}} \quad (4.10)$$

Où P_{me} est la puissance des moteurs électriques et E_b est l'énergie fournie par les batteries (E_{total} est la somme des énergies fournies par le carburant combustible (hydrogène ou kérosène : E_c) par les batteries). Les systèmes de propulsion hybrides parallèles ou partiellement série/parallèle offrent le plus haut degré de liberté concernant le design, comme représenté sur le TABLEAU 4.5.

Topologies	H_P	H_E
Conventionnel (réacteurs thermiques)	0	0
Totalement électrique	1	1
Turboélectrique	1	0
Hybride série	1	[0;1]
Hybride parallèle	[0;1]	[0;1]
Hybride série/parallèle	[0;1]	[0;1]

TABLE 4.5 – Gamme d'hybridation pour les différents systèmes de propulsion électriques.

Le résultat a déjà été déterminé notamment par Brelje [206] et Elmousadik et al. [207]. Celui-ci est repris à l'équation (4.11).

$$RA_h = \frac{L}{D} \cdot \frac{\eta_o}{g} \cdot \frac{1}{PSFC} \cdot \log \left(\frac{((1 - H_E) \cdot e_b \cdot PSFC + H_E) \cdot m_{TO}}{H_E \cdot m_{TO} + (1 - H_E) \cdot e_b \cdot PSFC \cdot (m_p + m_{vide})} \right) + \frac{L}{D} \cdot \frac{\eta_o}{g} \cdot \left(\frac{H_E \cdot e_b \cdot \left((1 - \frac{m_{vide}}{m_{TO}}) \cdot m_{TO} - m_p \right)}{H_E \cdot m_{TO} + (1 - H_E) \cdot e_b \cdot PSFC \cdot (m_p + m_{vide})} \right) \quad (4.11)$$

En effet, comme représenté à la FIGURE 4.35, avec un degré d'hybridation très faible ($H_E = \epsilon = 0.2$) on divise déjà par deux le RA comparable aux avions conventionnels de même catégorie (dans ce cas, TBM 700, 6 places). De gros progrès restent donc à réaliser dans l'amélioration du fuselage, de l'aérodynamisme, etc.

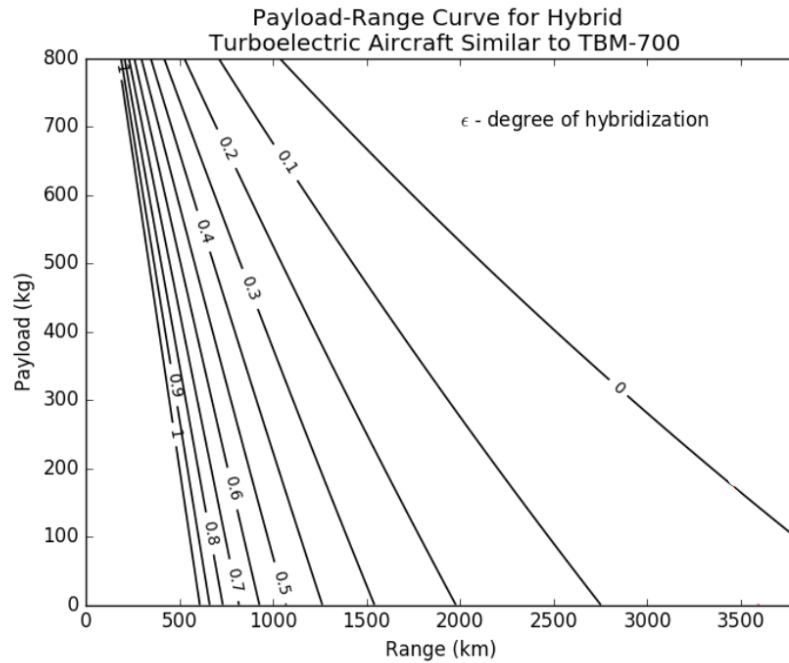


FIGURE 4.35 – Graphe du rayon d'action en fonction de la charge utile pour un TBM 700 hybride, adapté de [206].

4.4 Conclusion

En prenant l'exemple d'H55 et de leur ATE vu à l'introduction de ce chapitre, il est donc possible à présent de justifier leur choix de rénover un avion bi-place à moteur à combustion interne par un moteur électrique alimenté par batteries. En effet, cette technologie présente une maintenance simplifiée, des vols moins coûteux, moins d'émissions et un meilleur rendement. Cependant, comme on a pu le voir, la technologie des batteries, en particulier leur densité énergétique, n'est pas, à l'heure actuelle, suffisamment développée pour permettre cette transition sur les avions type B737. En effet, plus un avion électrique est grand et rapide, plus il a besoin de batteries et plus la part de son poids que représentent ces batteries est importante. Le problème sous-jacent est le même pour tout objet en mouvement : la traînée d'un véhicule augmente proportionnellement au carré de la vitesse. Si la vitesse est doublée, la traînée est multipliée par quatre. Dans un avion relativement lent, comme un avion d'entraînement tel que celui d'H55, l'aviation électrique est un choix actuel pertinent, mais il faudra des années avant que les batteries aient une densité d'énergie suffisante pour alimenter des avions qui sont nettement plus rapides et plus lourds que ce genre de modèle.

En effet, les meilleures cellules de batterie Li-ion disponibles aujourd'hui ont une densité d'énergie d'environ 250 [Wh/kg]. Dans l'hypothèse d'un rendement d'ensemble de 80 %, la densité d'énergie de l'ensemble représenterait environ 200 [Wh/kg] et 1,8 % du contenu énergétique du kérosène. Cette batterie serait capable d'alimenter des taxis aériens électriques de 1 à 4 passagers, ou des drones de fret cargo [208], sur des distances de plus de 100 km. Cependant, les avions électriques à courte distance exigent des batteries possédant une densité d'énergie de 750 à 2 000 [Wh/kg], ce qui se traduit par 6 à 17 % du contenu énergétique du kérosène, selon la taille et l'autonomie de l'avion. Une grande partie de la multiplication par 4 à 10 de la densité énergétique des batteries pourrait être obtenue grâce à la technologie avancée Li-S, bien que les batteries Li-air pourraient être nécessaires. Ces deux technologies de batteries ont une faible puissance spécifique, de telle sorte qu'une batterie supplémentaire de forte puissance ou un autre moyen d'augmenter la puissance pourrait être nécessaire pour le décollage et la montée. Le taux d'augmentation de la densité énergétique des principaux types de batteries est d'environ 3 % par an, soit un doublement tous les 23 ans, malgré que depuis 2000, l'énergie spécifique ait augmenté à un taux de 4 % par an. cette observation suggère qu'une énergie spécifique de 800 [Wh/kg] pour les batteries pourrait être potentiellement atteinte vers 2050.

En attendant que la technologie de propulsion entièrement électrique arrive à maturité, des solutions électriques hybrides, qui fonctionnent dans les avions selon le même principe que dans les voitures, peuvent être envisagées. Un petit moteur à combustion interne tournant à un régime optimal pourrait être employé pour recharger la batterie et maintenir la vitesse de croisière. En outre, le fait de compter sur le moteur électrique pour le décollage évite la pollution sonore aux riverains d'aéroports.

Chapitre 5

Étude comparative des coûts

Les différents engagements internationaux de l'industrie aéronautique en matière de protection de l'environnement impliquent une réduction drastique des émissions dans un avenir proche. Pour atteindre ces objectifs ambitieux, les développements de nouveaux systèmes de propulsion pour les avions émergent, notamment avec des systèmes de propulsion à hydrogène, hybrides, ou entièrement électriques. Outre la faisabilité technique de tous ces concepts, abordée au CHAPITRE 4, l'impact des coûts de ces avions pour les compagnies aériennes doit être étudié afin d'estimer la durabilité économique de tels avions. En effet, il faut soutenir la mobilité aérienne en contribuant à un développement économique mondial le plus durable possible. Or, le volet des coûts n'est que superficiellement abordé dans la littérature ; "*une analyse économique (d'une aviation électrique hybride, turboélectrique ou totalement électrique) reste un défi à relever*" [104]. Le but de ce chapitre est donc d'établir et de développer un modèle permettant d'estimer et de comparer les coûts des différents avions à propulsion totalement électrique et à hydrogène (les deux options n'émettant aucune émission de carbone en vol) avec les avions conventionnels à combustion de kérosène.

Afin de pouvoir établir les indicateurs économiques et de les comparer, une méthode de calcul de coûts va être développée. Aussi, une nouvelle catégorie de coûts, celle des batteries remplaçant le carburant comme source de stockage d'énergie, va être introduite et étudiée à l'aide du concept de LCOE (*Levelized Cost Of Energy*).

Dans les comparaisons qui suivent, toutes les valeurs monétaires sont exprimées en euros (€). La conversion des dollars américains (USD) (valeur de référence en aviation) en euros a été effectuée à la valeur de $1\text{USD} = 0.91\text{€}$ [MARS 2020].

5.1 Coûts des émissions de GES

Depuis l'intégration du secteur de l'aviation dans le Système communautaire d'échange de quotas d'émission (EU ETS) en 2012, les compagnies aériennes enregistrées dans les pays participants doivent déclarer leurs émissions de GES et acheter des quotas d'émission. Le EU ETS fonctionne en exigeant des compagnies aériennes qu'elles restituent des quotas (permis d'émission) égaux à leurs émissions totales. Plus une compagnie aérienne émet, plus elle doit restituer de quotas. Le but étant d'inciter les compagnies aériennes à réduire leurs émissions.

Toutefois, le prix actuel du EU ETS est inférieur à ce qui est nécessaire pour stimuler les réductions d'émissions dans le secteur. Le kérosène reste exonéré de taxe dans toute l'Europe, sauf pour les vols intérieurs aux Pays-Bas et en Norvège [11]. Cette exonération favorise encore la croissance des émissions dans le secteur. De fait, une taxe sur le kérosène fixée au minimum de 33 cents/litre dans l'UE pourrait contribuer bien davantage à la réduction des émissions, en permettant de récolter, au total, 9,2 milliards d'euros par an [209].

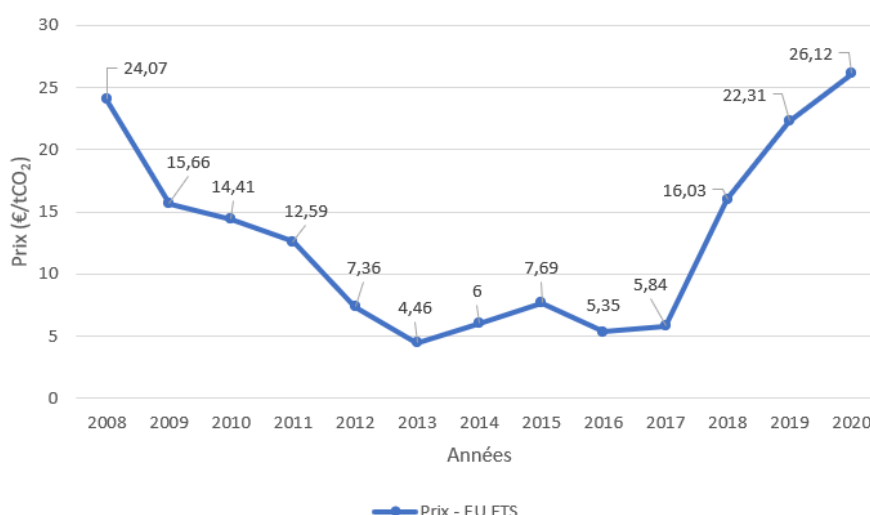


FIGURE 5.1 – Évolution du prix annuel moyen des quotas d'émission du EU ETS, données issues de [210].

Le constat est que, après la mise en œuvre du système d'échange de quotas d'émission de l'UE, le prix des quotas d'émission a diminué de façon continue, comme représenté sur la FIGURE 5.1. Cela était principalement dû à une offre excédentaire de quotas d'émission gratuits. Les faibles prix entre 2012 et 2017 ont rendu le système inefficace. En 2019, la célèbre compagnie aérienne européenne à bas prix *Ryanair* était le dixième plus grand pollueur au niveau des émissions de GES dans le cadre du EU ETS, et se classe, en terme de pollution, à des niveaux comparables aux plus grosses centrales à charbon du continent [211]. Le transporteur a dû acheter des quotas pour 8,92 millions d'euros en 2013 et pour 20,5 millions d'euros en 2016.

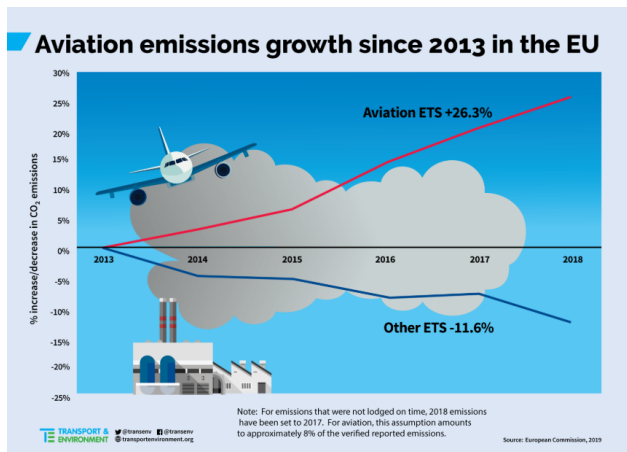


FIGURE 5.2 – Croissance des émissions de l’aviation depuis 2013 [209].

L’aviation est un émetteur de polluants croissant, à contrario de l’ensemble des autres émetteurs de carbone de l’UE. La FIGURE 5.2 montre que la hausse de 26,3 % enregistrée par le secteur de l’aviation est à mettre en parallèle avec la baisse de 11,6 % enregistrée par tous les autres secteurs combinés et couverts par le EU ETS entre 2013 et 2018, ce qui indique que l’aviation continue, année après année, à accroître sa part dans les émissions globales de l’UE, malgré la mise en place du système EU ETS. En effet, entre 1990 et 2016, les émissions totales de l’aviation dans l’UE sont passées de 1,5 % à 3,6 % [209].

Afin d’évaluer les coûts des futures technologies de propulsion alternatives, les hypothèses pour le développement des quotas d’émission de GES sont à prendre en compte, car les prix des émissions de GES continueront à augmenter au cours des prochaines décennies [212], d’après les estimations reprises à la FIGURE 5.3, impliquant une croissance des coûts pour les compagnies. En janvier 2020, le quota d’émission de carbone avait un prix de 26,12 [€/tCO_{2eq}], ce qui est déjà relativement proche du niveau prévu de 28€ en 2020. Les prix continueront à augmenter et, à partir de 2040, une hausse plus forte est même prévue en raison de l’objectif convenu de zéro émission de carbone en 2050, et une valeur de 150 € la tonne de CO₂ est estimée [212].

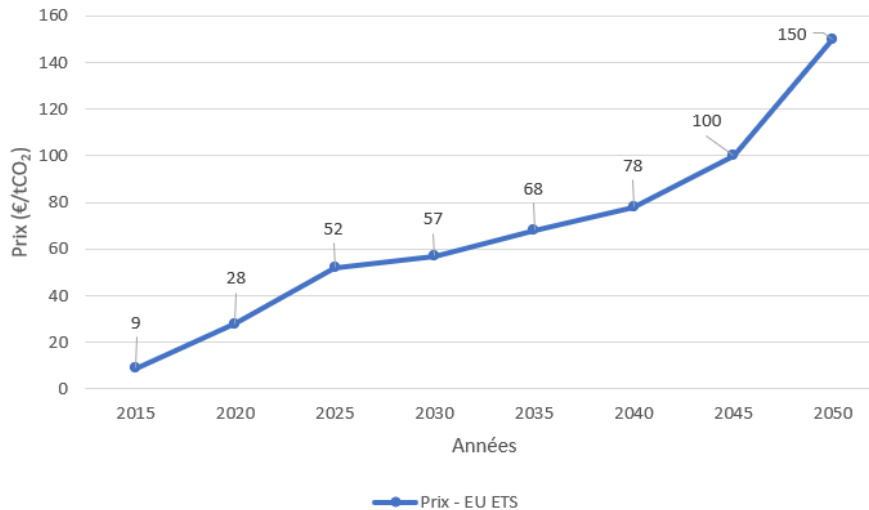


FIGURE 5.3 – Estimation de l’évolution du prix du quota d’émission de carbone [213].

La quantité d’émission de carbone (et le coût associé) d’un avion alimenté au kérosène, à l’électricité ou à l’hydrogène va être à présent estimé.

Systèmes de propulsion conventionnels

L'indice standard d'émissions de CO_2 pour le kérosène est de 3.15 [kg_{CO_2}] par kg de carburant [214]. Les émissions indirectes équivalentes "du puits à la pompe" pour le Jet-A1 sont estimées actuellement à 826,8 [$g_{CO_{2eq}}/kg$] [215]. Les émissions actuelles d'équivalents directs autres que le CO_2 (NO_x , sulfites, suie, vapeur d'eau et traînées de condensation) sont estimées à 2.52 [$kg_{CO_{2eq}}/kg$] [216]. Le coût des émissions reviendrait donc à 0.182 [€/kg] à l'heure actuelle, et 0.975 [€/kg] en 2050, selon les estimations prévues reprises à la FIGURE 5.3.

Avions totalement électriques

Dans l'ensemble, pour le principe de la propulsion électrique, l'énergie générée pour propulser l'avion provient de la charge des batteries. Cela permet de disposer d'une gamme de technologies de production d'énergie beaucoup plus large qui offre plus de possibilités et, potentiellement, un prix inférieur à la consommation de carburant. Le coût du carburant est donc, dans ce cas-ci, le prix de la production de l'électricité. Comme détaillé au CHAPITRE 4, l'intensité carbone de la production d'électricité en Europe est actuellement estimée en moyenne à 296 [g_{CO_2}/kWh]. De plus, les émissions de CO_2 associées à la production des batteries Li-S sont évaluées à 6 kg de CO_{2eq} par kg de batterie. Il a été estimé au CHAPITRE précédent que la masse des batteries ne pouvait pas représenter plus de la moitié de la masse maximale de l'avion au décollage, soit 35 tonnes pour un avion type B737. Cependant, afin d'atteindre zéro émission de GES en 2050, un approvisionnement en électricité 100 % renouvelable, souhaité, est supposé. Les prix de l'électricité issue de sources renouvelables varient en fonction de la méthode et de la région de production, ainsi que de la disponibilité globale et saisonnière des ressources pour l'utilisation combinée d'éoliennes et de panneaux photovoltaïques. Le coût moyen pondéré de l'électricité d'une telle production est de 0,05 [€/kWh] [217].

Avions hybrides alimentés à l'hydrogène

Le prix de l'hydrogène en tant que carburant varie considérablement en fonction des méthodes d'extraction et de production utilisées. Il a été démontré au CHAPITRE 4 que seule la production par électrolyse, en utilisant l'électricité issue de sources renouvelables, permet de réduire considérablement les émissions de polluants. Les méthodes d'électrolyse de l'eau à partir de l'énergie éolienne, hydroélectrique, géothermique et solaire sont donc considérées. Dans ces cas, la production de dihydrogène est réalisée en consommant environ 53 kWh par kg d'hydrogène [177]. Les seules émissions en vol sont donc de la vapeur d'eau (3.2 [$kg_{H_2O}/kg_{carburant}$] [14, 178]) et des oxydes d'azote (3 [$g_{NO_x}/kg_{carburant}$] [14]), dont les coûts des émissions sont respectivement estimés à 0.075 [€/kg] [216] et 22,568 [€/kg] [177].

5.2 Coûts d'achat et d'exploitation

Les principaux éléments de coûts attribués aux compagnies aériennes sont les coûts directs et les achats, à savoir les coûts relatifs à l'achat des avions et du carburant (énergie), à la maintenance, à la main-d'œuvre (équipage à bord) ainsi qu'aux taxes et services aéroportuaires [218]. Les coûts d'exploitation indirects (tels que les frais de matériels, de consommables, d'informatique, commerciaux, administratifs, etc.) sont négligés dans l'analyse étant considérés comme identiques, quelque soit le système de propulsion et donc du type d'avion étudié. En plus, ces derniers ne représentent qu'environ 27 % des frais totaux d'une compagnie aérienne [219].

5.2.1 Coûts en capitaux

Les coûts en capitaux sont des dépenses fixes et ponctuelles prévues pour l'achat d'équipements utilisés pour la production de biens ou la prestation de services, et doivent être déterminés et normalisés sur la période d'utilisation opérationnelle [220]. Par conséquent, il faut calculer le coût moyen pondéré du capital (CMPC) et le facteur de récupération du capital (FRC) [220]. Le CMPC est un indicateur du taux moyen qu'une entreprise paie pour financer ses actifs. En négligeant le taux d'impôt, tous les coûts du capital provenant de la dette et des capitaux propres sont pondérés proportionnellement en utilisant la formule suivante [221] :

$$CMPC = \frac{E \cdot k_E}{E + D} + \frac{D \cdot k_D}{E + D} \quad (5.1)$$

Avec E , fonds propres ; D , montant de la dette investie ; k_E , coût des fonds propres ; k_D , coût de la dette.

Le FRC est un ratio appliqué pour calculer la valeur actuelle nette d'une rente tirée d'un capital, qui est une série de flux financiers annuels égaux sur une période donnée. Le ratio est calculé de la manière suivante [222, 223] :

$$FRC = \frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \quad (5.2)$$

Avec i , le taux d'intérêt et n , le nombre de rentes (paiements) perçues. Le FRC estime les coûts en capitaux, constants et étalés sur l'année, intérêts compris ; ainsi, le taux d'intérêt peut être remplacé par le CMPC. En outre, les paiements sont considérés comme étant effectués annuellement pendant la durée de vie de l'avion (N). Dès lors :

$$FRC = \frac{CMPC \cdot (1 + CMPC)^N}{(1 + CMPC)^N - 1} \quad (5.3)$$

Afin de calculer un FRC le plus réaliste possible, le CMPC supposé et la durée de vie des avions sont des données importantes. Selon l'IATA, le CMPC pour les compagnies aériennes est en moyenne de 7 à 8 %, un CMPC de 8 % est donc pris en considération [224]. La durée de vie des avions fait l'objet d'une limite imposée par les constructeurs, mais est généralement inférieure en fonction des choix des compagnies aériennes, entre autres pour des questions de rentabilité. La durée de vie moyenne d'un avion donc de ± 30 ans [225]. Sur base de cela, le FRC suivant sera appliqué lors des calculs :

CMPC	%	8
Durée de vie	années	30
FRC	%.années	0.09

TABLE 5.1 – Résultat de calcul du FRC.

5.2.2 Coûts d'achat d'avions

Les dépenses d'investissement représentent l'argent qu'une entreprise utilise pour acheter, entretenir ou améliorer ses immobilisations, telles que des bâtiments, des véhicules ou du matériel [226]. Il s'agit donc de la valeur marchande d'achats de nouveaux avions. Dans le cas des avions électriques, il faut également prendre en considération l'investissement en batteries [227]. Les prix des avions à combustion, qui serviront de comparaison, sont issus des *best-seller* de Boeing, respectivement concernant le court/moyen et le long-courrier. Le prix d'un B737-800 (186 passagers, couloir unique, court à moyen-courrier) est estimé à 96,5 millions d'euros en janvier 2019 [228]. Concernant les avions à longs rayons d'action, un B777-300ER est estimé à 342 millions d'euros [228]. L'hypothèse que les avions électriques et à hydrogène soient vendus au même prix peut être envisagée, étant donné que le prix des batteries et du dispositif de stockage de l'hydrogène seront inclus dans le calcul du LCOE. De plus, les moteurs électriques et l'électrification générale de l'avion tendent à réduire le prix d'achat, mais les coûts liés à la recherche et au développement de l'avion, aux infrastructures nécessaires, etc., impliqueront une augmentation du coût d'achat. L'hypothèse d'un prix équivalent est donc jugée comme acceptable.

5.2.3 Coûts opérationnels directs

Les coûts opérationnels directs dépendent, dans la plupart des cas, du type d'avion et de leurs systèmes de propulsion. Les formules ou données permettant de les estimer vont être établies ci-dessous :

5.2.3.1 Énergie (carburant)

En Janvier 2020, le prix du kérosène (JET A-1) valait 0.63 [€/l] [229]. Le prix d'investissement dans la technologie d'électrolyse varie entre 1 et 6 [€/kW] [230]. Ce procédé consomme 5,2 [kWh/m³] d'électricité pour produire le dihydrogène [230]. L'hypothèse d'utilisation de 2,5 tonnes de kérosène pour un vol d'une heure implique une équivalence en hydrogène de 142 m³. Les différents prix et niveaux d'émissions moyens (type B737) des carburants étudiés dans ce document, basés sur diverses études, sont repris au TABLEAU 5.2.

Carburants	Émissions en vol [gCO ₂ /kWh]	Prix [€/kWh]
JET A-1	320	0.032
Hydrogène	0	0.135
Électricité	0	0.05

TABLE 5.2 – Comparaison du coût des émissions et de la consommation de carburant pour l'aviation. Données issues de [18, 177, 231, 232, 233, 234].

Calcul du coût actualisé de stockage de l'énergie Les frais économiques des différents types de stockage (batteries) vont être étudiées et comparées. Le coût actualisé de l'énergie (*LCOE - Levelized cost of energy*) représente le coût par kilowattheure de la construction et de l'exploitation d'une source d'énergie sur une durée de vie et un cycle d'utilisation supposés, et est défini de manière générale comme étant le rapport entre le coût total sur la durée de vie d'un investissement et l'énergie produite cumulée par cet investissement [235].

Formule Le $LCOE_b$ mesure donc la dépense globale pour la consommation d'un kWh d'électricité stocké dans une batterie, en tenant compte des coûts d'achat des batteries, d'opération et de maintenance tout en prenant en considération les caractéristiques techniques des batteries, et de leur utilisation. Tous ces aspects sont inclus dans la formule suivante, adaptée et dérivée sur base de différentes sources ([235, 236, 237, 238]) :

$$LCOE_b = \left(\frac{P}{C \cdot DoD \cdot n_c \cdot \sum_{n=1}^N \left(\frac{(1-n \cdot \eta_d)}{(1+cmpe)^n} \right)} \right) + \left(\frac{OM \cdot \sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{(1+cmpe)^n} \right)}{C \cdot DoD \cdot n_c \cdot \sum_{n=1}^N \left(\frac{(1-n \cdot \eta_d)}{(1+cmpe)^n} \right)} \right) + \frac{P_{elec}}{\eta} \quad (5.4)$$

Symboles & Hypothèses Les différents symboles et unités de l'équation (5.4) sont repris ci-après :

- $LCOE_b$: coût actualisé du stockage de l'énergie dans des batteries [€/kWh]
- P : prix des batteries incluant matières premières, fabrication et financement [€/kWh]
- n_c : nombre de cycles (durée de vie) de la batterie, pour la DoD estimée [/]
- η_d : dégradation de la capacité de stockage par an [/]
- η : rendement de la batterie [/]
- C : C-rate de la batterie¹ [/]
- DoD : profondeur de décharge² [/]
- N : durée d'utilisation de la batteries [années]
- $cmpc$: coût moyen pondéré du capital [/]
- OM : coûts d'opération et de maintenance, assumés comme constants [€/kW.an]
- P_{elec} : tarification de l'électricité pour recharger les batteries, assumé comme constant [€/kWh]

Les hypothèses employées pour réaliser ce calcul sont les suivantes :

- ✓ Les batteries seront utilisées maximum un an sur l'ATE.
- ✓ On considère une valeur résiduelle nulle pour chaque batterie.
- ✓ On considère un vol de deux heures, la batterie doit donc se décharger complètement sur ce temps-là ($C = 0.5$).
- ✓ On considère qu'un ATE effectue 3 rotations par jour (donc 3 cycles de charge et décharge), pendant un an.
- ✓ Les coûts d'opération et de maintenance des batteries Li-S et Li-air, pas encore commercialisées, sont donc supposés comme égaux à ceux des batteries Li-ion.
- ✓ Le coût moyen pondéré du capital pour la technologie Li-air est supposé identique à celui de la technologie Li-S (étant toutes deux des technologies en cours de développement).

Résultats La méthodologie choisie permet une évaluation rapide et efficace des différentes technologies de stockage, dans notre cas Li-air, Li-S et Li-ion. La comparaison, avec tous les paramètres du modèle recueillis auprès de différentes sources scientifiques, est présentée dans le TABLEAU 5.3.

Paramètres	Li-S	Li-air	Li-ion
C [/]	0.5	0.5	0.5
η_d [%]	7.2	25	3.7
n_c [cycles]	1500	200	4500
η [/]	0.85	0.9	0.8
DoD [/]	0.8	0.95	0.8
P [€/kWh]	180	230	1200
r [%]	5	5	3.5
OM [€/kWh]	9	9	9
P_{elec} [€/kWh]	0.03	0.03	0.03
LCOE [€/kWh]	0.376	1.864	0.759

TABLE 5.3 – Comparaison du LCOE pour différentes technologies de batteries, valeurs des paramètres issus de [117, 144, 152, 217, 235, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245].

Les résultats du LCOE concernant les différents types de batteries se basent sur différentes hypothèses, mais restent un indicateur qui représente les coûts impliqués dans l'utilisation d'un certain type de batteries sur leur

1. Le taux C-rate est une mesure de la vitesse à laquelle une batterie se décharge
 2. Rapport entre la capacité déjà déchargée et la capacité nominale en début de vie

durée de vie (dans ce cas-ci, sur un an). On remarque que pour un ATE, le choix qui semble le moins coûteux serait la technologie Li-S. Le LCOE élevé pour le cas Li-air provient du fait qu'en un an, et sur base des hypothèses, il faudra utiliser 4 batteries.

Le coût actualisé du stockage de l'hydrogène ($LCOH$), quant à lui, a déjà été calculé par Lahnaoui et al. [246], avec comme résultat un $LCOH$ de $2.7\text{€}/kg$, ou $0.08\text{€}/kWh$.

5.2.3.2 Maintenance

Concernant l'ATE, la présence d'un APU, de systèmes pneumatiques, hydrauliques et de tout système relatif à l'utilisation du kérosène ne sont plus requis, ce qui implique un impact positif en terme de réduction de temps et de frais de maintenance [227]. Cependant, il faut ajouter le générateur, et toute l'électronique nécessaire. Concernant les moteurs, les coûts d'opérations et de maintenance relatifs au propulseur (hélices/soufflante), tuyères et engrenages (boîte de vitesse) sont considérés comme étant égaux aux éléments de l'architecture des réacteurs thermiques [227]. Les coûts de maintenance des moteurs d'avions électriques sont donc estimés à $\frac{2}{3}$ de ceux de leurs homologues à combustion [227]; ces derniers étant estimé à $0.009\text{€}/passager/km$ [247, 248], en incluant les frais de main d'oeuvre et d'équipage. Ceux de la propulsion électrique reviendraient donc à $0.006\text{€}/passager/km$.

5.2.3.3 Équipage

Le personnel de cabine représente une grande partie de la valeur ajoutée des compagnies aériennes et donc la main d'oeuvre occupe une grande partie des coûts des compagnies aériennes [249]. Comme de nombreuses initiatives d'augmentations salariales sont actuellement négociées par les syndicats, les coûts relatifs aux employés tendent à augmenter avec le temps. Néanmoins, le nombre de stewards, d'hôteses et de pilotes requis devrait rester inchangé malgré la mise en service de nouvelles technologies et de nouveaux modèles d'avions. Il faut cependant souligner que l'électrification des avions augmente la capacité d'automatisation, et que des projets sont en cours pour remplacer les membres d'équipages, notamment les pilotes [250]. Cette catégorie de la structure des coûts des compagnies aériennes a été incluse dans les prix de la section "maintenance", et n'est donc pas plus détaillée et est considérée comme équivalente, quel que soit le type de propulsion envisagé.

5.2.3.4 Charges et taxes

Beaucoup d'aéroports seraient enclins à diminuer leurs taxes pour les compagnies employant des avions à propulsion sans émission [251].

En outre, les compagnies aériennes sont également touchées par d'autres aspects. Des facteurs positifs tels que l'augmentation du tourisme, le développement des pays émergents et la hausse du PIB mondial sont quelques-unes des nombreuses raisons qui expliquent les taux de croissance élevés de l'aviation mondiale [249]. Par contre, d'autres frais pour les compagnies aériennes, tels que les coûts liés à la pollution sonore et à la qualité de l'air local aux alentours des aéroports sont également à prendre en considération.

5.3 Calcul du coût actualisé du transport

Les différents indicateurs économiques ont été exposés. Sur base du principe du LCOE, la comparaison va s'appuyer sur le principe du coût actualisé du transport (CAT), afin de pouvoir comparer les différentes technologies en prenant tous les critères de coûts en compte sur la durée de vie des avions. Le CAT s'exprimera en [€/passager/km], le "passager-kilomètre" étant une unité courante de comparaison en aviation.

Hypothèses & données

Les avions comportant des technologies de propulsion innovantes et pertinentes vont être comparés en fonction de leur coût selon différents rayons d'action. Eurocontrol, l'agence européenne de contrôle du trafic aérien, classe les vols dont la portée est inférieure à 1500 km en vols court-courriers, inférieure à 4000 km en vols moyen-courriers et supérieure à 4000 km en vols long-courriers [252]. Si l'on considère les données réelles des vols au niveau mondial, la majorité d'entre eux sont des vols à courte distance, à hauteur de près de 80 %, comme en témoigne la FIGURE 5.4.

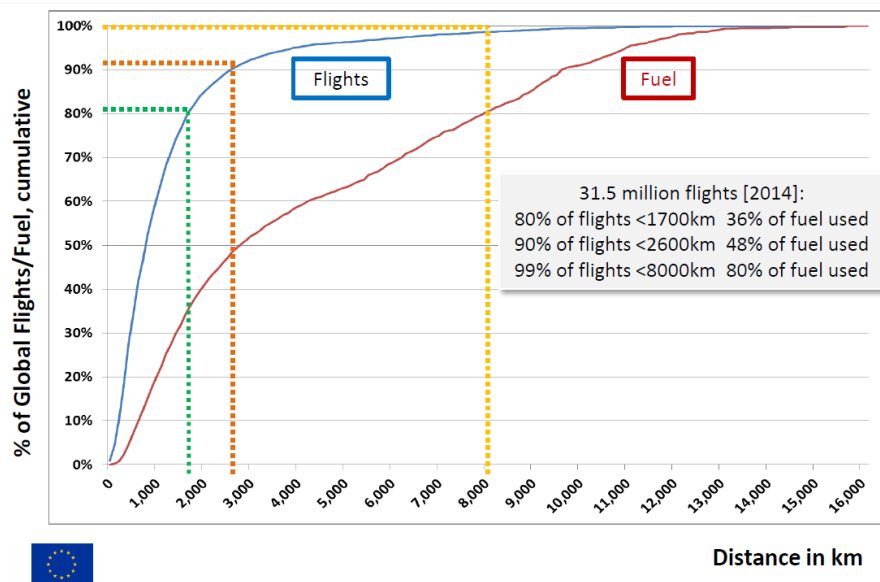


FIGURE 5.4 – Proportion de la longueur de vols et de la quantité de carburant utilisée en fonction de la distance parcourue, en 2014 [11].

Cependant, plus de la moitié des liaisons aériennes les plus populaires sont inférieurs à 1 000 km et 92 % des 30 routes internationales les plus fréquentées sont inférieures à 2 250 km. Par exemple, la route aérienne internationale la plus prisée en 2019 (30187 vols) reliant Kuala Lumpur à Singapour ne fait que 290 km [253]. Sur base de ces différentes possibilités de catégorisation des distances de vols, les catégories de 500 km, 1500 km, 2500 km et >4000 km sont appliquées dans les calculs. Les nombres moyens de passagers à bord d'avions réalisant ces catégories de vols, sont, respectivement, de 137, 159, 184 et 273 passagers [254], en tenant compte d'un facteur de remplissage moyen de 75% [254].

Les différentes données employées pour la réalisation de cette étude de viabilité économique présentées au cours de ce chapitre, sont compilées, additionnées et résumées dans le TABLEAU 5.4.

Paramètres de coût	Unités	Avion conventionnel	ATE	Hybride électrique-hydrogène
Émissions de CO ₂ équivalent (Emiss)	€/kWh	0.01518	0.008	0.0122 (+142€/vol CCL)
Achat de l'énergie (PE)	€/kWh	0.032	0.05	0.0135
Maintenance	€/passager.km	0.009	0.006	0.009
Coût actualisé du stockage de l'énergie	€/kWh	/	0.376	0.08

TABLE 5.4 – Résumé des paramètres de coût pour la comparaison économique.

Enfin, la consommation spécifique moyenne (CS) estimée pour un avion à combustion interne est de 43.06 [kWh/km] pour un vol très court-courrier (500 km), 38 [kWh/km] pour un vol court-courrier (1500 km), 34.31 [kWh/km] pour un vol moyen-courrier (2500 km) et 102.92 [kWh/km] pour un vol long-courrier (4000 km) [255]. Dans le cas d'un avion totalement électrique (sans combustion interne), une consommation spécifique de 21.14 [kWh/km] pour un vol court à moyen-courrier est estimée [227].

Résultats

Sur base des hypothèses précédentes, les coûts sont calculés pour les compagnies opérant respectivement avec des avions alimentés au kérosène, à l'hydrogène uniquement (donc un degré d'hybridation nul) ou totalement électriques. Le cas hybride doit prendre en compte les coûts des batteries, de leurs émissions et de la consommation en électricité associés en plus, proportionnellement à la quantité utilisée. La formule permettant de calculer le CAT est la suivante :

$$CAT = \frac{PA \cdot FRC}{\text{Durée de vie} \cdot pkm} + ME + \left(\left(\frac{CS}{p} \right) \cdot (PE + Emiss + LCOE) \right) \quad (5.5)$$

Avec :

- PA, prix d'achat de l'avion [€]
- FRC, facteur de récupération du capital [%an]
- pkm, passager-kilomètre [p.km]
- ME, frais de maintenance (incluant les frais des membres d'équipages) [€]
- p, nombre de passagers [p]
- PE, prix d'achat de l'énergie (carburant) [€/kWh]
- CS, consommation spécifique [kWh/km]
- Emiss, Émissions de CO₂ équivalent [€/kWh]

Le résultat du CAT pour un avion au kérosène en 2020 est repris au TABLEAU 5.5.

Paramètres	Unités	court-courrier		moyen-courrier	long-courrier
Rayon d'action	km	500	1500	2500	4000
Passagers	nombre	137	159	184	273
Achat de l'avion	10 ⁶ €	96.5	96.5	96.5	342
Maintenance	€/pkm	0.09	0.09	0.09	0.09
Énergie (carburant)	€/pkm	0.01	0.008	0.006	0.012
Émissions	€/pkm	0.005	0.005	0.003	0.06
CAT	[€/pkm]	0.14	0.11	0.10	0.11

TABLE 5.5 – CAT d'un avion conventionnel - 2020.

Dans le cas de l'avion conventionnel, il est intéressant d'estimer le coût en 2050, en raison de la croissance du coûts des émissions ainsi que celle du prix du kérosène, le tout conjugué à de possibles taxes supplémentaires. Le résultat est repris au TABLEAU 5.6.

Paramètres	Unités	court-courrier		moyen-courrier	long-courrier
Rayon d'action	km	500	1500	2500	4000
Passagers	nombre	137	159	184	273
Achat de l'avion	10 ⁶ €	96.5	96.5	96.5	342
Maintenance	€/pkm	0.09	0.09	0.09	0.09
Énergie (carburant)	€/pkm	0.02	0.01	0.01	0.02
Émissions	€/pkm	0.0158	0.0137	0.0118	0.0079
CAT	[€/pkm]	0.17	0.13	0.12	0.13

TABLE 5.6 – CAT d'un avion conventionnel - 2050.

Les coûts de l'avion conventionnel, bien que relativement faibles, risquent en effet de croître considérablement, car l'impact seul lié à l'augmentation du prix du kérosène et des coûts des émissions pourrait amplifier les coûts d'une moyenne de 18 % en 30 ans. Pour un avion court-courrier d'un vol de 1500km, cela représenterait des frais supplémentaires estimés à 4770 €, à chaque vol.

Le résultat du CAT pour un avion totalement électrique en 2020 est repris au TABLEAU 5.7.

Paramètres	Unités	court-courrier		moyen-courrier	long-courrier
Rayon d'action	km	500	1500	2500	/
Passagers	nombre	137	159	184	/
Achat de l'avion	10 ⁶ €	96.5	96.5	96.5	/
Maintenance	€/pkm	0.06	0.06	0.06	/
Énergie (carburant)	€/pkm	0.008	0.007	0.006	/
Émissions	€/pkm	0.0012	0.001	0.0009	/
LCOE	€/pkm	0.058	0.05	0.043	/
CAT	[€/pkm]	0.07	0.07	0.06	/

TABLE 5.7 – CAT d'un ATE - 2020.

Le CAT d'un ATE est, pour tout rayon d'action envisageable, plus faible que celui d'un avion classique. Cependant, comme expliqué au CHAPITRE 4, la technologie actuelle de batteries ne permet pas de développer ces avions en 2020. Malgré cela, le déploiement de production d'énergies renouvelables en Europe réduira encore les coûts liés à la production de l'électricité et aux émissions, rendant ce résultat toujours plus attrayant d'ici 2050. Un calcul précis ne peut pas être estimé en raison d'inconnues sur l'étendue du parc de production verte d'électricité, et du prix correspondant. Ce plus faible CAT est principalement obtenu grâce à la réduction du coût des émissions et de la maintenance simplifiée. Cependant, même en considérant des frais de maintenance égaux aux avions conventionnels, le CAT de l'ATE serait toujours plus faible.

Le résultat du CAT pour un avion alimenté à l'hydrogène en 2020 est repris au TABLEAU 5.8.

Paramètres	Unités	court-courrier		moyen-courrier	long-courrier
Rayon d'action	km	500	1500	2500	4000
Passagers	nombre	137	159	184	273
Achat de l'avion	10 ⁶ €	96.5	96.5	96.5	342
Maintenance	€/pkm	0.09	0.09	0.09	0.09
Énergie (carburant)	€/pkm	0.004	0.003	0.002	0.005
Émissions	€/pkm	0.004	0.003	0.003	0.005
LCOE	€/pkm	0.025	0.019	0.015	0.03
CAT	[€/pkm]	0.16	0.13	0.12	0.13

TABLE 5.8 – CAT d'un avion alimenté à l'hydrogène - 2020.

Les avions alimentés à l'hydrogène souffrent de pénalités économiques principalement dues à l'investissement dans des systèmes de production, stockages, d'exploitation et d'entretien de l'hydrogène liquide, nécessaires à bord des avions. Il faut cependant souligner le fait qu'en 2050, ce type d'avions serait probablement plus avantageux d'un point de vue économique que les avions conventionnels, sur des vols de moyenne à longue distance,

grâce au meilleur rendement de ce système de propulsion qui permettrait de compenser les pénalités de poids et de traînées, induites par la présence de réservoirs plus volumineux. D’ici 2050, grâce à la maturité des technologies liées à la production d’hydrogène et le développement d’un parc de production d’énergie verte, les coûts liés aux émissions et à l’énergie diminueront davantage, rendant cette technologie certainement compétitive dans les années à venir.

5.4 Conclusion

La comparaison économique de l’ATE et de celui à propulsion à hydrogène avec un avion de référence à propulsion conventionnelle en ce qui concerne les coûts variables pour les compagnies aériennes a révélé le potentiel économique d’avions possédant de nouveaux systèmes de propulsion. En effet, l’évaluation du CAT montre une diminution de 43 % en moyenne du montant total des coûts pour les avions électriques par rapport aux conventionnels, tandis que l’impact environnemental concernant la pollution notamment par les NO_x et le CO_2 deviendrait très faible (partie d’énergie grise uniquement), ce qui permettrait de surcroît d’atteindre les objectifs environnementaux. Même dans l’hypothèse de frais de maintenance identiques, l’ATE est toujours environ 20% moins cher à exploiter. Cette analyse des coûts montre donc que ce système de propulsion alternatif est économiquement très compétitif sur les vols court à moyen-courriers, même si des restrictions technologiques, liées principalement à la faible densité énergétique des batteries, entravent son déploiement à l’heure actuelle. De plus, sur le très court-courrier (vol de 500 km), l’avion électrique présente un CAT estimé à 0,07 [€/pkm], contre 1,17 [€/pkm] pour l’avion conventionnel en 2050. De même, les coûts liés aux émissions d’ATE pourraient être profusément réduits d’ici 2050 si une volonté politique et sociale amenait à l’utilisation complète de méthodes vertes de production d’électricité, donc issues de sources renouvelables. Les frais des émissions lors de l’opération d’ATE seraient nuls, étant donné qu’il n’y aura pas d’émissions en vol. L’intérêt économique pour les compagnies à opérer des vols électriques sur courte-distance est donc considérable.

D’autres paramètres, indépendants du système de propulsion employé, peuvent néanmoins faire fluctuer la rentabilité des compagnies aériennes, sans modifier les résultats obtenus ci-dessus. Parmi ceux-ci, on peut noter :

- Le taux de remplissage. Plus ce taux est élevé, plus les coûts tendent à diminuer.
- La taille de l’avion. Si celle-ci augmente, cela entraînera une augmentation relativement plus faible des coûts d’exploitation par mouvement d’avion et par passager.
- La taux d’utilisation. Une utilisation plus intensive des avions entraîne des coûts d’exploitation plus faibles par mouvement d’avion.
- L’âge des avions. Les avions plus anciens sont plus coûteux à exploiter en raison de l’augmentation des frais de maintenance.
- Alliance. L’adhésion à une grande alliance permet à une compagnie aérienne de coopérer étroitement avec des partenaires de l’alliance, permettant des économies substantielles.

Chapitre 6

Matériaux

Comme expliqué au CHAPITRE 4, pour parvenir à une faisabilité technologique et technique d'une aviation dé-carbonisée, notamment au travers d'ATE, il faut réduire au maximum le poids des avions en vol afin de pouvoir utiliser le moins d'énergie possible, et pouvoir ainsi exploiter la technologie de batteries possédant des densités énergétiques limitées. De même, un avion léger réduira les frais des compagnies, étudiés au CHAPITRE 5, en consommant moins d'énergie et donc en émettant aussi moins de polluants.

Les objectifs ambitieux de réduction des émissions, la recherche de l'indépendance vis-à-vis des ressources fossiles et la demande de réduction des coûts ont conduit à des efforts de recherche de matières premières plus durables, notamment à partir de sources naturelles. Par exemple, le rapport "*flightpath*" 2050 publié par le Conseil consultatif pour la recherche et l'innovation aéronautique en Europe (ACARE) a inclus l'objectif de protéger l'environnement et l'approvisionnement énergétique par l'introduction de matériaux respectueux de l'environnement dans les technologies aéronautiques, afin de réduire l'empreinte carbone et la dépendance aux produits pétroliers [256]. Les matériaux de pointe utilisés dans les avions, qui sont des composites polymères renforcés par des fibres, offrent de bonnes propriétés mécaniques et sont plus légers que les métaux, ce qui en fait des candidats idéaux pour une conception résistante et légère.

Le but de ce chapitre est d'étudier, en établissant une méthodologie appliquée sur un cas d'étude précis, une sélection de matériaux pour un élément constitutif dans un contexte de durabilité. La méthodologie a pour but de rechercher des matériaux durables, donc novateurs dans le secteur, permettant de réduire la masse tout en garantissant les caractéristiques et propriétés techniques requises. Les composites fabriqués notamment à partir de ressources naturelles contribueraient à diminuer la consommation de carburant en raison de leurs masses réduites et pourraient en outre limiter l'empreinte carbone globale de la structure de l'avion.

Un avion plus durable s'obtient grâce aux matériaux plus durables et légers, mais l'utilisation de procédés de fabrication optimisés doit également rentrer dans cette optique. Une étude de sélection et d'analyse de procédés, notamment économique, sera réalisée pour le cas d'étude, afin de déterminer les frais supplémentaires éventuels liés à l'utilisation du matériau et aux méthodes de fabrication du composant. De fait, les coûts de fabrication de la structure des avions dans des matériaux précis, sont la deuxième source de coûts la plus importante prise en compte dans le coût d'achat, après le système de propulsion [257].

6.1 Contexte

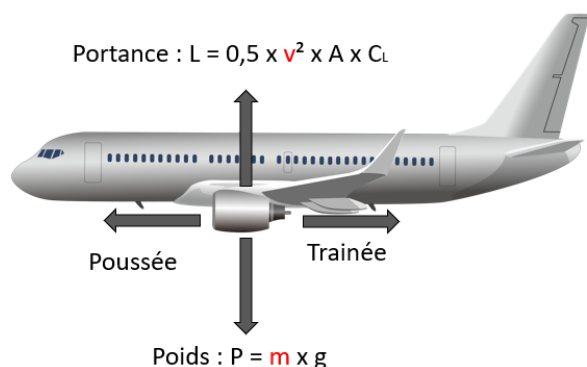


FIGURE 6.1 – Représentation simplifiée et schématique de l'équilibre des forces en vol.

La FIGURE 6.1^a reprend l'équilibre des quatre forces d'un avion en croisière où, pour rappel, la portance L équivaut le poids P , où m est la masse totale de l'avion et g l'accélération de la gravité terrestre. La force de portance L dépend de la surface de l'aile A , du coefficient de portance C_L et de ρ , la densité de l'air, mais surtout de la vitesse de vol, avec une dépendance d'ordre 2. En croisière, ces deux forces sont égales et maximales étant donné que la vitesse est la plus élevée. Dès lors, ce mode de vol est pris en considération dans l'analyse de ce chapitre.

a. image issue de pngtree.com

Une masse plus élevée implique donc une portance plus importante, produisant ainsi une plus grande traînée, ce qui nécessite une plus grande poussée et donc plus de consommation d'énergie. De plus, la majorité de la masse brute d'un avion à vide (55% [257]) réside dans les matériaux le constituant. Toute réduction de masse de la structure peut donc être directement convertie en une réduction de la consommation d'énergie, des coûts et des émissions, ou en une charge utile plus élevée (plus de passagers) ainsi qu'en une extension de la distance franchissable. En effet, la réduction d'1 *kg* dans un avion conventionnel de type A320 équivaut à une économie de 2000 litres de carburant sur l'ensemble du cycle de vie de l'avion, ce qui signifie une économie en énergie pour la compagnie aérienne d'environ 900 € sur la durée de vie de l'avion, en fonction du prix du carburant [257].

Une révolution est en cours dans la construction des avions commerciaux d'aujourd'hui et elle peut se résumer en un mot : "composites". *"Un matériau composite est un assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles (mais ayant une forte capacité d'adhésion). Le nouveau matériau ainsi élaboré possède des performances supérieures à celles des éléments pris séparément. Il est généralement constitué de deux composants, une ossature appelée renfort qui assure la tenue mécanique et d'une protection appelée matrice qui assure la cohésion de la structure et le transfert de charges entre les renforts"* [258]. Les fibres synthétiques courantes qui sont utilisées dans les structures des avions sont des fibres à base de verre, de carbone et de Kevlar [259]. Il existe de nombreuses bonnes raisons pour que les constructeurs d'avions utilisent des composites et que les compagnies aériennes souhaitent les utiliser dans leurs avions. Ces types de matériaux présentent en effet certaines propriétés mécaniques relativement plus élevées que les matériaux métalliques traditionnels. De fait, les composites sont plus résistants à la fatigue que le métal due aux cycles répétés de décollage & atterrissage, ce qui se traduit par moins d'inspections nécessaires sur la durée de vie de l'avion et donc des frais de maintenance réduits [260]. De plus, en moyenne, les composites présentent un rapport résistance/poids 20% plus élevé que les métaux [260]. La transition mondiale des avions vers une architecture comportant toujours plus de composites devrait contribuer à hauteur de 15 à 20 % aux objectifs de réduction des émissions de CO_2 de l'industrie d'ici 2050 [261].

Les composites, tels que les polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC), sont utilisés dans les structures primaires et secondaires des avions modernes tels que l'Airbus A350. Comme repris sur le TABLEAU 6.1, ils sont de plus en plus employés au sein de la structure des avions. En effet, entre 2000 et 2020 la quantité relative de composites au sein des avions Airbus a plus que doublé.

Années	Type d'avion (Airbus)	Proportion massique structurelle en composite (%)
1970-1980	A300	4
1980-1990	A310	6
1990-2000	A340-300	10
2000-2010	A380	25
2010-2020	A350-900	53

TABLE 6.1 – Évolution de la proportion massique de composite dans la structure d'avions Airbus, adapté de [256].

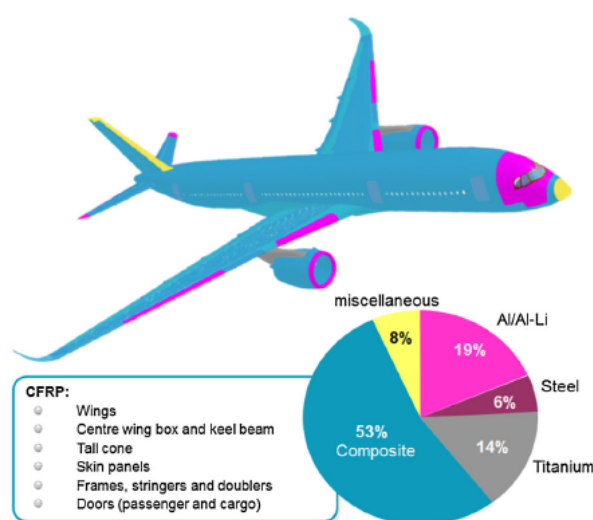


FIGURE 6.2 – Proportion de matériaux utilisés dans l'A350 [262].

Ils représentent à présent plus de 50 % du poids structurel des avions récents comme l'A350 (FIGURE 6.2) [260]. Ils sont de plus en plus utilisés pour remplacer les matériaux classiques comme l'aluminium ou le titane. Cependant, tous les composites utilisés actuellement en aviation ont une chose en commun : ils sont fabriqués par l'homme, et les composites renforcés en fibres de carbone ou de verre, en particulier, sont parfois très gourmands en énergie lors de leur production [262]. Cependant, grâce aux économies de poids réalisées sur la durée de vie de l'avion, les économies d'énergie en carburant sont plus grandes que l'excès de consommation d'énergie pour leur production [262].

6.2 Objectifs & méthodologie

Dans le but de promouvoir des matériaux plus durables et plus légers pour l'aviation décarbonisée de demain, tout en s'inscrivant dans un contexte économique, les objectifs de ce chapitre sont d'effectuer une sélection approfondie de matériaux concernant un cas d'étude, afin de sélectionner ceux répondant au mieux aux différents critères mécaniques, économiques et durables. Ensuite, une sélection de procédés de fabrication sera effectuée afin de déterminer l'impact économique et écologique que cela peut induire, dû au nouveau matériau sélectionné.

La méthodologie de sélection de matériaux se base sur la méthode de MICHAEL F. ASHBY [40]. Celle-ci se divise en 4 étapes.

1. Établir les objectifs recherchés, les contraintes et les variables libres.
2. Déterminer les mesures de performance et les indices de comparaison.
3. Appliquer ces indices à l'aide du logiciel CES EDUPACK et déterminer les meilleurs candidats.
4. Classer ces matériaux grâce à une approche systématique.

6.3 Cas d'étude - longeron d'aile

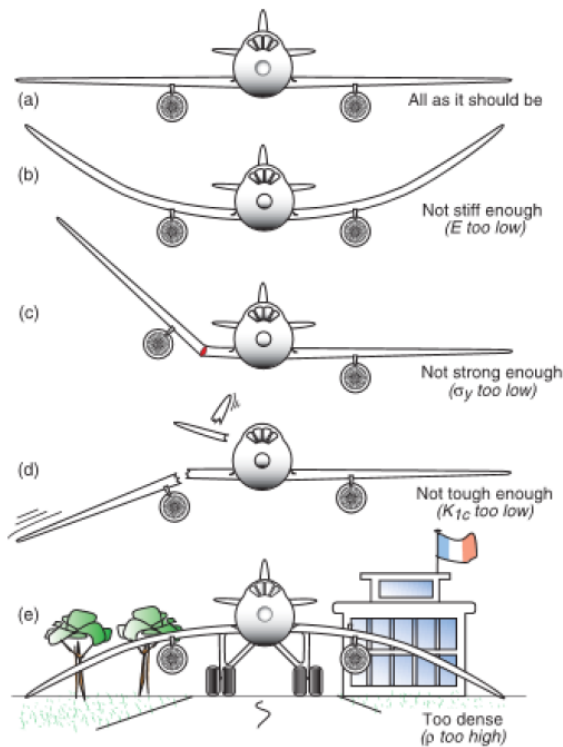


FIGURE 6.3 – Représentation schématique des conséquences de mauvaises propriétés mécaniques pour les matériaux des ailes d'avions

Les longerons des Airbus court à moyen-courriers sont principalement fabriqués en alliage d'aluminium 7085 (AA7085) [263], comme c'est le cas pour l'A320. Cependant, différents projets existent pour produire ce composant en composite [264], ce qui est par exemple le cas sur le dernier long-courrier Airbus, l'A350. Dans un contexte de durabilité, les matériaux naturels (non fabriqués par l'homme, tels que les fibres naturelles) vont être étudiés en comparaison avec des composites renforcés en fibres artificielles, telles que la fibre de carbone ou de verre, en raison de leur intérêt toujours grandissant en aéronautique. Les principales propriétés mécaniques d'intérêt sont la rigidité (mesurée par le module de Young E), la limite d'élasticité (σ_y), la résistance à la fatigue (S_n) et la résistance à la propagation de fissures (ténacité K_{Ic}) [265]. La FIGURE 6.3^a illustre les conséquences sur la structure dans le cas où ces propriétés mécaniques ne sont pas adéquates. Les matériaux seront sélectionnés en fonction de divers indicateurs d'intérêts, tels que la réduction de la masse, des coûts ou de l'empreinte carbone, qui sont les objectifs recherchés.

^a. LMECA2410 - Mechanics of materials. A. Simar. Slides de cours

La méthodologie va être appliquée au cas d'étude d'un longeron rectiligne avant d'une aile d'avion type A320, représenté sur les FIGURES 6.4 et 6.5. Les longerons sont essentiellement des poutres qui soutiennent efficacement l'aile. Ils varient en taille et en forme mais ont souvent un profil de section en I. Ce sont des parties de l'avion qui supportent de grandes charges tendant à faire fléchir l'aile [266]. Ils sont placés le long de l'envergure de l'aile. Ce composant est choisi car sa géométrie, relativement simple, ressemblant à une poutre en I, permet aux efforts d'être dès lors relativement facilement estimés.

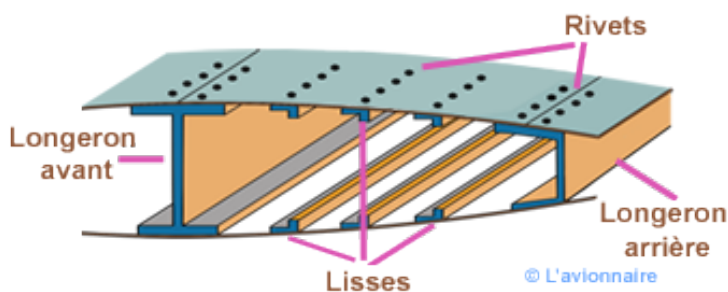


FIGURE 6.4 – Représentation schématique du longeron [267].

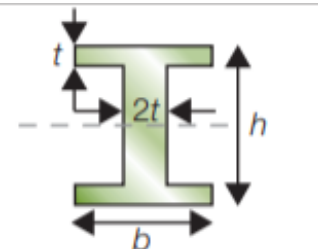


FIGURE 6.5 – Notation des grandeurs caractéristiques du longeron en poutre en I [268].

Les performances structurelles dans le secteur aérospatial sont principalement influencées par les propriétés mécaniques telles que la résistance, la rigidité, la résistance aux dommages et aux propagations de fissures, ainsi que par les propriétés physiques et chimiques telles que la densité, la résistance à la corrosion à température ambiante et élevée ou encore la résistance aux impacts de foudre [265]. De plus, la faisabilité économique et la durabilité des matériaux constituant les structures des avions sont des indicateurs supplémentaires. Il est clair que, du point de vue du concepteur, la fonction première d'une structure est de résister aux efforts, en étant le plus léger possible et au moindre coût pour le client. En règle générale, le travail consiste à équilibrer une variété d'exigences fonctionnelles avec les contraintes, pour arriver au choix optimal de la sélection des matériaux [265].

6.3.1 Sélection & analyse de matériaux

Les matériaux répondant au meilleur équilibre entre performances mécaniques, coûts et durabilité vont être sélectionnés afin de trouver des candidats potentiels remplaçable du AA7085. Cette étude va s'effectuer à l'aide du logiciel CES EDUPACK, comportant une base de données complète sur les matériaux et les procédés, de puissants outils logiciels, ainsi que de nombreuses ressources et données supplémentaires [269]. Dans un contexte de durabilité et d'utilisation grandissante de composites, l'étude qui suit inclut des fibres naturelles potentiellement candidates comme renforcements.

Hypothèses

- Un longeron d'aile d'avion conventionnel court à moyen-courrier type A320 est utilisé comme référence dans le cadre de cette étude.
- La phase de vol considérée est la croisière en vol stationnaire. Certaines phases critiques comme le décollage ou l'atterrissage ne sont pas pris en compte dans cette analyse, négligeant de ce fait certains types d'effort que le longeron devrait subir.
- L'influence des impacts environnementaux tels que l'humidité, le rayonnement ultraviolet, les turbulences (vibrations) ou les impacts de foudre ne sont pas pris en considération.
- Des analyses plus précises et poussées à l'aide d'éléments finis ne sont pas effectuées dans le cadre de ce travail.
- La sélection de matériaux pour des composants aéronautiques dépend de nombreux facteurs tels que l'air ambiant, les grandes variations de températures et les différents chargements mécaniques (tension, compression, flexion, fatigue, torsion, etc.), négligés dans cette étude. Au vu de ce nombre important de variables, les matériaux sélectionnés doivent ensuite passer une batterie de tests conséquents pour répondre à un cahier des charges pointilleux, ce qui sort du cadre de ce travail.
- Les seuls efforts repris par ce composant sont les moments de flexion dûs à la flexion des ailes en vol pour assurer la portance.
- Le matériau est considéré comme homogène, isotrope, linéaire et élastique.

Analyse

La méthode d'analyse, selon ASHBY [40], consiste à déterminer des indices de performances du matériau, construits comme une combinaison de ses propriétés, et permettant d'évaluer de manière objective la performance du matériau, en fonction d'un cahier des charges.

Cahier des charges Le cahier des charges dresse la fonction du composant, les objectifs recherchés (quantités à maximiser ou minimiser), les contraintes (conditions imposées et fixes) et les variables libres.

Fonction : longeron d'aile, assumé comme étant une poutre en I, devant résister au moment de flexion induit par les forces agissant sur les ailes de l'avion.

Objectifs : comme expliqué précédemment, l'objectif principal est de diminuer la masse (m) du matériau, et aussi les coûts (C_m), afin de consommer moins d'énergie. Dans un contexte de durabilité, un troisième but est

de minimiser l'impact environnemental (*IE*).

Contraintes : la longueur L , la largeur b et la hauteur h du longeron sont imposées, cela est dû aux géométries des ailes. Le longeron doit supporter une charge de flexion F sans entrer en plasticité (déformation irréversible), ce qui signifie que la limite d'élasticité σ_y est donc spécifiée. Celui-ci ne doit pas non plus se fracturer brutalement à cause de l'apparition de fissures au sein du composant, ce qui signifie qu'il doit aussi résister à la propagation de fissures, et donc la ténacité K_{Ic} est également spécifiée. Le longeron doit également être assez rigide pour garantir que l'aile ne se déforme de trop, le module de Young E est donc spécifié. Enfin, il ne doit pas rompre à cause du phénomène de fatigue (cycles répétés de mouvements), la résistance à la fatigue à 10 millions de cycles S_n est donc spécifiée. S_n est la contrainte cyclique maximale pour laquelle le matériau survit à 10 millions de cycles. Pour certaines classes de matériaux, cela est considéré comme la "limite d'endurance", c'est-à-dire la contrainte à laquelle le matériau a une durée de vie en fatigue infinie.

Variables libres : l'épaisseur t et le choix du matériau du longeron sont des paramètres libres.

Relations & indices de performances La masse m du longeron de volume V est calculée comme suit [268] :

$$m = \rho \cdot V \simeq 2t \cdot (b + h) \cdot L \cdot \rho \quad (6.1)$$

Le longeron ne peut entrer en plasticité en se déformant, pour éviter des déformations irréversibles pouvant amener à la fracture du composant. En vol, les ailes se plient de telle sorte que le haut de l'aile est en compression et le bas en tension. La tension longitudinale, σ , en un point y distant de l'axe neutre d'une poutre uniforme chargée élastiquement en flexion par un moment M , est :

$$\frac{\sigma_x}{y} = \frac{M}{I}$$

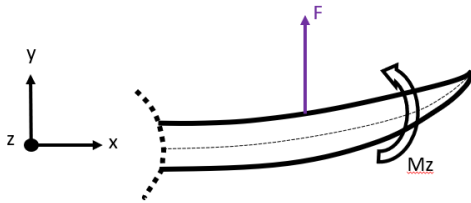


FIGURE 6.6 – Représentation schématique du moment de flexion sur les ailes en vol stationnaire.

Où I est le moment d'inertie et y est la distance par rapport à l'axe neutre. Par conséquent, la contrainte normale totale due à la flexion de l'aile est donnée par :

$$\sigma_x = \frac{-M_z \cdot y}{I_z} + \frac{M_y \cdot z}{I_y} \quad (6.2)$$

Mais comme le montre la FIGURE 6.6, le moment agit dans le sens trigonométrique autour de l'axe z , ce qui signifie que nous pouvons ignorer M_y .

Le moment d'inertie est calculé de la manière suivante [268] :

$$I = \frac{h^3 \cdot t \cdot (1 + \frac{3b}{h})}{6}$$

En injectant ensuite ces résultats dans (6.2), nous obtenons la condition suivante :

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{\frac{h^3 \cdot t \cdot (1 + \frac{3b}{h})}{6}} < \sigma_y \quad (6.3)$$

En isolant t de l'équation (6.3) et en l'injectant dans l'équation (6.1), la première relation (mesure) de performance est obtenue :

$$m_1 > \frac{12 \cdot M \cdot y \cdot (b + h) \cdot L \cdot \rho}{\sigma_y \cdot h^3 \cdot (1 + \frac{3b}{h})} \quad (6.4)$$

Où le premier indice de performance à minimiser, contenant les paramètres dépendants du matériau, est extrait :

$$P1 = \frac{\rho}{\sigma_y}$$

Ensuite, la deuxième condition nous impose que le longeron ne peut pas se rompre dû à une propagation de fissure (fracture rapide). La condition s'exprime, suivant les hypothèses d'une fissure d'axe perpendiculaire à celui de la direction des efforts (ouverture dite de *Mode I*) et d'un matériau présentant une très petite zone de plasticité à la pointe de la fissure (déformation inélastique faible par rapport à la taille de la fissure), de la manière suivante :

$$\sigma < \frac{K_{1c}}{\sqrt{\pi a_c}} = \sigma_c = \frac{M \cdot y}{I} \quad (6.5)$$

Où K_{1c} est la ténacité du matériau, a_c la longueur de la fissure critique (initiant la propagation), σ_c , la valeur de contrainte critique initiant la propagation de la fissure. Il est à nouveau possible d'isoler l'épaisseur et ensuite de l'injecter dans l'équation (6.1) pour obtenir la deuxième mesure de performance :

$$m_2 > \frac{12 \cdot M \cdot y \cdot \sqrt{\pi a_c} \cdot (b + h) \cdot L \cdot \rho}{K_{1c} \cdot h^3 \cdot (1 + \frac{3b}{h})} \quad (6.6)$$

Ainsi que le deuxième indice de performance à minimiser :

$$P2 = \frac{\rho}{K_{1c}}$$

Ensuite, la rigidité du longeron doit être suffisante (supérieure à S^*). La rigidité d'une poutre peut être exprimée en fonction de la force F appliquée et de la déformée de la poutre σ :

$$S = \frac{C_A \cdot E \cdot I}{L^3} = \frac{C_A \cdot E \cdot \frac{h^3 \cdot t \cdot (1 + \frac{3b}{h})}{6}}{L^3} > S^* \quad (6.7)$$

Où C_A est une constante et E le module d'élasticité (module de Young). A nouveau, la variable libre t peut être isolée, et ensuite le résultat obtenu introduit dans l'équation (6.1). La troisième condition ainsi obtenue s'exprime comme suit :

$$m_3 > \frac{12 \cdot (b + h) \cdot L^4 \cdot \rho \cdot S^*}{C_A \cdot h^3 \cdot (1 + \frac{3b}{h}) \cdot E} \quad (6.8)$$

Où il est possible d'extraire et d'obtenir le troisième indice de performance à minimiser :

$$P3 = \frac{\rho}{E}$$

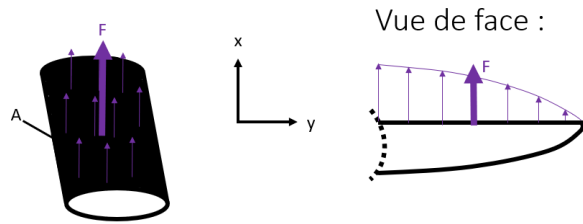


FIGURE 6.7 – Contrainte normale exercée en vol stationnaire.

Comme représenté sur la FIGURE 6.7, la distribution des forces est simplifiée en une seule charge ponctuelle (F). Dès lors, la contrainte normale exercée sur le longeron peut s'exprimer comme $\sigma = \frac{F}{A}$.

On fait ensuite l'hypothèse que le longeron reprend ces efforts. La dernière condition impose que le longeron ne peut céder dû à la fatigue, ce qui implique que $\frac{F}{A} < S_n$. La quatrième condition s'exprime donc comme

$$\sigma \simeq \frac{F}{2 \cdot b \cdot t + h \cdot t} < S_n \quad (6.9)$$

En effectuant la même démarche, nous obtenons la quatrième condition :

$$m_4 > 2 \cdot (b + h) \cdot L \cdot F \cdot \frac{\rho}{S_n \cdot (2b + h)} \quad (6.10)$$

Ainsi que le quatrième indice de performance : $P4 = \frac{\rho}{S_n}$

Les 4 indices de performance ont une expression simple, dû au fait que la variable libre t est toujours à l'exposant 1 dans les équations. Étant donné qu'il y a plusieurs objectifs à minimiser et plusieurs contraintes, une optimisation multiobjectif va être mise en place. Les dix meilleurs matériaux répondant à l'optimisation des propriétés mécaniques par rapport à l'objectif de réduction de masse vont être sélectionnés graphiquement grâce aux indices de performance. Ensuite, ces candidats seront pondérés en fonction de trois objectifs à l'aide d'une fonction de pénalité [40] pour finaliser la sélection, et déterminer le classement des meilleurs candidats potentiels.

Graphiques des indices de performances Les FIGURES 6.8 et 6.9 reprennent les dix matériaux présentant les meilleurs résultats des indices de performances combinés. Les matériaux non-grisés sont ceux qui répondent le mieux aux 4 indices de performances, quelque soit la combinaison d'indices utilisée pour les axes des graphes. Aussi, une ligne de coupe permet de griser les matériaux sortant du "top 10". Les matériaux en mauve sont des polymères, et ceux en vert sont des fibres naturelles.

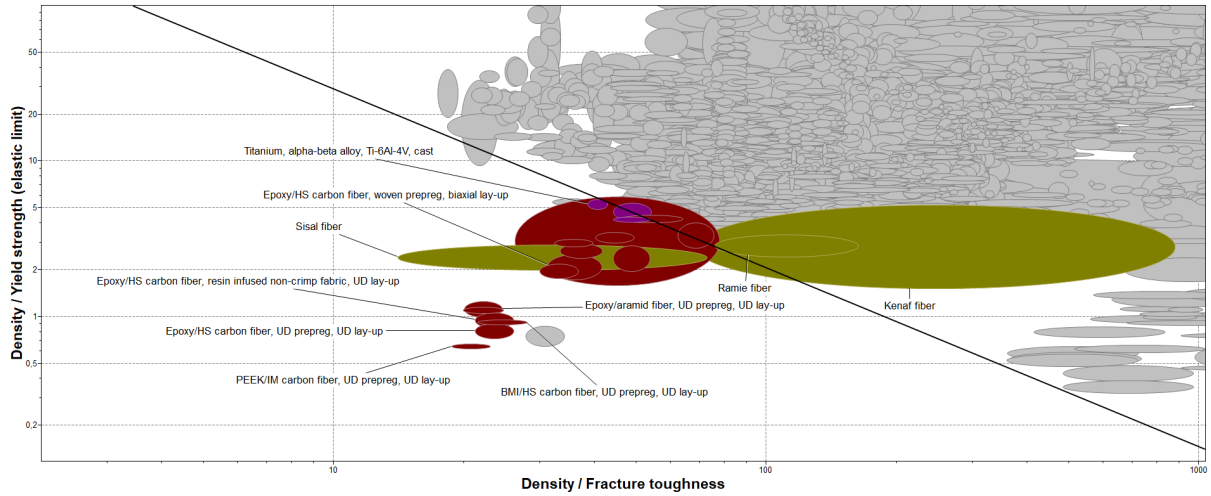


FIGURE 6.8 – Sélection finale graphe CES EDUPACK - indices de performances P1 et P2.

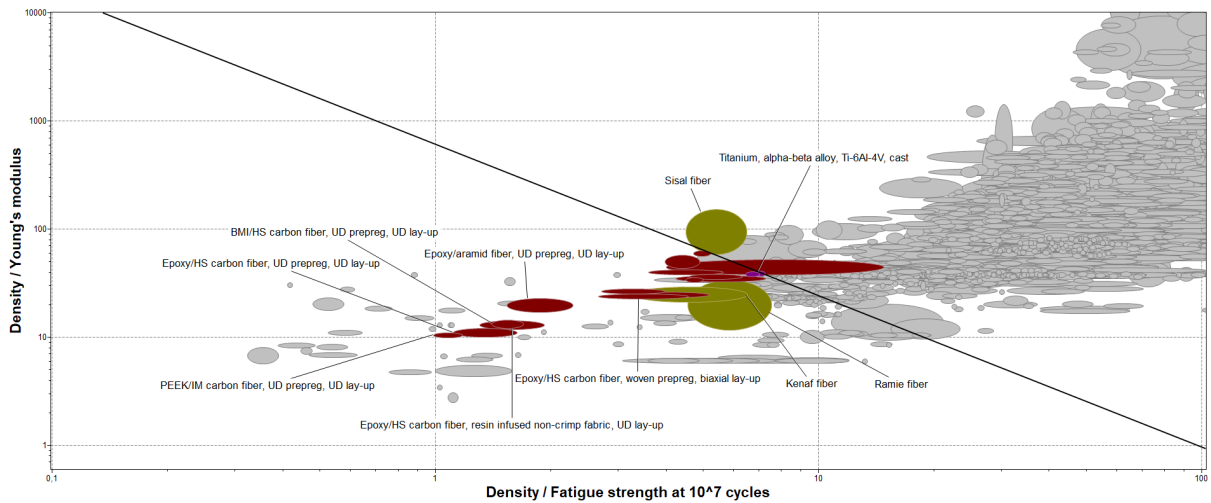


FIGURE 6.9 – Sélection finale graphe CES EDUPACK - indices de performances P3 et P4.

Les 10 meilleurs matériaux vont donc être à présent comparés grâce à leurs propriétés, dont leurs valeurs sont issues de CES Edupack, et en fonction des valeurs des mesures de performance m_1 , m_2 , m_3 et m_4 reprises aux équations (6.4), (6.6), (6.8) et (6.10). Les mesures de performance pour l'objectif de coût et d'impact environnemental sont identiques, à la distinction près d'être multipliées respectivement par le coût massique ou l'empreinte carbone. Il n'est donc pas nécessaire de dériver tous les résultats pour ces deux objectifs supplémentaires. En effet, le prix d'un matériau se calcule comme suit : $P = Cm \cdot \rho \cdot V$, avec Cm le prix par unité de masse (coût massique) [€/kg]. De manière analogue, le dernier objectif qui est l'impact environnemental (IE), est calculé comme suit : $IE = EC \cdot \rho \cdot V$, avec EC l'empreinte carbone [kg_{CO_2}/kg]. Les différentes données et contraintes fixées doivent à présent être estimées, à savoir b , h , L , M , S^* et F .

- Le moment de flexion M maximal d'un longeron similaire à celui d'un avion type A320 est estimé à 160 [kNm], en prenant en compte le poids des ailes, du réacteur, des effets de turbulence, etc. [270].
- En vol stationnaire, la portance est égale au poids. On peut alors calculer F . Sachant que la masse totale maximale au décollage d'un A320 est de 68 000 [kg] [271], on peut dès lors estimer la force sur chaque aile F : $F = 34000 \cdot 9.81 = 333\,540[N]$. Il y a généralement 2 longerons par aile, et ceux-ci reprennent

les moments de flexion et donc hypothétiquement cette force F [272]. Dès lors, chaque longeron devrait supporter une force de 166 770 [N].

- La rigidité S^* est le résultat de calculs laborieux, et des données exactes ne sont pas fournies dans la littérature pour un longeron de type A320. Une valeur approximative de $S^* = 10^7 N/m$ est attribuée, au vu des forces en jeu [273].
- Les dimensions d'un longeron d'A320 sont typiquement de l'ordre de grandeur suivant : $L = 16m$, $h = b = 12cm$ [271]. L'épaisseur, pour rappel, est la variable libre.

La résolution analytique d'objectifs à contraintes multiples se réalise en éliminant les matériaux présentant les mesures de performances les plus élevées ($\dot{m}$, $\dot{P}$ et IE). Les propriétés mécaniques des matériaux candidats sélectionnés sont issues des données du logiciel CES EDUPACK, et sont reprises dans le TABLEAU 6.2.

Matériaux	ρ [kg/m ³]	σ_y [MPa]	K_{Ic} [MPa. m ^{0.5}]	Sn [MPa]	E [GPa]	Cm [€/kg]	EC [kg/kg]
AA7085	2850	497	35.9	192	73.1	4.52	13.2
Ti6Al4V	4430	898	114	688	115	20.4	42.2
Polymère polyépoxyde (Epoxy) renforcé en fibres de carbone tissée	1610	910	50.3	592	68.7	50.2	47.2
Fibres de sisal	1450	711	101	316	24	1.03	1.7
Epoxy renforcé en fibres de carbone, résine infusée	1580	1840	73.5	1200	131	19.4	50.5
Epoxy renforcé en fibres de carbone préimprégnées	1580	2170	73.5	1410	154	35.6	50.5
Polymère Polyétheréthercétone (PEEK) renforcé en fibres de carbone préimprégnées	1570	2430	83.2	1580	149	102	53.9
Fibres de ramie	1550	612	19.7	328	128	2.14	0.46
Fibres de kenaf	1050	666	14.8	312	47	0.564	2.94
Epoxy renforcé en fibres d'aramide	1380	1380	68.8	897	80	67.4	13.2
Polymère Polybismaléimide (BMI) renforcé en fibres de carbone préimprégnées	1610	1740	73.9	1130	130	98.4	52.4

TABLE 6.2 – Compilation des propriétés des matériaux candidats, obtenus des graphes 6.8 et 6.9, comparé au matériaux de référence repris à la ligne verte.

Les différents résultats pour le calcul des mesures de performances sont repris, pour les trois objectifs, dans le Tableau 6.3. L'exemple pour le cas de la masse est détaillé : pour chaque mesure de performance, celle présentant le nombre le plus élevé est gardée dans la colonne "point". La même démarche a été effectuée pour les objectifs de coûts et d'impact environnemental. Dans le cas où il n'y avait qu'un objectif, le choix serait simple. Il suffirait de sélectionner le matériau présentant la mesure de performance ($\dot{m}$, $\dot{P}$, IE) la plus basse.

Dans le tableau 6.3, par exemple, s'il n'y avait que l'objectif de masse, le meilleur matériau serait le PEEK renforcé en fibres de carbone préimprégnées. S'il n'y avait que l'objectif de coût, ce serait d'abord les fibres naturelles et ensuite l'Epoxy renforcé en fibres de carbone à résine infusée. Enfin, s'il ne fallait tenir compte que de l'impact environnemental, à nouveau après les fibres naturelles, ce serait l'Epoxy renforcé en fibres d'aramide qui serait le choix optimal.

Matériaux	m_1 [kg]	m_2 [kg]	m_3 [kg]	m_4 [kg]	$\dot{m}$ [kg]	$\dot{P}$ [€]	$\dot{IE}$ [kgCO ₂]
AA7085	367	285	222	118	367	1659	4844
Ti6Al4V	316	139	219	52	316	6446	13365
Epoxy renforcé en fibres de carbone tissée	113	115	133	22	133	6677	6278
Fibres de sisal	130	52	343	37	343	367	583
Epoxy renforcé en fibres de carbone, résine infusée	55	77	68	11	77	1494	3888
Epoxy renforcé en fibres de carbone préimprégnées	47	77	59	10	77	2741	3888
PEEK renforcé en fibres de carbone préimprégnées	41	68	60	10	68	6936	3665
Fibres de ramie	162	282	69	38	282	604	130
Fibres de kenaf	101	255	127	27	255	144	750
Epoxy renforcé en fibres d'aramide	64	72	98	12	98	6605	1294
BMI renforcé en fibres de carbone préimprégnées	59	78	71	11	78	7675	4087

TABLE 6.3 – Résultats des mesures de performance des 10 matériaux candidats, comparé au matériau de référence de la ligne verte. La mesure de performance "point" reprend la mesure de performance minimale. Seuls les résultats complets des mesures de performances pour l'objectif de réduction de masse sont affichés (m_1 , m_2 , m_3 et m_4).

Ces tableaux identifient donc les solutions qui offrent les meilleurs compromis pour chaque objectif. Mais en fin de compte, il faut une solution unique, qui rassemble au mieux les trois objectifs. Un moyen d'y parvenir consiste à agréger les différents objectifs en une seule fonction objective, formulée de telle sorte que son minimum définisse la solution la plus préférable. Pour ce faire, une fonction de pénalité Z est définie comme suit [40] :

$$Z = \alpha_1 \cdot \dot{m} + \alpha_2 \cdot \dot{P} + \alpha_3 \cdot \dot{IE} \quad (6.11)$$

Le meilleur choix de matériau est celui qui présente le Z le plus petit. Les α_i sont des constantes d'échanges, qui convertissent les unités de performance en unité de Z , qui sont généralement exprimées en € [273]. Les constantes d'échanges sont donc définies comme

$$\alpha_i = \left(\frac{\delta z}{\delta M_i} \right)_{M_j, j \neq i}$$

M_i sont les mesures de performances (m_i, P_i, IE_i). Ces constantes mesurent l'augmentation de la pénalité pour une unité d'augmentation dans une mesure de performance donnée, toutes les autres étant maintenues constantes. Si, par exemple, la métrique M_2 est la masse m , alors α_2 est le changement de Z associé à une augmentation d'unité en masse.

L'équation (6.11) peut se simplifier comme suit :

$$Z = P + \alpha_a \cdot m + \alpha_b \cdot IE \quad (6.12)$$

Les unités de Z sont exprimées en [€], celles de α_a en [€/kg] et celles de α_b en [€/kgCO₂]. En aéronautique, les différents objectifs n'ont pas le même poids d'importance. Par exemple, on estime que le poids du matériau est plus important que le prix de celui-ci, étant donné les gains économisés sur la durée de vie de l'avion. Une valeur de $\alpha_a = 100$ €/kg a été estimée par ASHBY [273]. L'importance de l'empreinte carbone n'a pas de valeur renseignée dans la littérature scientifique. Il a été calculé au CHAPITRE 5 qu'en 2050, les émissions représenteraient jusqu'à 9% des coûts des compagnies aériennes opérant un avion type A320 sur un vol de 500km, en comparaison à environ 15% pour les frais de carburant. Dès lors, une valeur de $\alpha_b = 60$ est estimée dans le cadre de ce travail.

1	Fibres de ramie	$Z=36\,604$ [€]
2	Fibres de sisal	$Z=69\,647$ [€]
3	Fibres de kenaf	$Z=70\,644$ [€]
4	Epoxy renforcé en fibres d'aramide	$Z=94\,045$ [€]
5	PEEK renforcé en fibres de carbone préimprégnées	$Z=233\,636$ [€]
6	Epoxy renforcé en fibres de carbone à résine infusée	$Z=242\,474$ [€]
7	Epoxy renforcé en fibres de carbone préimprégnées	$Z=243\,721$ [€]
8	BMI renforcé en fibres de carbone préimprégnées	$Z=260\,695$ [€]
REF	AA7085	$Z=328\,999$ [€]
9	Epoxy renforcé en fibres de carbone tissée	$Z=396\,657$ [€]
10	Ti6Al4V	$Z=838\,146$ [€]

TABLE 6.4 – Classement des matériaux candidats. Le matériau de référence est repris sur la ligne verte.

On constate, grâce aux résultats du TABLEAU 6.4, l'intérêt énorme de certaines fibres naturelles à pouvoir être utilisées, si pas en matériau seul, en complément ou en renforcement dans des polymères, afin d'établir des candidats sérieux pour l'aéronautique tout en étant plus durables. Les fibres de ramies semblent être les plus intéressantes. Ce résultat n'est pas surprenant, étant donné que des littératures scientifiques corroborent le résultat obtenu dans ce travail, malgré les hypothèses simplificatrices.

Par exemple, Asim et al. [274], auteurs d'un chapitre du livre de référence "*Sustainable composites for aerospace applications* [275], concluent que les fibres naturelles telles que la fibre de ramie peuvent être utilisées en combinaison avec des fibres artificielles existantes afin de créer des composites hybrides pour les futures structures d'avions.

Zhang et al. [276], reprenant en revue et analysant les articles récents traitant des composites renforcés en fibres naturelles telles que les fibres de ramie, sisal et kenaf, présentent ces fibres naturelles comme étant des candidats sérieux pour renforcer des composites pour des structures légères mais fortement sollicitées mécaniquement.

Karthi et al. présentent un article scientifique récent fournissant un vaste aperçu des composites renforcés par des fibres naturelles, de leurs traitements chimiques et de leurs applications, et estiment quant à eux qu'une utilisation de composites renforcés en fibres naturelles peut réduire le poids de la structure des avions de 35% [277], et concluent qu'il est préférable d'utiliser des composites à fibres naturelles étant donné leurs performances mécaniques, leur faible densité, leur coût moins élevé ainsi qu'un impact plus faible sur l'environnement.

Hamidon et al. [278] ont étudié en particulier les traitements appliqués sur la fibre de kenaf et concluent eux aussi, que son utilisation pour remplacer les fibres artificielles dans les composites polymères serait plus bénéfique.

Enfin, Boegler et al. [279] ont réalisé une étude établissant un modèle d'avion de transport civil, où le poids de l'ensemble des éléments constitutifs d'une aile d'avion conventionnel est calculé en utilisant les propriétés des matériaux composites en fibres naturelles définis au préalable et où les résultats sont comparés à une aile de référence (A320) fait d'un alliage d'aluminium de la série 7000, arrivent à la conclusion que l'utilisation de composites à base de fibres de ramie convient justement à la structure des ailes d'avions grâce à la réduction du poids sans compromettre l'intégrité structurelle.

De plus, le résultat de cette analyse comme composite entier le plus prometteur est le polymère polyépoxyde (ou "epoxy") renforcé en fibres d'aramide. Celui-ci est notamment commercialisé par *Solvay* sous le nom "Cycom", et ils le proposent depuis quelques années comme structure primaire pour des composants aéronautiques [280]. Cependant, à l'inverse des fibres naturelles, ce matériau n'est ni recyclable, ni biodégradable. De plus, malgré que son empreinte carbone soit relativement faible pour un composite non naturel, sa production nécessite environ 450 litres d'eau par kilogramme de matériau [269].

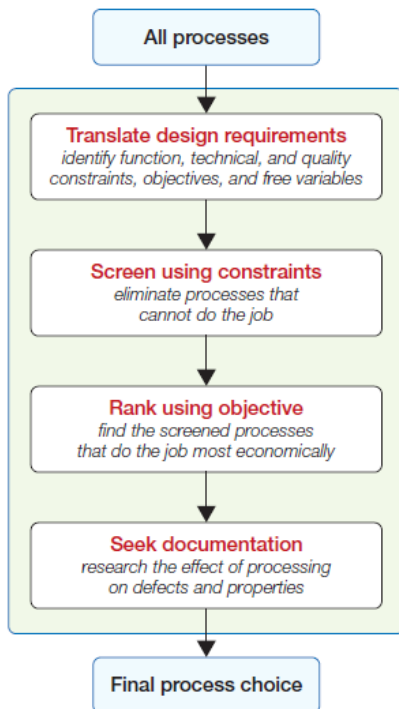
Il faut néanmoins souligner que les composites durables à fibres naturelles présentent des caractéristiques non souhaitables telles que de l'absorption d'humidité détériorant la tenue mécanique ainsi que leur mauvaise résistance à la propagation des flammes [259], rejetant leur utilisation pour des composants en surface.

Au vu des intérêts pour de nouveaux matériaux plus légers et durables pour les futurs potentiels avions décarbonisés, il faut également considérer de nouveaux procédés de fabrication pour leurs mises en forme, et évaluer les coûts engendrés par ces changements de procédés ainsi que l'impact environnemental.

6.3.2 Sélection & analyse de procédés de fabrication

Un procédé de fabrication est une méthode de mise en forme, d'assemblage ou de finition d'un matériau, il en existe des centaines. Le choix, pour une pièce donnée, dépend du matériau de celle-ci, de sa taille, de sa forme, de la précision requise et du nombre de pièces à fabriquer. Il a été démontré que les meilleurs matériaux candidats pour constituer les longerons d'ailes d'avions plus durables seraient des composites renforcés en fibres naturelles. Le meilleur composite déjà commercialisé est l'Epoxy renforcé en fibres d'aramide. Les composites n'existent pas tant qu'ils ne sont pas transformés ; avant le procédé de fabrication, ils ne sont "*qu'une soupe de polymères et une gerbe de fibres*" [281]. Mais il est également important de prendre en considération le coût et l'empreinte carbone associée au moyen de production, afin de garantir une meilleure durabilité de manière plus holistique.

Méthodologie



Les différentes étapes pour la sélection de procédés sont les suivantes :

1. Traduction : analyser la fonction du composant (exigences de conception) et les contraintes (techniques, économiques, etc.).
2. Filtrage : cette étape applique les contraintes, en éliminant les procédés qui ne peuvent pas y répondre.
3. Classement : sélection du procédé le plus adéquat et le moins cher en fonction de la quantité à produire, en utilisant les données quantifiées issues du logiciel CES EDUPACK.
4. Documentation : parmi les procédés candidats, rechercher ceux qui pourraient présenter des problèmes lors de la mise en force du composant, telle qu'induire des défauts ou atténuer les propriétés du matériau.

Il faut aussi vérifier le gain écologique, au niveau de l'impact environnemental, afin de garantir que le nouveau procédé est plus durable que celui de référence.

FIGURE 6.10 – Procédure pour la sélection de procédés de fabrication [281].

Analyse

Traduction L'étape de la traduction consiste à préciser quelle est la fonction spécifique du composant, les objectifs, les contraintes et les variables libres. Le but du longeron est donc de reprendre une série d'efforts que les ailes d'un avion subissent en vol. La sélection d'un procédé se concentre sur trois objectifs : la minimisation des coûts, la minimisation du temps et la maximisation de la qualité. Il faut cependant tenir compte de certaines contraintes : le longeron présente une forme 3D non-circulaire (forme en "I"), solide et dont le matériau est un composite. Les dimensions sont telles qu'il aurait une masse d'environ 55 kg (Epoxy renforcé en fibres d'aramide) ou 75 kg (AA7085), variant légèrement en fonction de l'épaisseur. La rugosité doit être au moins aussi bonne que celle obtenue via le procédé de référence, et une bonne précision géométrique ($\simeq 0.5\text{mm}$ [282]) est attendue étant donné son placement dans l'aile et son interaction envers d'autres composants. Enfin, les variables libres sont le procédé de fabrication et les conditions de fonctionnement.

Filtrage L'étape de sélection suivante consiste à passer au crible tous les processus existants avec le logiciel CES EDUPACK pour ne garder que les processus adaptés pour le cas d'étude. Pour ce faire, les contraintes précédemment établies à propos du type de matériau, du type de forme et de la gamme de masse ont été appliquées, afin d'éliminer les procédés ne répondant pas à ces critères. En outre, les procédés de prototypage ont été ignorés.

A l'issue de cette étape, il reste quatre procédés répondant aux contraintes et exigences de conception : le moulage, la pultrusion (extrusion par tirage), le moulage par injection-réaction et le placement automatique de fibres. Ces 4 procédés sont schématiquement représentés, et ce respectivement, sur les FIGURES 6.11, 6.12, 6.13 et 6.14. Le procédé de fabrication pour l'alliage de comparaison est typiquement l'extrusion à chaud [272]. Ce procédé, illustré sur la FIGURE 6.15, sera inclus dans la comparaison économique qui va suivre.

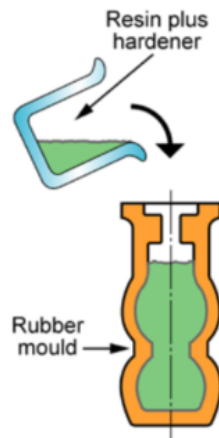


FIGURE 6.11 – Moulage [269].

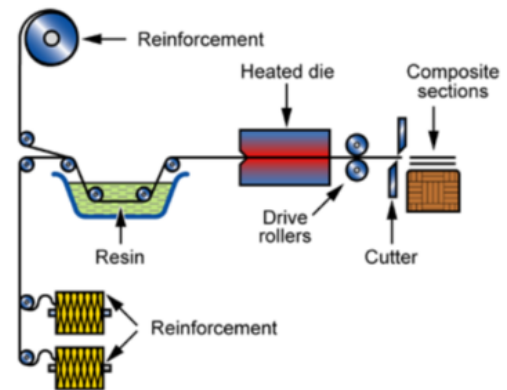


FIGURE 6.12 – Pultrusion [269].

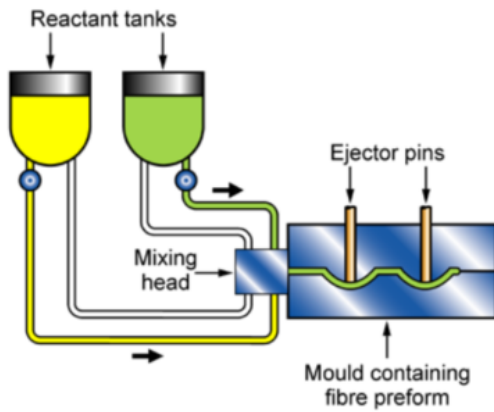


FIGURE 6.13 – Moulage par injection-réaction [269].

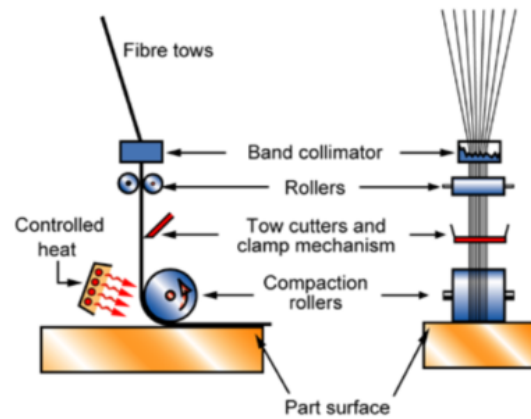


FIGURE 6.14 – Placement automatique de fibres [269].

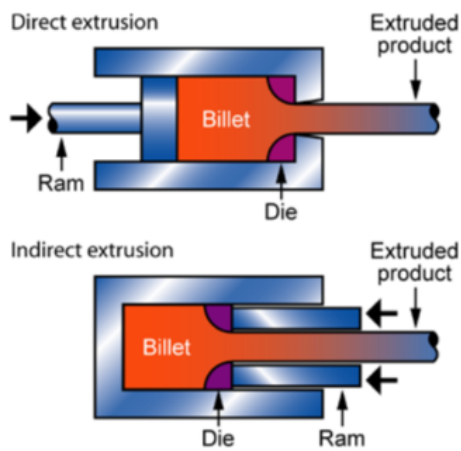


FIGURE 6.15 – Extrusion de métaux à chaud [269].

Classement Lorsque différents procédés candidats sont valables, un classement est rendu possible via une comparaison économique. Une partie du coût de tout composant est la dépense du matériau à partir duquel il est fabriqué. Le reste est le coût de fabrication (mise en forme, et éventuellement assemblage et finition). Le critère économique de comparaison et de sélection repose sur la taille du lot à produire, car le meilleur choix est celui qui coûte le moins cher en fonction de la quantité de composants fabriqués.

Le prix d'un composant (€/pièce) se modélise comme la somme de différents frais [283] :

Le coût du matériau

$$C_1 = \frac{m \cdot C_m}{1 - f} \quad (6.13)$$

- C_m : le prix d'un kg du matériau [€]
- m : la masse du composant [kg]
- f : fraction de copeaux (pertes de matériaux, [/])

Le coût de l'outillage

$$C_2 = \frac{C_t}{n} \left(\text{Int} \left(\frac{n}{n_t} + 0.51 \right) \right) \quad (6.14)$$

- C_t : le prix de l'outillage [€]
- n : le nombre de composants à produire [/]
- n_t : le nombre de composants réalisables avant le renouvellement de l'outillage [/]
- Int : fonction entière

Le coût de l'équipement

$$C_3 = \frac{1}{\dot{n}} \left(\frac{C_c}{L \cdot t_{wo}} \right) \quad (6.15)$$

- C_c : coût de l'équipement [€]
- t_{wo} : période d'amortissement du capital [/]
- $\dot{n}$: productivité [composants/h]
- L : fraction d'utilisation effective de l'équipement [/]

Le coût horaire (main d'oeuvre, énergie, gestion, recherche et développement, etc.)

$$C_4 = \frac{C_{oh}}{\dot{n}} \quad (6.16)$$

- C_{oh} : coût horaire [€/h]

Le prix total d'une pièce est la somme des équations (6.13), (6.14), (6.15) et (6.16) :

$$C = \frac{m \cdot C_m}{1 - f} + \frac{C_t}{n} \left(\text{Int} \left(\frac{n}{n_t} + 0.51 \right) \right) + \frac{1}{\dot{n}} \cdot \left(\frac{C_c}{L \cdot t_{wo}} + C_{oh} \right) \quad (6.17)$$

Le coût comporte donc trois contributions essentielles : un coût matériel par unité de production, qui est indépendant de la taille et de la cadence du lot à produire, un coût spécifique par unité de production qui varie comme l'inverse du volume de production ($\frac{1}{n}$), et des frais généraux bruts par unité de production qui varient comme l'inverse de la cadence de production ($\frac{1}{\dot{n}}$). L'équation décrit un ensemble de courbes reliant le coût à la taille du lot pour chaque procédé.

Les différentes données de l'équation (6.17) sont fournies par fourchettes par CES EDUPACK. Dans le cadre de ce travail, les prix moyens ont été pris en considération, ce qui permet d'obtenir les résultats de la FIGURE 6.16.

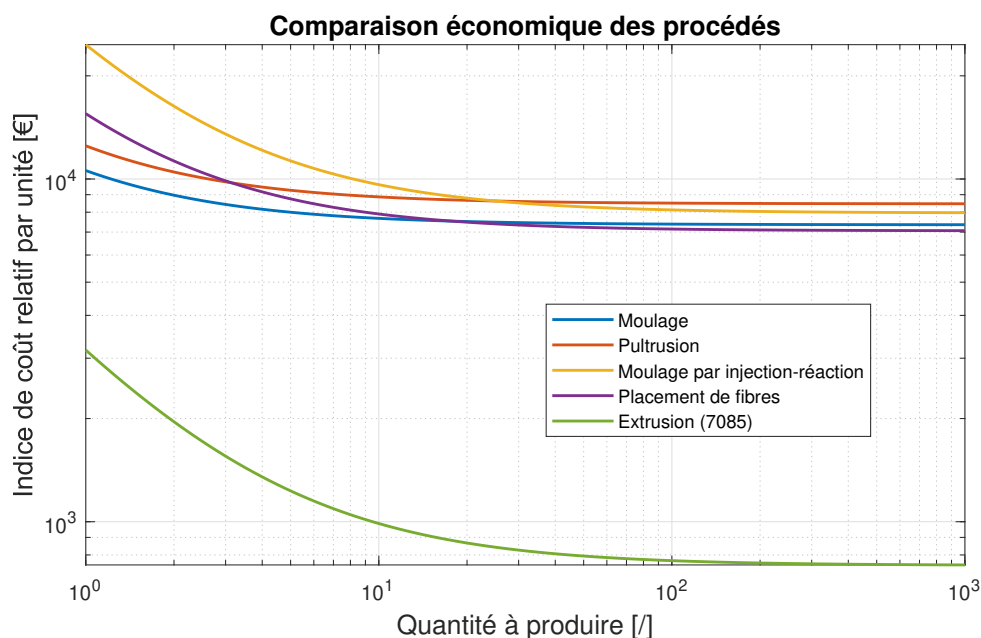


FIGURE 6.16 – Graphe montrant la comparaison économique des 5 procédés candidats avec celui pour le matériau de référence (courbe verte).

Le premier résultat sur la FIGURE 6.16 montre que les procédés pour fabriquer des longerons en composites sont dans tous les cas plus chers d'un facteur 10 comparé au procédé pour fabriquer le longeron en métal. Plus clairement, la FIGURE 6.17 reprend uniquement les procédés concernant le longeron en composites.

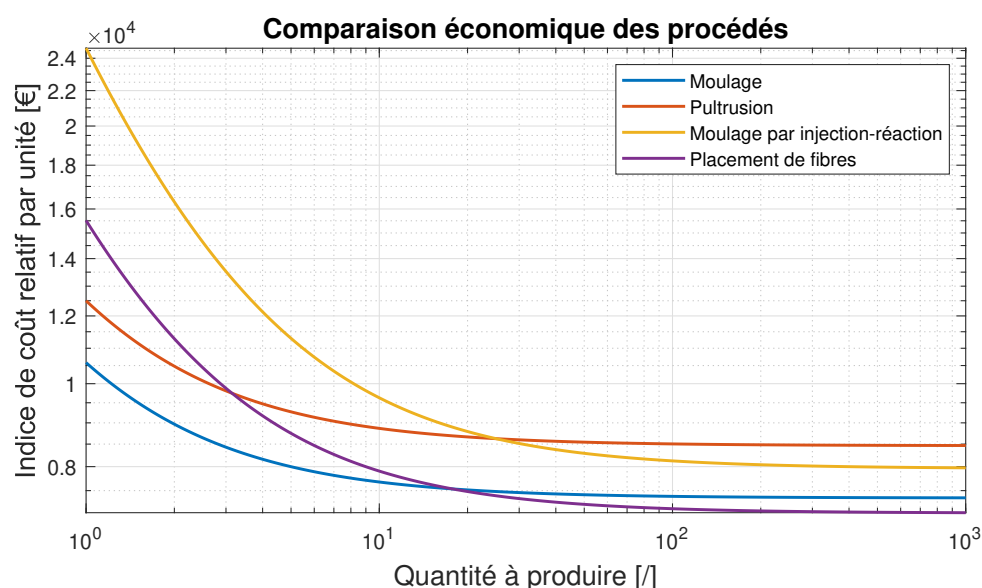


FIGURE 6.17 – Graphe montrant la comparaison économique des 5 procédés candidats pour le composite.

Certains procédés sont toujours économiquement moins intéressants, indépendamment de la quantité de lon-

gerons à produire, tels que le moulage par injection-réaction et la pultrusion.

De plus, on remarque sur la FIGURE 6.17 que si la quantité de composants à produire est supérieure à environ 20, la méthode par pose de fibres est la plus intéressante. Il s'agit d'une des techniques de fabrication automatisées de composites les plus répandues. Les fibres sont déposées par une tête de pose portée par une machine multi-axes à commande numérique. Les fibres, stockées en bobines, sont transportées par des rouleaux jusqu'à la tête de pose [284]. Pour une production de moins de 20 composants, c'est le moulage qui semblerait être le choix optimal.

Cependant, les résultats de ce graphe se basent sur des valeurs moyennes. Les coûts d'investissement, par exemple, dépendent de ce que les entreprises possèdent déjà. En effet, les longerons de l'avion militaire A400M, ayant effectué son premier vol en 2009 [285], sont en composites renforcés en fibres de carbone (les premiers éléments d'aile d'avion fabriqués en composite pour un Airbus [286]) et sont produits par la méthode de placement de fibres. Ceci implique que si Airbus voulait un avion plus durable dont certains composants seraient conçus en composites renforcés en fibres naturelles par exemple, le choix du procédé pourrait être par placement de fibres étant donné que l'investissement a déjà été réalisé.

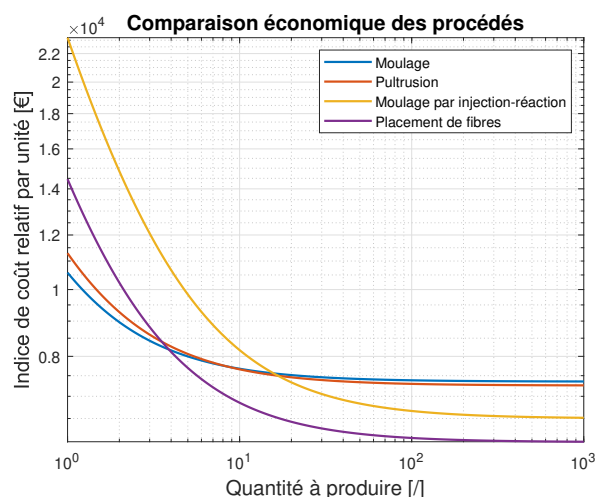


FIGURE 6.18 – Graphe montrant la comparaison économique des procédés en négligeant l'investissement.

En retirant les frais d'investissement dans les calculs, nous obtenons les résultats repris sur la FIGURE 6.18. Le cas d'étude de ce travail, pour rappel, est un longeron d'un avion type Airbus A320. Dans le cas d'Airbus, le choix du procédé pour un longeron d'un futur monocouloir type A320 plus durable, éventuellement décarbonisé en étant un ATE, serait donc le placement de fibres, car il ne serait pas nécessaire d'investir et il s'agit du meilleur résultat. Pour une start-up, le choix optimal se jouerait entre le moulage et le placement de fibres, en fonction de la quantité à produire.

Documentation Étant donné que ce composant sera inclus dans l'aile, en assemblage avec d'autres éléments, des précisions dimensionnelles exigeantes sont de mise. De plus, une rugosité très faible est nécessaire, car la rugosité agit comme point d'initiation pour des fissures de fatigue, vu que le composant sera soumis à des chargements cycliques. De plus, certains procédés risquent d'induire des défauts à éviter dans ce genre de composant.

Une documentation pertinente permet d'évaluer et de vérifier si le composé le plus économique est également le plus pertinent pour réaliser la pièce. Premièrement, il faut vérifier que les contraintes de précisions dimensionnelles exigées de 0.5 mm soient respectées et celles de rugosité soient au moins du même ordre de grandeur que par extrusion pour l'alliage de référence. Les résultats, compilés à l'aide de CES EDUPACK, sont repris respectivement aux FIGURES 6.19 et 6.20.

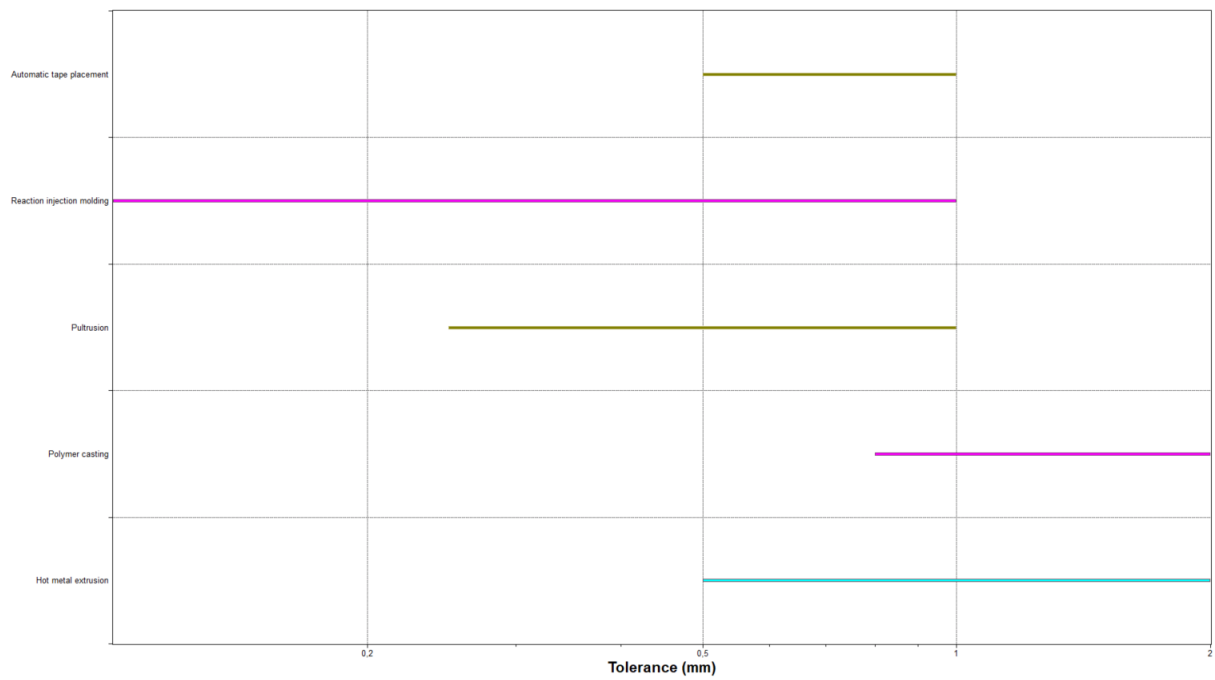


FIGURE 6.19 – Graphe de la comparaison des précisions dimensionnelles atteignables pour les procédés sélectionnés.

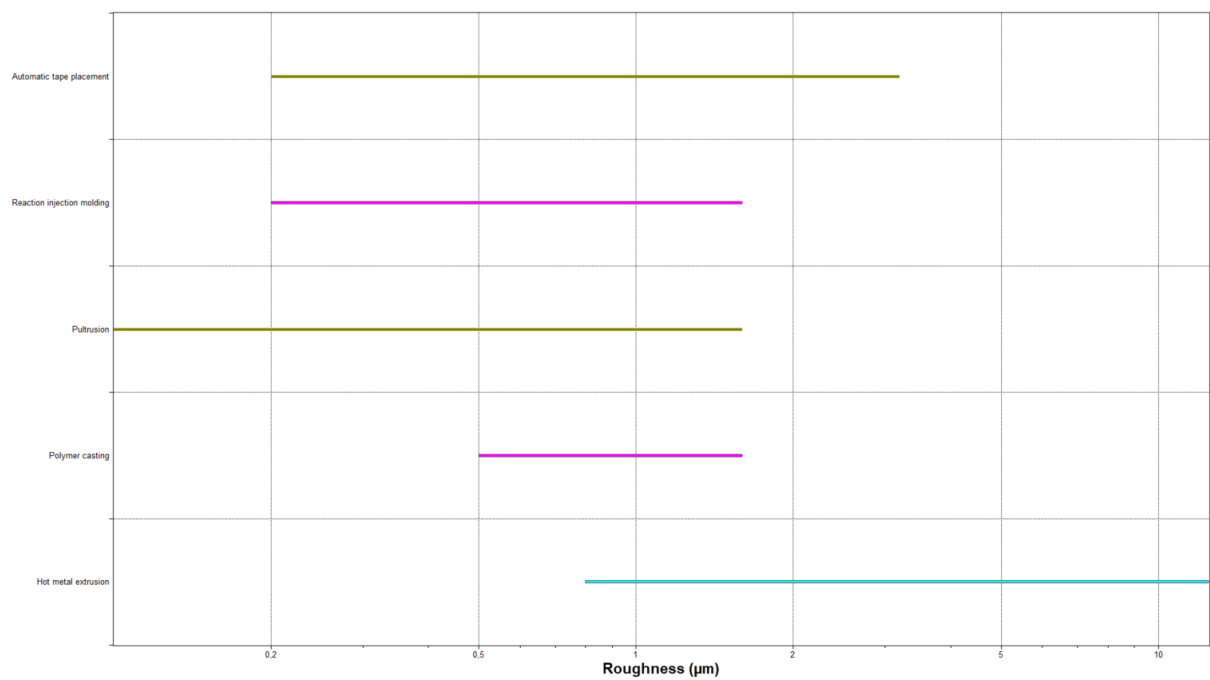


FIGURE 6.20 – Graphe de la comparaison du niveau de rugosité atteignable pour les procédés sélectionnés.

Ensuite, il faut également vérifier l'intérêt durable dans la production d'un composite renforcé en fibres naturelles. En utilisant les données de CES EDUPACK, un composite Epoxy renforcé en fibres naturelles de ramie est supposé et comparé à l'alliage de référence. Cette analyse s'effectue grâce à l'*eco-audit tool* du logiciel. Cela permet d'évaluer la quantité d'énergie nécessaire, ainsi que l'empreinte carbone liée à l'utilisation d'un certain matériau, à la fabrication du composant, au moyen de transport éventuel nécessaire pour son acheminement et enfin à l'utilisation. Les deux derniers critères ne sont pas pris en considération étant donné que le logiciel ne propose pas (encore) d'estimation pour l'utilisation d'un composant dans un ATE, et que le transport est considéré comme identique dans les deux situations.

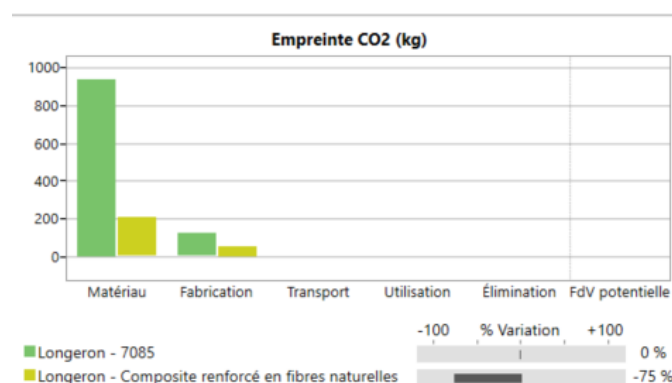


FIGURE 6.21 – Eco-audit du longeron fabriqué en AA7085 et en composite renforcé en fibres naturelles - empreinte carbone.

Le résultat concernant l'empreinte carbone est repris à la FIGURE 6.21. On voit qu'une réduction de 75% est atteinte, principalement grâce à l'utilisation d'un matériau plus durable mais le procédé par placement de fibres est également moins polluant. Concernant l'utilisation, même si les deux composants étaient utilisés dans un avion conventionnel alimenté au kérosène, il y aurait tout de même une réduction de 8% de l'empreinte carbone sur la durée de vie estimée de 30 ans comparée à celle induite par le longeron en AA7085. Cependant, les composites ne sont pas recyclable.

Enfin, les procédés de fabrications de composants peuvent parfois induire des défauts dans la pièce, ne garantissant dès lors plus l'intégrité mécanique du composant. Le procédé le plus économique, par placement de fibres, présente certains défauts comme un mauvais alignement ou un chevauchement de fibres, mais il a été démontré que ce genre de défauts ne provoquait pas une baisse majeure de la tenue mécanique [287], sauf si le défaut est provoqué de manière systématique. En outre, les défauts du cheminement des fibres, qui sont préjudiciables à l'intégrité structurelle des composants en composites, peuvent être minimisés grâce à l'optimisation du procédé [288].

Les procédés par moulage tendent à provoquer un matériau plus poreux [289], avec des présences de défauts internes tels que des impuretés. Ce genre de défauts est une source d'initiation de fissures par fatigue, ce qui peut être critique dans le cas d'un longeron d'aile d'avion.

La pultrusion est le procédé de fabrication de matériaux composites qui connaît la croissance la plus rapide, mais la fabrication de pièces pultrudées n'est pas une tâche simple, car elle implique le contrôle adéquat du transfert de chaleur et de la cinétique de durcissement de la matrice de résine. En fait, un contrôle minutieux de toute la procédure de fabrication est nécessaire pour éviter les pièces pultrudées défectueuses, qui peuvent présenter une répartition inégale des fibres et induire des fissures ou des porosités [290].

6.4 Conclusion

La sélection de matériaux joue un rôle crucial dans la détermination de matériaux candidats pour une application spécifique. Le logiciel CES EDUPACK, qui assure une bonne visualisation et fournit une base de données de ces matériaux, a été utilisé afin de réaliser cette étude introductive. Dans le cadre du résultat du cas d'étude relatif au longeron basé sur la méthodologie de conception à contraintes et objectifs multiples d'ASHBY, l'utilisation de composites, tels que l'Epoxy renforcé en fibres d'aramide, est préférée au AA7085, mais la potentielle utilisation de composites renforcés en fibres naturelles, qui pourraient représenter des matériaux alternatifs plus durables et plus performants pour la conception des avions décarbonisés, semble être prometteuse.

L'approche présentée dans ce chapitre défend l'utilisation des connaissances en matériaux pour développer de manière durable de nouveaux composites pour leur utilisation dans les structures des futurs potentiels avions décarbonisés. En effet, les structures légères en matériaux composites présentent de très bonnes propriétés mécaniques à faible densité et permettent donc de réduire les besoins énergétiques des avions pour réaliser des vols. Les composites de haute performance utilisés aujourd'hui dans l'aviation conventionnelle sont principalement basés sur des composants artificiels tels que les fibres de carbone. Les matériaux naturels comme les fibres de ramie offrent des caractéristiques très prometteuses mais n'ont pas encore trouvé leur place dans l'aviation [291]. Il s'agit de matériaux recyclables produits à partir de sources renouvelables et avec des techniques de production qui ont généralement une demande énergétique inférieure à celle de la production de fibres synthétiques. Ces fibres sont perçues comme durables car elles sont abondantes, peu coûteuses et biodégradables [261]. Comme toutes les fibres végétales, elles présentent cependant quelques inconvénients majeurs, comme la variation des propriétés physiques en fonction des conditions de croissance, de récolte et de transformation et une sensibilité à l'humidité [292]. Dans un avion conventionnel long-courrier récent qui est l'A350, les longerons sont déjà réalisés en composite comme 53% de la structure de l'avion. Cependant, les composites renforcés en fibres naturelles ne conviendraient donc pas pour le fuselage extérieur des avions, dû à l'exposition à l'humidité. Il serait donc opportun d'exploiter ce genre de matériaux pour des structures primaires internes telles que les longerons, et pour des structures secondaires ou intérieures telles que les boucles et attaches de ceintures de sécurité.

La sélection de procédés a montré l'impact économique que représente le passage vers des matériaux plus complexes à produire tels que les composites. Les longerons en composites seront effectivement environ 10 fois plus chers à produire que leurs homologues en alliage d'aluminium. Malgré cela, ces matériaux sont plus légers, réduisant les coûts opérationnels grâce au gain en masse, et possèdent une empreinte carbone liée à la production 75% plus réduite dans le cas de composites renforcés en fibres naturelles.

Finalement, une fois le matériau et le procédé de fabrication sélectionnés, des études et simulations plus poussées seront nécessaires pour valider les choix. En effet, les méthodologies de sélection de matériaux et de procédés utilisées ci-dessus agissent comme première étape systématique, en incluant un indicateur de durabilité. Le rétrécissement de choix aide considérablement afin de restreindre l'approfondissement de recherches uniquement à des matériaux et procédés valables et viables. Mais le choix final dépendra toujours des facteurs économiques et organisationnels propres à chaque entreprises, tels que la situation du fabricant, son matériel, ses compétences, et qui ne peuvent donc être décidés qu'au cas par cas.

Chapitre 7

Synthèse

La synthèse consiste, suivant la méthodologie de MICHAEL F. ASHBY, à rassembler et résumer les faits et analyses développés aux chapitres précédents pour former un jugement équilibré de leurs impacts sur les trois piliers du développement durable, qui sont les capitaux social, économique et environnemental, comme repris sur la FIGURE 7.1.



FIGURE 7.1 – Synthèse - débattre de l'impact des analyses sur les trois capitaux du développement durable [293].

- La dimension **sociale** promeut le développement de la société en garantissant les besoins de la population et en respectant l'équité sociale, sur des questions de santé, de consommation, de culture, d'éducation, d'emploi, d'éthique, etc.
- La dimension **économique** promeut la croissance des richesses et de l'efficacité économique pour parvenir à une prospérité.
- La dimension **environnementale** promeut l'adaptation des modes de vie aux besoins et ressources de notre planète. Il s'agit donc de réduire l'impact anthropique sur l'environnement et les ressources naturelles, afin d'assurer la transmission du capital naturel aux générations futures.

Tout d'abord, la FIGURE 7.2 reprend, de manière brève et schématique, un résumé des éléments importants des faits analysés aux chapitres précédents concernant l'étude d'une aviation commerciale décarbonisée (ACD), en se concentrant principalement sur le système de propulsion.

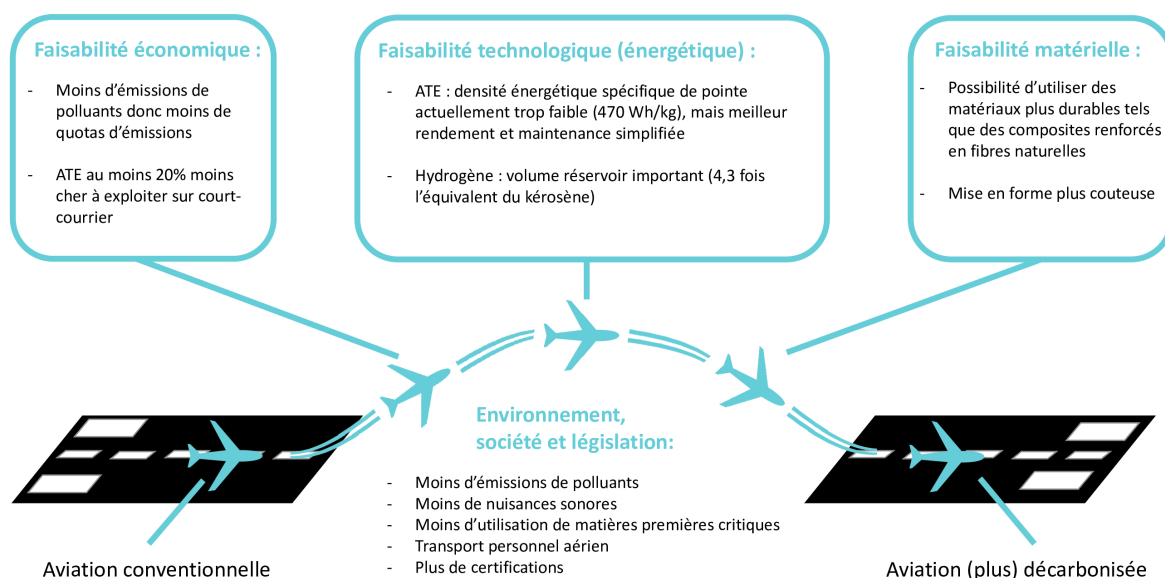


FIGURE 7.2 – Aperçu schématique des principaux éléments abordés aux chapitres 2 à 6.

Ce travail a débuté par la mise en place du contexte actuel de l'aviation conventionnelle, en présentant ses principaux défauts tels que les impacts sur l'environnement et sur la santé. Ensuite, les différents acteurs impliqués de près ou de loin ont été identifiés, afin de pouvoir déterminer ensuite dans quelle mesure ceux-ci jouiront ou souffriront d'un passage vers une ACD. Après, une recherche et analyse de faits a été effectuée pour les thématiques environnementale, sociétale, législative, énergétique, économique et matérielle. Les interprétations de ces faits, résumés sur la FIGURE 7.2, et de leurs impacts sur les piliers du développement durable sont repris synthétiquement dans le TABLEAU 7.1.

TABLE 7.1 – Synthèse des impacts sur les trois piliers du développement durable

	Dimension sociale	Dimension économique	Dimension écologique
Environnement	- Meilleure qualité de l'air au voisinage des aéroports ; - Mobilité urbaine facilitée et améliorée ;	- ATE promeut le développement des énergies renouvelables ; - Diminution des coûts liés à la pollution ;	- Meilleure qualité de l'air aux voisinages des aéroports ; - Empreinte carbone en vol faible ou nulle (ATE) ;
	/	- Augmentation du nombre d'aéroports régionaux (urbanisation) ;	/
Société	- Plus de <i>Flight Shame</i> pour les vols décarbonisés ; - Mobilité plus verte accessible également au transport aérien ; - Déplacements multimodaux ;	- Création d'emplois dans divers secteurs tels que les matériaux aéronautiques ou dans la recherche et développement de batteries ;	- Alternative aux déplacements parfois trop longs en voiture ou en train ;
	- Augmentation possible du nombre de voyageurs et de la fréquence de voyages ;	- Perte d'emplois possible dans des domaines liés à l'utilisation de kérosène comme carburant ;	/
Législation	/	- Plus besoin de taxes sur le carburant ;	- Nouvelles législations promouvant l'économie circulaire grâce notamment aux développements des énergies renouvelables et du recyclage des matériaux ;
	- Besoin de nouvelles lois et règlements ;	- Les lois additionnelles sur le traitement des déchets en fin de vie apporteront des frais supplémentaires ;	/

	Dimension sociale	Dimension économique	Dimension écologique
Énergie	- Soutien à la croissance de métiers relatifs aux moteurs électriques, aux batteries, à l'hydrogène, etc.; - Développement de production d'énergies renouvelables, promouvant ainsi la décroissance de l'utilisation et de la production d'énergie conventionnelle polluante, dangereuse ou non durable telle que le nucléaire ou le charbon ;	- Création d'emplois dans le secteur de l'énergie verte ;	- Soutien à la croissance du développement des énergies renouvelables ; - ATE présente un meilleur rendement énergétique : diminution de la consommation d'énergie au kilomètre ;
	- Diminution d'emplois dans le secteur pétrolier ; - Nécessite des moyens de production d'énergie (verte) supplémentaires ; - Investissements nécessaires pour adapter les infrastructures aéroportuaires aux nouveaux avions décarbonisés ;	- Diminution de la demande en énergie pétrolière ;	- Énergie grise plus élevée dû aux cycles de vie des avions plus électriques, des batteries, etc ; - Pollution liée à l'extraction des matières premières, en particulier pour les batteries (lithium) ;
Économie	- Création d'emplois dans le secteur aérien, énergétique et technologique ; - Réduction des frais d'opération pour les compagnies aériennes ; - Probable réduction des prix des voyages court-courriers en avion ; - Possible perte d'emplois dans le secteur énergétique ;	- Probable diminution des frais quotidiens des compagnies aériennes opérant des ATE ; - Nécessite des investissements importants pour de nouvelles infrastructures nécessaires à une aviation décarbonisée ;	/
Matériaux	- Soutien à la croissance de métiers relatifs aux composites et matériaux naturels ;	- Matériaux plus légers permettant un gain économique sur les frais d'exploitation ; - Diminution de la dépendance envers les pays producteurs de matières premières grâce aux alternatives aux terres rares dans les systèmes de propulsion ; - Frais et durées de maintenance réduits ;	- Moins de matières premières critiques requises pour les systèmes de propulsion d'un ATE ; - Possibilité d'exploiter des matériaux naturels, recyclables et à plus faible empreinte carbone ;
	- Mauvaises conditions de travail et exploitation des enfants dans les pays extracteurs de ressources premières ;	- L'utilisation de composites est plus coûteuse à l'achat ; - Les composites présentent un coût de mise en forme plus cher que les métaux ;	- Augmentation de l'électrification des systèmes embarqués nécessitant plus de ressources minérales ;

Chapitre 8

Réflexion

Une aviation commerciale décarbonisée est-elle faisable et durable ?

Il s'agit d'une question ouverte et il n'est pas aisé d'y apporter une réponse unique et certaine. Au contraire, comme l'a montré ce travail, étudier la durabilité et la faisabilité d'un produit ou d'un service relève d'une certaine complexité. Cependant, il est tout à fait possible d'en tirer une réflexion pour arriver à des pistes de conclusions et des perspectives, grâce à l'analyse par couches développée par MICHAËL F. ASHBY.

Enjeux technologiques Les batteries de technologies avancées (Li-S, Li-air) possèdent une valeur de densité énergétique théorique 4 à 10 fois supérieure aux batteries Li-ion actuelles. Cependant, celles-ci ne contiendraient encore que 6 à 17 % du contenu énergétique par unité de poids du kérosène (bien que le stockage électrochimique permette une meilleure conversion d'énergie que les turbines à gaz). Les ATE seraient donc limités aux vols de courte distance, du moins au début. Comme représenté au CHAPITRE 2 sur la FIGURE 2.1 et translaté en chiffres sur la FIGURE 5.4, plus de la moitié des vols est inférieure à 1000 kilomètres et pourrait donc être couverte par des ATE possédant des batteries ayant une densité énergétique d'environ 800 [Wh/kg], en supposant une masse réaliste des batteries relative à celle de l'avion (environ 30% de la masse brute au décollage, comme calculé au CHAPITRE 4). Bien qu'une densité énergétique plus élevée puisse conduire à une augmentation du RA, il y a des restrictions dues aux limites technologiques. Opérer un vol de plus de 1700 [km] (distance couvrant environ 80% des vols mondiaux en 2014) en une seule étape nécessiterait une densité énergétique d'au moins 1800 [Wh/kg], ce qui peut rester un défi technologique pour les décennies à venir. Des vols plus longs seraient cependant réalisables avec des arrêts intermédiaires, mais au détriment du temps de voyage et du confort des passagers. Toutefois, cette stratégie impliquerait probablement une diminution de la demande de voyages en avion. En outre, la capacité des aéroports pourrait être un frein à la multiplication de vols avec escales.

Un autre problème technologique concernant les batteries ayant une application en aéronautique est leur limitation en puissance spécifique. Certaines phases de vol, comme le décollage, peuvent nécessiter entre 3 et 4 fois plus de puissance que le vol en croisière. Les batteries doivent donc être capables de se décharger suffisamment rapidement pour répondre à cette demande, et ce, pendant toute la durée de la phase. Ainsi, l'exploitation des ATE resterait probablement limitée au trafic court-courrier dans un premier temps, sauf dans le cas de progrès significatifs dans la technologie des batteries ou de changements radicaux dans le comportement des consommateurs. Aussi, la fin de vie des batteries doit également être étudiée afin de déterminer des solutions durables telles qu'une recyclabilité ou une seconde utilisation dans un autre contexte moins exigeant, comme par exemple le stockage stationnaire à une station de recharge sur autoroute.

On peut également souligner que la gestion thermique des moteurs électriques constitue, elle aussi, un défi technologique. Si les moteurs électriques sont plus efficaces que les réacteurs, ces derniers rejettent presque toute la chaleur résiduelle dans l'air ambiant. Comme les composants électriques sont situés à l'intérieur de l'avion, le refroidissement ambiant ne suffit pas à maintenir les composants électroniques à leur température de fonctionnement optimale. D'autre part, les systèmes d'alimentation électrique supraconducteurs éliminent le chauffage

par résistance mais il est nécessaire de maintenir les matériaux supraconducteurs suffisamment froids par rapport à la température de l'air ambiant. Il faut généralement les maintenir à des températures de l'ordre de -200°C , mais des recherches récentes ont mis en évidence un matériau supraconducteur ayant une température de fonctionnement de -13°C [294]. Ainsi, les deux technologies nécessiteront des systèmes de gestion thermique qui devront être pris en compte lors de la phase de conception.

Il faut également prendre en considération l'impact sur le réseau électrique qu'une flotte complète d'ATE pourrait engendrer. Il a été vu au CHAPITRE 2 que 86 avions décollent chaque minute. Parmi ceux-ci, presque 60 % sont effectués sur des distances inférieures à 1000 [km]. Dès lors, en reprenant l'hypothèse du CHAPITRE 5 d'un ATE ayant une consommation spécifique de 21.14 [kWh/km], cela représenterait une demande en énergie annuelle d'environ 0.6 [TWh]. Sachant que les batteries devraient être rechargées au moins une fois en journée, une étude d'impact sur la demande en énergie supplémentaire devrait être réalisée afin de garantir une infrastructure fiable. De même, les infrastructures nécessaires aux aéroports pour la recharge ou le changement de batteries devraient être évaluées.

L'abandon des réacteurs thermiques implique également l'impossibilité de puiser de l'air frais venant de l'extérieur, ce qui, en temps normal, se réalise au niveau des compresseurs du réacteur. Il n'y aura donc plus que de l'air recyclé, et non plus un mélange d'air frais et recyclé comme c'est le cas actuellement dans les avions conventionnels modernes. Toutefois, il y a un avantage dans le fait que les moteurs électriques ne sont pas affectés par le changement de densité de l'air en haute atmosphère. Ils peuvent donc voler à une gamme plus étendue d'altitudes, ce qui permet de définir l'altitude optimale ayant le meilleur coefficient de portée et donc la meilleure finesse possible. Cela nécessiterait moins d'énergie, en plus de présenter un meilleur rendement énergétique par rapport aux moteurs à combustion interne.

Enjeux environnementaux L'enjeu environnemental est la motivation principale poussant à étudier une aviation décarbonisée. Les ATE élimineraient complètement les émissions directes inhérentes au processus de combustion et limiteraient le réchauffement climatique indirect lié aux traînées de condensation. L'empreinte carbone sur le cycle de vie des ATE est déterminée par l'intensité en CO_2 de l'électricité utilisée, les pertes associées à la charge des batteries et à la transmission et distribution de l'électricité, ainsi que par la conception et la fin de vie de l'avion. Le bilan écologique d'un ATE effectué au CHAPITRE 4 conclut qu'un ATE aurait une empreinte écologique, exprimée en [$\text{gCO}_2/\text{passager.km}$], environ cinq fois inférieure à celle d'un avion conventionnel, et celle-ci diminuerait encore avec l'amélioration de la technologie des avions et des batteries et la transition potentielle du réseau vers les énergies renouvelables. Cependant, une autonomie plus grande entraînerait une augmentation de l'énergie requise et donc de l'intensité carbone en raison du poids supplémentaire des batteries, comme le montre l'équation (4.7). Bien que la pollution atmosphérique indirecte se produise en fonction des méthodes de production d'électricité utilisées, le potentiel de contrôle des émissions liées à la production d'électricité au sol sera toujours plus aisé que celui de la combustion en vol.

La pollution sonore des ATE devrait être réduite par rapport aux avions conventionnels, en fonction de la conception. Cela pourrait permettre à l'aéroport d'étendre les heures d'ouverture, ce qui augmenterait la plage d'utilisation des pistes et donc la capacité des aéroports, pouvant ainsi permettre un plus grand nombre de petits avions, électriques, et moins bruyants plutôt qu'un seul avion conventionnel de grande taille et plus polluant. Au décollage, le bruit des avions est principalement déterminé par la poussée des moteurs. En raison d'un meilleur rendement et de l'absence du bruit de combustion, les riverains à proximité directe des pistes seraient probablement moins dérangés. Il faut cependant aussi souligner que l'industrie de l'aviation génère des émissions de GES et autres polluants par les véhicules aéroportuaires, ainsi que ceux utilisés par les employés et les passagers pour se rendre à l'aéroport et le quitter.

De même, les avions décarbonisés requièrent moins de matériaux critiques, mais il en reste malgré tout tels que ceux utilisés pour la fabrication des batteries. Il faut donc se poser la question de savoir s'il y aura assez de matières premières comme le lithium pour garantir la production de batteries pour le marché aérien et celui de la voiture électrique, en plein essor. Aussi, il faudra veiller à examiner les méthodes d'extraction et de production,

souvent préoccupantes, des matières premières comme le lithium et favoriser le développement de nouveaux moyens plus respectueux de l'environnement et de la main d'œuvre. De plus, une analyse du cycle de vie des batteries utilisées, en mettant l'accent sur l'approvisionnement, la production et la recyclabilité, n'a pas été réalisée au cours de ce travail et est également recommandée dans de futures recherches.

En outre, la transition de l'aluminium vers les composites pour les matériaux composant la structure et l'intérieur de l'avion permet de réaliser des gains de masse significatifs, ce qui permet d'utiliser moins d'énergie pour faire voler un ATE. Comme l'a démontré l'étude au CHAPITRE 6, l'utilisation de composites renforcés en fibres naturelles permettra de surcroît de diminuer davantage l'impact sur l'environnement. Il faut néanmoins se pencher sur le cycle de vie complet des avions. La clé d'une aviation plus verte ne vient en effet pas seulement de l'avion en lui-même, mais également du côté des fabricants de l'industrie aéronautique au travers du cycle de vie complet du produit. Et dans ce cas, il est nécessaire d'exploiter des processus de fabrication efficaces, plus écologiques et plus durables pour la production complète d'ATE et leur démantèlement en fin de vie.

Enjeux économiques Par rapport aux avions à turbine à gaz, les avions décarbonisés tels que les ATE auraient une structure de coûts d'exploitation relativement similaire, bien que des différences inhérentes au nouveau système de propulsion sont à prendre en compte. Comme l'a démontré l'étude économique au CHAPITRE 5, un ATE présente un potentiel non négligeable de gain économique pour la compagnie aérienne, celui-ci variant entre 43% et 20% respectivement en appliquant l'hypothèse de réduction des coûts liés aux frais de maintenance ou en considérant ces frais comme identiques. Cependant, au cours de sa durée de vie, un ATE peut nécessiter plusieurs générations de batteries potentiellement coûteuses. Bien que les prix des batteries soient en baisse grâce au développement du secteur automobile électrique, l'investissement initial (via le premier jeu de batteries) et la contribution aux coûts de maintenance (via les batteries de remplacement) sont à prendre en compte. En outre, le poids plus élevé de l'ATE à l'atterrissage, dû aux batteries, pourrait accroître les besoins d'entretien de certains composants comme le train d'atterrissage. Il faut donc souligner que le gain potentiel se base sur des hypothèses et que les frais réels ne peuvent pas être actuellement estimés avec précision. Les ATE devraient néanmoins réaliser des économies substantielles. En effet, ils n'auraient pas besoin d'un système lié au carburant ou d'une turbine à gaz supplémentaire (APU) pour la production d'électricité, le démarrage des moteurs, etc. En outre, il est possible de réduire les coûts de maintenance des moteurs grâce à la simplicité mécanique des moteurs électriques. Il faut cependant une nouvelle fois mettre cela en perspective étant donné les difficultés de refroidissement de ces futurs moteurs électriques supraconducteurs.

En supposant un avion conventionnel de type A320, effectuant 4 vols d'une heure par jour, tous les jours pendant 1 an, il consommera environ 4 562 500 litres de kérosène, au prix de 0.63 [€/l], cela impliquerait un coût énergétique de 2 874 375 €. Pour un ATE similaire à l'A320, ayant des batteries Li-S et pour les mêmes conditions d'utilisation (30 000 [kWh] par vol), il a été calculé au CHAPITRE 4 que la consommation d'énergie reviendrait à 0.38 [€/kWh], impliquant un coût de 16 644 000 €. Les coûts uniquement liés à l'achat d'énergie seraient donc 5.8 fois plus élevés dans le cas de l'ATE. Une volonté politique entraînant des réductions importantes dans les prix de l'électricité ou une augmentation des prix du kérosène pourrait davantage favoriser les atouts économiques des avions décarbonisés. Cela encouragerait le développement technologique permettant leur faisabilité et donc leur introduction rapide sur le marché. L'augmentation de la demande en électricité issue de sources renouvelables qui découle de l'utilisation d'ATE pourrait être financée par des efforts de compensation des émissions et des taxes sur le carbone. Soutenir la propulsion électrique impliquerait aussi l'indépendance des pays exportateurs de pétrole ainsi que le soutien au développement local et la création d'emplois. Cela signifie que la propulsion électrique serait socialement durable. De plus, à mesure que l'énergie spécifique des batteries augmente et que les coûts de l'énergie renouvelable diminuent, la rentabilité des ATE s'améliorera davantage et le besoin de politiques de soutien diminuera. Néanmoins, les conditions requises pour la parité des coûts avec les avions à réaction seront plus strictes pour les vols plus longs, principalement en raison du poids supplémentaire des batteries et de l'impact sur la consommation d'énergie.

Conclusion Compte tenu de l'analyse réflexive ci-dessus, les ATE pourraient réduire considérablement l'impact de l'aviation sur l'environnement. En particulier, ils pourraient éliminer le réchauffement climatique associé principalement aux émissions de CO_2 et à la formation de traînées de condensation, en plus de supprimer tous les autres polluants atmosphériques comme les oxydes d'azote. De plus, les ATE ont le potentiel d'atténuer la pollution sonore, surtout au moment du décollage. Des ATE avec des batteries de 800 [Wh/kg], permettant une portée jusqu'à environ 1000 [km], pourraient remplacer un peu plus de la moitié des départs d'avions conventionnels, réduisant la consommation en carburant et les émissions de CO_2 de 15%. Dans l'hypothèse d'une forte progression de la technologie des batteries permettant de doubler le RA d'ici 2050, offrant de ce fait une gamme de RA allant jusqu'à 2600 [km], cela couvrirait 90% des vols et la moitié du carburant utilisé. Bien que la réalisation de ces prouesses technologiques ne puissent se réaliser avant 2050, ce travail a démontré l'intérêt économique pour les compagnies à opérer avec des ATE. Ensuite, de nouvelles conceptions de fuselage et l'adoption du concept de propulsion distribuée, le tout conjugué au meilleur rendement de la propulsion électrique et de la réduction de la masse structurelle de l'avion, pourraient fournir de meilleurs résultats. La véritable question à se poser n'est donc pas *"Quel niveau de technologie de batterie un ATE a-t-il besoin pour offrir la même puissance et le même stockage d'énergie qu'un avion conventionnel?"* mais plutôt *"Comment les batteries associées au système de propulsion électrique peuvent-elles concurrencer efficacement les avions à propulsion conventionnelle, même si elles sont soumises à des contraintes énergétiques ? Et quelles nouvelles libertés conceptuelles et caractéristiques techniques sont possibles grâce à ce nouveau type d'avion ?"* Cela signifie que l'approche soutenue dans la littérature jusqu'à présent, et même dans ce travail, présente le défaut de comparer de manière analogue un ATE à un avion conventionnel, et non de manière systémique ; la synergie obtenue grâce aux systèmes de propulsion électriques, aux nouvelles technologies opérationnelles et au niveau de la conception promet donc des résultats davantage optimistes.

En outre, la propulsion électrique retire les risques associés à l'utilisation de combustible et, grâce au principe de redondance de composants, réduit encore les risques d'incidents tels que des pannes moteur. Cependant, la propulsion électrique apporte aussi de potentiels nouveaux risques, qu'il sera nécessaire de soigneusement étudier et gérer en lien avec la réglementation. Étant donné que la mise sur le marché de nouveaux avions prendrait des décennies (c'est-à-dire la conception de nouveaux avions, le développement de batteries, la décarbonisation du réseau électrique, le respect réglementations et un déclin suffisamment fort dans les prix de l'électricité produite à partir de sources d'énergies renouvelables pour assurer la rentabilité), la recherche et le développement d'ATE semblent essentiels à être mis en place le plus rapidement possible, tout en s'inscrivant dans un contexte durable.

Enfin, pour pallier les limites technologiques de l'ATE et afin de se diriger vers une aviation plus décarbonisée le plus rapidement possible, le développement d'avions turboélectriques et hybrides-électriques semble tout aussi opportun et nécessaire. Même si ces derniers dépendent toujours de la combustion de carburant en vol, même de carburant "propre" comme l'hydrogène, ils produiront toujours des traînées de condensation qui auront un effet important sur le climat. Cela permettrait cependant de réduire la part des émissions des vols long- et très long-courriers, jouant le rôle de réducteurs incontestables des émissions de GES en plus d'être des catalyseurs essentiels et initiateurs technologiques vers une ACD constituée d'ATE.

Il faut toutefois aussi souligner toutes les autres améliorations à envisager qui peuvent soutenir la décarbonation de l'aviation commerciale. Parmi celles-ci, on peut notamment citer :

- L'exploitation de nouvelles possibilités de design pour le fuselage des avions, telle que *"l'aile volante"*, un projet en cours d'étude par Airbus [295] ;
- Augmenter l'utilisation du biocarburant pour les avions conventionnels (tel que le *"Carburant Durable d'Aviation"*) ayant une faible teneur en carbone [296] ;
- Exploiter l'optimisation topographique au niveau de la conception de tous les composants au sein de l'avion, afin de réduire davantage la masse des avions ;
- Perfectionner les optimisations opérationnelles telles qu'une vitesse de vol plus faible ou de meilleures procédures d'atterrissage ;
- Promouvoir l'installation de panneaux photovoltaïques sur les toits des longs terminaux afin de produire

de l'électricité verte au sein de l'aéroport, comme les projets des aéroports de Bruxelles-Sud Charleroi [297] et de Liège Bierset [298] ;

- Promouvoir l'électrification de tous les engins aéroportuaires tels que les bus, les chargeurs cargo, les escaliers passagers, les tapis bagages, les tracteurs d'avions, les camions de dégivrage, etc.

La FIGURE 8.1 reprend l'étendue temporelle estimée suite à la réalisation de ce travail. Celle-ci fournit une évolution des progrès réalistes atteignables en fonction des avancées prévues dans l'amélioration de la densité énergétique des batteries, étant estimée en moyenne à environ 4% par an. Cette moyenne est plutôt pessimiste puisqu'elle se base sur des progrès réalisés au niveau des batteries Li-ion uniquement. En passant à une batterie Li-S par exemple, une prouesse technologique plus rapide n'est certainement pas à exclure.

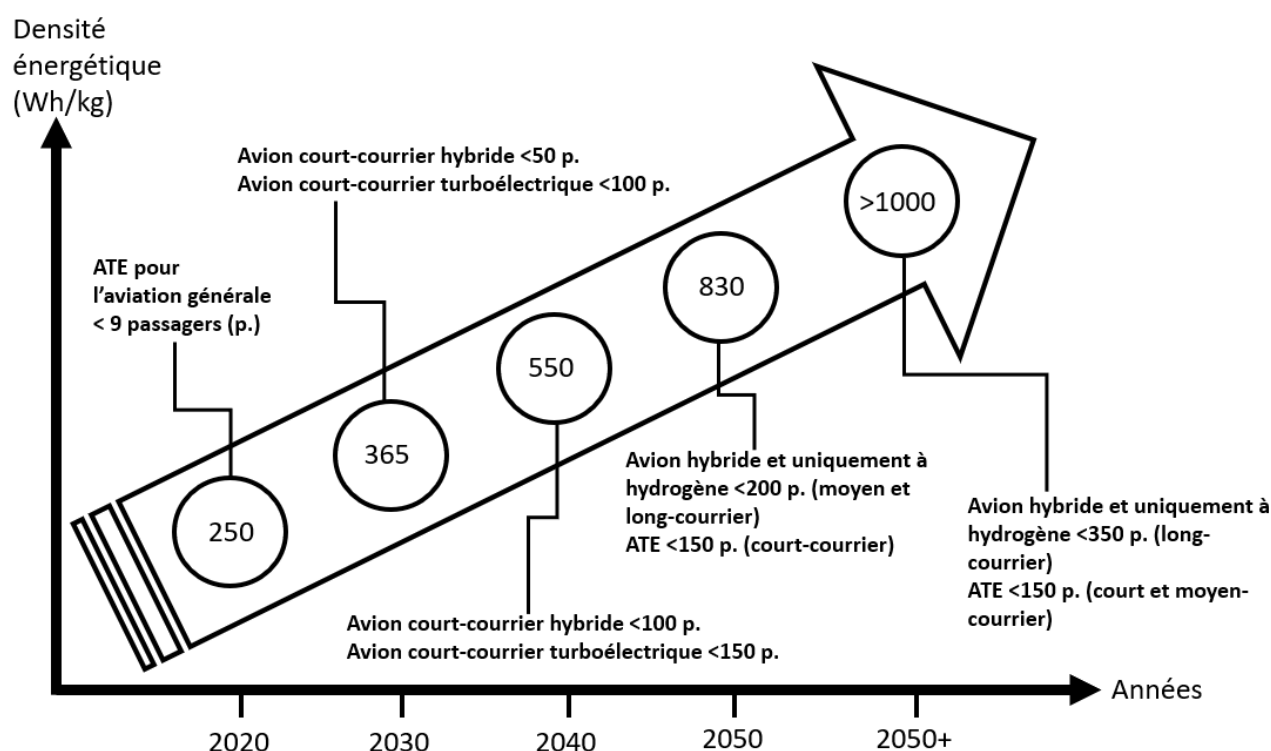


FIGURE 8.1 – Projection temporelle du développement des avions à propulsion totalement électrique, hybride électrique, turboélectrique et à hydrogène en fonction des progrès au niveau de la densité énergétique des batteries.

Pour conclure, il est nécessaire de souligner l'importance d'inclure la durabilité dans l'étude de nouveaux produits et services, dans un contexte où l'environnement nécessite de plus en plus d'attention. L'analyse par couche développée par MICHAËL F. ASHBY offre une méthodologie systématique qui mérite d'être initiée aux étudiants qui contribueront ainsi à façonner le monde de demain de manière plus durable.

Annexe : Retranscription de l'interview

Interview de Axel Doffey

Intervieweur : Amaury Poncin (AP)

Interviewé : Axel Doffey (AD)

Date de interview : Mercredi 26 février 2020

Transcription de la prise de notes relative aux questions posées

AP : Pouvez-vous brièvement décrire H55, vos objectifs, votre produit actuel et vos futures ambitions ?

AD :

- *But : développer des systèmes de propulsion pour avions totalement électriques, mais pas (encore) des avions complets.*
- *Le système de propulsion d'un Airbus par exemple, n'est pas produit par Airbus mais par une autre entreprise.*
- *Nous produisons un système de propulsion modulable qui peut s'adapter au retrofit.*
- *Nous sommes basés à Sion : province à 100% d'énergie renouvelable.*
- *La valeur ajoutée de H55 : notre expérience pour la certification, gagnée grâce aux projets Solar Impulse I et II.*
- *Notre avion rétrofité avec notre propulsion électrique a effectué son premier vol en juin 2020. Maintenant, on est en plein dans le processus de certification.*
- *Premier marché très intéressant : les e-training (avion d'entraînements pour futurs pilotes électriques). La demande est élevée, et on a la technologie pour faire ça aujourd'hui. C'est adapté, moins coûteux et les riverains d'aéroports ne seront plus dérangés par le bruit occasionné par les vols des avions aux moteurs à combustion interne, ils ne se plaignent plus. La propulsion électrique offre une propreté supplémentaire dans le sens où l'on peut recharger la batterie avec des panneaux solaires.*
- *Il y a en plus beaucoup d'intérêt de la part de la nouvelle génération de pilotes, qui jugent que « la combustion c'est le passé » et sont plus engagés dans le respect de l'environnement que les pilotes d'anciennes générations. Les jeunes veulent voler en électrique, en plus ça leur coûte moins cher. En effet, c'est 50€ de carburant contre 7€ d'électricité pour une heure de vol dans un biplace ! La formation de pilotes pourrait du coup aussi être moins chère.*

AP : Votre projet s'articule donc autour de la modification du système de propulsion uniquement (vers électrique). Quels sont les challenges, opportunités et spécifications ?

AD : *- Pour H55, ce premier système est une étape. Après, on aimerait l'adapter à d'autres avions et se préparer particulièrement au monde des « e-vtols » (les taxis urbains) qui va arriver dans cinq ans. Il leur faudra un système de propulsion électrique. C'est un marché qui explose !*
- Le moteur électrique est vraiment tout simple et tout petit par rapport au moteur thermique. Le coût de maintenance est donc considérablement réduit, il y a en fait trois composants principaux simples. Le moteur thermique contient beaucoup plus d'éléments et pièces d'usures. C'est un énorme avantage.

AP : En quoi le Solar Impulse vous a aidé ? Connaissez-vous le « Elektra solar » ? Avez-vous des partenaires ou concurrents ?

AD : *- C'est un projet qui a duré plus de 10 ans, avec deux prototypes. André (Boschberg) a piloté l'avion 5 jours d'affilés sans bouger, c'est un record !*
- Au début, le CEO d'Airbus ne pensait pas ce projet réaliste, que ça n'avait aucun sens. Or, ils y sont arrivés.
- Le projet Solar Impulse est séparé en deux : Bertand Piccard s'occupe de la fondation (motiver les entreprises à être durables) et l'autre partie c'est promouvoir le développement de l'aviation électrique, André a fondé H55.
- Comment faire quelque chose de facilement certifiable avec la technologie d'aujourd'hui ? Modifier la propulsion électrique ! Certification CS23. IPS electric propulsion system + BMS (Battery management system, qui gère les batteries en influençant la vitesse de recharge, le nombre de cycles, etc.).
- Pipistrel est un gros acteur dans le domaine. Mais ce ne sont pas des concurrents, ils jouent sur une autre catégorie que nous.

AP : Quels sont les principaux atouts, inconvénients et challenges de l'aviation électrique d'un point de vue technique (batteries,...) et pratique (certification,...) ? Quelles sont les éventuelles solutions à envisager ?

AD : *- Le Solar Impulse a été certifié pour atterrir dans des aéroports internationaux, comme celui de Bruxelles, et pour voler au-dessus de zones densément peuplées.*
- Il y a un trade-off entre vitesse de charge, cycles et autonomie.
- Les avantages de l'avion électrique par rapport à l'avion thermique traditionnel sont

donc nombreux : moins de bruit et de pollution, le rendement de la propulsion électrique est bien plus élevé et fournit un couple plus puissant au décollage, réduisant ainsi la longueur des pistes nécessaires.

- L'avion qu'on a rétrofité, le BMM, est déjà certifié. Il ne faut plus qu'effectuer une certification pour la propulsion électrique.

AP : Quel type de batteries utilisez-vous ? Quel type aimeriez-vous utiliser plus tard ? Et qu'en est-il de l'hydrogène liquide comme source d'énergie ?

AD : *- On utilise le type Li-ion. Le problème principal est la densité mais il y a beaucoup de progrès actuels et on a réussi à voler avec la technologie d'aujourd'hui.*
- On a même besoin d'utiliser les technologies de maintenant car le processus de certification a toujours un peu de retard. Il faut prouver que le système est sûr au niveau des batteries.
- Plus tard, pourquoi pas Li-S. Oxys Energy sont en train de mettre au point des batteries prometteuses, mais ce n'est pas pour maintenant.
- Les batteries solid-state : très stable, donc super intéressant pour l'aéronautique. On dit qu'elles seront en plus très denses et pas de soucis de thermal management.

AP : Selon H55 : quelle est votre opinion générale à propos de la durabilité et la faisabilité de l'aviation décarbonisée, spécifiquement via l'aviation électrique, sur le court, moyen et long terme ? Que pensez-vous d'un équivalent à l'A320 totalement électrique d'ici 2050 ?

AD : *- Tout le développement va se faire d'abord sur des petits avions.*
- Batteries H55 : 1h d'autonomie avec environ 20 minutes de réserves pour un deux places (150kW).
- Hybride : Selon moi, ça va arriver assez rapidement, peut-être d'ici 5 ans. Mais tout ça dépend fortement de l'acceptance du public. Certains paniquent quand ils voient des hélices à la place de réacteurs. Le côté psychologique joue énormément. Mais l'hybride est intéressant pour certaines phases de vols telles que le déplacement au sol, le décollage et l'atterrissage, ou encore la descente.
- Full électrique : le rendement est beaucoup plus élevé, donc il y a plus de couple et de puissance au décollage, mais dure moins longtemps. Il y a moins de bruit autour des aéroports et surtout moins d'émissions. Il existe des projets intéressants comme Wright Electric avec leur avion électrique d'une centaine de places, ou encore le projet d'Airbus l'Efan-X. C'est donc à voir. Tout ce monde est en train d'exploser, ce sera très intéressant ce qu'on va voir dans les 30 prochaines années.
- Concernant l'hydrogène, il y a ZeroAvia. Ils veulent faire voler les avions à l'hydrogène. Mais il y a trois soucis majeurs :
1) Instabilité de l'hydrogène... gros boom possible avec l'oxygène.
2) Pour éviter 1), il faut mettre dans des réservoirs sous pression : ils sont donc très lourds pour la sécurité...
3) Les méthodes de production de l'hydrogène actuellement ne sont pas très clean. Sauf si on le produit sur bases d'énergies renouvelables.
- Je pense que l'hydrogène va mettre beaucoup plus de temps que l'électrique, l'aviation suit en tout cas ce chemin. Mais pour de plus gros et lourds avions, ça sera probablement différent.

Bibliographie

- [1] A. N. SARKAR. « Evolving Green Aviation Transport System : A Hoilistic Approah to Sustainable Green Market Development », en. In : *American Journal of Climate Change* 01.03 (2012), p. 164-180. ISSN : 2167-9495, 2167-9509. DOI : 10 . 4236 / ajcc . 2012 . 13014. URL : <http://www.scirp.org/journal/doi.aspx?DOI=10.4236/ajcc.2012.13014>.
- [2] *Roadmap to decarbonising European aviation | Transport & Environment*. URL : <https://www.transportenvironment.org/publications/roadmap-decarbonising-european-aviation> (visité le 24/02/2020).
- [3] Leo VELDHUIS. *E2FLIGHT Conference 2020 Stuttgart*. EN. Fév. 2020.
- [4] Céline DELUZARCHE. *Avion : l'impact sur la qualité de l'air est pire que celui sur le réchauffement*. fr. Library Catalog : www.futura-sciences.com Section : Pollution. URL : <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/pollution-avion-impact-qualite-air-pire-celui-rechauffement-78315/> (visité le 05/06/2020).
- [5] IATA - *IATA Forecast Predicts 8.2 billion Air Travelers in 2037*. URL : <https://www.iata.org/en/pressroom/pr/2018-10-24-02/> (visité le 24/02/2020).
- [6] *Materials and Sustainable Development*. en. Elsevier, 2016. ISBN : 978-0-08-100176-9. DOI : 10 . 1016 / C2014-0-01670-X. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/C2014001670X> (visité le 14/02/2020).
- [7] *Global transport use will double by 2040 as China and India GDPs balloon - Business Insider*. URL : <https://www.businessinsider.com/global-transport-use-will-double-by-2040-as-china-and-india-gdp-balloon?IR=T> (visité le 24/02/2020).
- [8] Andreas W. SCHÄFER et al. « Technological, economic and environmental prospects of all-electric aircraft », en. In : *Nature Energy* 4.2 (fév. 2019), p. 160-166. ISSN : 2058-7546. DOI : 10 . 1038 / s41560-018-0294-x. URL : <http://www.nature.com/articles/s41560-018-0294-x>.
- [9] *European Aviation Environmental Report | European Aviation Safety Agency*. URL : <https://www.easa.europa.eu/eaer/> (visité le 14/03/2020).
- [10] *Planetoscope - Statistiques : Vols d'avions dans le monde*. URL : <https://www.planetoscope.com/Avion/109-vols-d-avions-dans-le-monde.html> (visité le 12/03/2020).
- [11] Ron VAN MANEN. *E2FLIGHT Conference 2020 Stuttgart*. EN. Fév. 2020.
- [12] Paul UPHAM, éd. *Towards sustainable aviation*. en. Sterling, VA : Earthscan Publications, 2003. ISBN : 978-1-85383-818-7 978-1-85383-817-0.
- [13] Albert R. GNADT et al. « Technical and environmental assessment of all-electric 180-passenger commercial aircraft », en. In : *Progress in Aerospace Sciences* 105 (fév. 2019), p. 1-30. ISSN : 03760421. DOI : 10 . 1016 / j.paerosci.2018.11.002. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0376042118301179>.
- [14] Suzanne DEBAILLE. « Décarbonation du secteur aérien : les enjeux et les leviers d'action », fr. In : *Revue de l'électricité et de l'électronique* (), p. 176.

- [15] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. *Focusing on environmental pressures from long-distance transport : TERM 2014*. en. OCLC : 903503054. Luxembourg : Publications Office, 2014. ISBN : 978-92-9213-497-6. URL : <http://bookshop.europa.eu/uri?target=EUB:NOTICE:THAL14007:EN:HTML> (visité le 14/02/2020).
- [16] *Le GIEC publie son rapport spécial sur le réchauffement de 1,5 °C*. fr. Library Catalog : www.climat.be. URL : <https://www.climat.be/fr-be/changements-climatiques/les-rapports-du-giec/2018-rapport-special/> (visité le 16/03/2020).
- [17] Holly PRESTON, David S. LEE et Paul D. HOOPER. « The inclusion of the aviation sector within the European Union's Emissions Trading Scheme : What are the prospects for a more sustainable aviation industry? » en. In : *Environmental Development* 2 (avr. 2012), p. 48-56. ISSN : 22114645. DOI : 10.1016/j.envdev.2012.03.008. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211464512000474>.
- [18] *CO2 emissions from passenger transport*. URL : https://www.eea.europa.eu/media/infographics/co2-emissions-from-passenger-transport/image/image_view_fullscreen (visité le 12/03/2020).
- [19] David S. LEE et al. « Aviation and global climate change in the 21st century ». en. In : *Atmospheric Environment* 43.22-23 (juil. 2009), p. 3520-3537. ISSN : 13522310. DOI : 10.1016/j.atmosenv.2009.04.024. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231009003574>.
- [20] Gunnar MYHRE et al. « 8 Anthropogenic and Natural Radiative Forcing ». en. In : (), p. 82.
- [21] *2. What is CORSIA and how does it work?* URL : https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/A39_CORSIA_FAQ2.aspx (visité le 14/02/2020).
- [22] Anco HOEN. « Étude pour la commission TRAN - La décarbonation des transports dans l'Union européenne ». fr. In : (), p. 114.
- [23] *Carbon Offsetting Scheme for International Aviation (CORSIA)*. en. Library Catalog : www.iata.org. URL : <https://www.iata.org/en/policy/environment/corsia/> (visité le 16/03/2020).
- [24] *Corsia : The UN's plan to 'offset' growth in aviation emissions after 2020*. en. Fév. 2019. URL : <https://www.carbonbrief.org/corsia-un-plan-to-offset-growth-in-aviation-emissions-after-2020> (visité le 14/02/2020).
- [25] Jonas ÅKERMAN. « Sustainable air transport--on track in 2050 ». en. In : *Transportation Research Part D : Transport and Environment* 10.2 (mar. 2005), p. 111-126. ISSN : 13619209. DOI : 10.1016/j.trd.2004.11.001. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1361920904000859>.
- [26] *Electric flight*. en. Library Catalog : www.airbus.com. URL : <https://www.airbus.com/innovation/future-technology/electric-flight.html> (visité le 16/03/2020).
- [27] UNIVERSITY OF ZILINA, FACULTY OF OPERATION AND ECONOMICS OF TRANSPORT AIR TRANSPORT DEPARTMENT UNIVERZITNA 1, 010 26 ZILINA, SLOVAK REPUBLIC MRAZ.MARIE@GMAIL.COM et Mrazova MARIA. « Sustainable development – the key for green aviation ». en. In : *INCAS BULLETIN* 6.1 (mar. 2014), p. 109-122. ISSN : 20668201, 22474528. DOI : 10.13111/2066-8201.2014.6.1.10. URL : http://bulletin.incas.ro/files/mrazova_m__vol_6_iss_1.pdf.
- [28] *Le transport aérien soutient plus de 65 millions d'emplois - Bilan*. URL : https://www.bilan.ch/economie/le_transport_aerien_soutient_plus_de_65_millions_d_emplois (visité le 17/03/2020).
- [29] Ben DALEY. « Is air transport an effective tool for sustainable development? » en. In : *Sustainable Development* 17.4 (juil. 2009), p. 210-219. ISSN : 09680802, 10991719. DOI : 10.1002/sd.383. URL : <http://doi.wiley.com/10.1002/sd.383>.
- [30] *L'UCLouvain en transition vers une université durable | UCLouvain*. URL : <https://uclouvain.be/fr/decouvrir/uclouvain-en-transition-vers-une-universite-durable.html> (visité le 17/02/2020).

- [31] « Airbus relève ses prévisions de commandes d'avions ». fr. In : *Le Monde.fr* (sept. 2019). URL : https://www.lemonde.fr/economie/article/2019/09/18/airbus-releve-ses-previsions-de-commandes-d-avions_5511861_3234.html.
- [32] James ASQUITH. *The Spread Of Flight Shame In Europe—Is Greta Thunberg The Reason Why?* en. Library Catalog : www.forbes.com Section : Lifestyle. URL : <https://www.forbes.com/sites/jamesasquith/2020/01/13/the-spread-of-flight-shame-in-europe-is-greta-thunberg-the-reason-why/> (visité le 18/03/2020).
- [33] *Transformation du pétrole - Ressources*. URL : <https://www.cefochim.be/fr/sensibilisation-jeunes/ressources-pedagogiques/> (visité le 16/03/2020).
- [34] *Kerosene*. en. Page Version ID : 944512244. Mar. 2020. URL : <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Kerosene&oldid=944512244> (visité le 16/03/2020).
- [35] *Now for something completely different | Airlines*. URL : <https://www.airlines.iata.org/analysis/now-for-something-completely-different> (visité le 14/02/2020).
- [36] *L'aéroport de Zaventem principale source de pollution respiratoire sur Bruxelles et les communes avoisinantes*. URL : <http://www.coeur-europe.be/9-uncategorised/80-1-aeroport-de-zaventem-principale-source-de-pollution-respiratoire-sur-bruxelles-et-les-communes-avoisinantes> (visité le 17/03/2020).
- [37] Jon C GOODMAN. « Aviation and the Environment ». en. In : (), p. 527.
- [38] Michael F. ASHBY. « Background ». en. In : *Materials and Sustainable Development*. Elsevier, 2016, p. 1-25. ISBN : 978-0-08-100176-9. DOI : 10.1016/B978-0-08-100176-9.00001-3. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081001769000013>.
- [39] Publications Office of the European UNION. *Study on the review of the list of critical raw materials : final report*. en. Website. ISBN : 9789279479373 Library Catalog : op.europa.eu Publisher : Publications Office of the European Union. Sept. 2017. URL : <https://op.europa.eu/443/en/publication-detail/-/publication/08fdab5f-9766-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en> (visité le 15/03/2020).
- [40] Michael ASHBY et Kara JOHNSON. « Materials and Sustainability ». en. In : *Materials and Design*. Elsevier, 2014, p. 156-178. ISBN : 978-0-08-098205-2. DOI : 10.1016/B978-0-08-098205-2.00008-1. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780080982052000081> (visité le 14/02/2020).
- [41] Nathalie MAYER. *Les scientifiques alertent sur la « pandémie » de la pollution de l'air, fléau du XXI^e siècle*. fr. Library Catalog : www.futura-sciences.com Section : vie. URL : <https://www.futura-sciences.com/sante/actualites/vie-scientifiques-alertent-pandemie-pollution-air-fleau-xxie-siecle-63256/> (visité le 06/03/2020).
- [42] *Levels of fine particles as high at Brussels Airport as in the city*. en. Fév. 2020. URL : <https://www.brusselstimes.com/all-news/belgium-all-news/96468/levels-of-fine-particles-as-high-at-airport-as-in-the-city-pollution-brussels-vito/> (visité le 23/02/2020).
- [43] Sqn Ldr (Retd) Sabitha BANU. « Aviation and climate change : a global sectorised approach is the need of the hour ». en. In : *International Journal of Low-Carbon Technologies* 7.2 (juin 2012), p. 137-142. ISSN : 1748-1317, 1748-1325. DOI : 10.1093/ijlct/ctr030. URL : <https://academic.oup.com/ijlct/article-lookup/doi/10.1093/ijlct/ctr030>.
- [44] *The Brussels Times*. URL : <https://www.brusselstimes.com/all-news/belgium-all-news/98872/1-in-5-europeans-suffers-from-noise-pollution-because-of-traffic-eea-environment-agency-health-sleep-concentration-who-chronic-sleep-disturbance-deaths/> (visité le 14/03/2020).
- [45] Manfred REICHEL. *E2FLIGHT Conference 2020 Stuttgart*. EN. Fév. 2020.
- [46] D S LEE, L L LIM et B OWEN. « Mitigating future aviation CO2 emissions – “timing is everything” ». en. In : (), p. 30.

- [47] Ivan CHAER. *European Commission welcomes significant progress at ICAO to tackle CO2 emissions in aviation*. en. Text. Library Catalog : ec.europa.eu. Mar. 2019. URL : https://ec.europa.eu/transport/modes/air/news/2019-03-07-european-commission-welcomes-significant-progress-icao-tackle-co2_en (visité le 03/03/2020).
- [48] *Environmental noise*. en. Briefing. Library Catalog : www.eea.europa.eu. URL : <https://www.eea.europa.eu/airs/2018/environment-and-health/environmental-noise> (visité le 03/03/2020).
- [49] R. K. PACHAURI, Leo MAYER et Intergovernmental Panel on CLIMATE CHANGE, éd. *Climate change 2014 : synthesis report*. en. OCLC : 914851124. Geneva, Switzerland : Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015. ISBN : 978-92-9169-143-2.
- [50] C. PORNET et al. « Methodology for Sizing and Performance Assessment of Hybrid Energy Aircraft ». en. In : *Journal of Aircraft* 52.1 (jan. 2015), p. 341-352. ISSN : 0021-8669, 1533-3868. DOI : 10.2514/1.C032716. URL : <http://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.C032716>.
- [51] Alan H. EPSTEIN et Steven M. O'FLARITY. « Considerations for Reducing Aviation's CO2 with Aircraft Electric Propulsion ». en. In : *Journal of Propulsion and Power* 35.3 (mai 2019), p. 572-582. ISSN : 0748-4658, 1533-3876. DOI : 10.2514/1.B37015. URL : <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.B37015>.
- [52] *IATA - Technology Roadmap*. URL : <https://www.iata.org/en/publications/technology-roadmap/> (visité le 10/03/2020).
- [53] Gabrielle E. WROBLEWSKI et Phillip J. ANSELL. « Mission Analysis and Emissions for Conventional and Hybrid-Electric Commercial Transport Aircraft ». en. In : *Journal of Aircraft* 56.3 (mai 2019), p. 1200-1213. ISSN : 0021-8669, 1533-3868. DOI : 10.2514/1.C035070. URL : <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.C035070>.
- [54] Alex DOFFEY. *Entretien par vidéoconférence avec DOFFEY A., Intern Marketing and Partnerships chez H55*. FR. Fév. 2020.
- [55] Hyun D. KIM, Aaron T. PERRY et Phillip J. ANSELL. « A Review of Distributed Electric Propulsion Concepts for Air Vehicle Technology ». en. In : *2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium*. Cincinnati, Ohio : American Institute of Aeronautics et Astronautics, juil. 2018. ISBN : 978-1-62410-572-2. DOI : 10.2514/6.2018-4998. URL : <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2018-4998>.
- [56] *Electric propulsion is finally on the map*. en. URL : <https://www.rolandberger.com/en/Point-of-View/Electric-propulsion-is-finally-on-the-map.html> (visité le 27/02/2020).
- [57] *L'avion électrique c'est pour bientôt, mais...* Fév. 2020. URL : <https://www.levif.be/actualite/environnement/l-avion-electrique-c-est-pour-bientot-mais/article-normal-1251953.html> (visité le 17/02/2020).
- [58] Walter SCHÖFER. *E2FLIGHT Conference 2020 Stuttgart*. EN. Fév. 2020.
- [59] *Après la voiture, la Norvège s'engage sur la voie de l'avion électrique*. fr. Library Catalog : www.breezcar.com. URL : <https://www.breezcar.com/actualites/article/apres-la-voiture-la-norvege-sengage-sur-la-voie-de-lavion-electrique-0419> (visité le 10/03/2020).
- [60] *British Airways compense aussi ses émissions domestiques de CO2*. fr-FR. Library Catalog : www.air-journal.fr Section : Actualité. URL : <https://www.air-journal.fr/2020-01-02-british-airways-compense-aussi-ses-emissions-domestiques-de-co2-5217313.html> (visité le 10/03/2020).
- [61] *Finnair se lance dans une ambitieuse politique de neutralité carbone*. fr-FR. Library Catalog : www.air-journal.fr Section : Actualité. URL : <https://www.air-journal.fr/2020-03-07-finnair-annonce-une-ambitieuse-politique-de-neutralite-carbone-5218712.html> (visité le 10/03/2020).

- [62] L'Usine NOUVELLE. « Delta Air Lines va investir un milliard de dollars pour atteindre la neutralité carbone en 2030 - L'Usine Aéro ». fr. In : (fév. 2020). Publisher : www.usinenouvelle.com/. URL : <https://www.usinenouvelle.com/article/delta-air-lines-va-investir-un-milliard-de-dollars-pour-atteindre-la-neutralite-carbone-en-2030>. N930519.
- [63] COMMITTEE ON PROPULSION AND ENERGY SYSTEMS TO REDUCE COMMERCIAL AVIATION CARBON EMISSIONS et al. *Commercial Aircraft Propulsion and Energy Systems Research : Reducing Global Carbon Emissions*. en. Washington, D.C. : National Academies Press, 2016. ISBN : 978-0-309-44096-7. DOI : 10.17226/23490. URL : <http://www.nap.edu/catalog/23490>.
- [64] *Future Propulsion Systems and Energy Sources in Sustainable Aviation* / Wiley. en-us. Library Catalog : www.wiley.com. URL : <https://www.wiley.com/en-us/Future+Propulsion+Systems+and+Energy+Sources+in+Sustainable+Aviation-p-9781119414995> (visité le 04/03/2020).
- [65] *Looking at the future of urban air mobility*. Last Modified : 2019-08-22T13:56+02:00 Library Catalog : www.rolandberger.com. URL : <https://www.rolandberger.com/fr/Point-of-View/Looking-at-the-future-of-urban-air-mobility.html> (visité le 09/03/2020).
- [66] Vahana. en. Library Catalog : www.airbus.com. URL : <https://www.airbus.com/innovation/urban-air-mobility/vehicle-demonstrators/vahana.html> (visité le 15/03/2020).
- [67] Fred LAMBERT. *Lilium shows maiden flight of world's first working prototype of an electric VTOL jet*. en-US. Library Catalog : electrek.co Section : Electrek. Avr. 2017. URL : <https://electrek.co/2017/04/20/lilium-electric-vtol-jet/> (visité le 15/03/2020).
- [68] *Electric and Hybrid Aircraft Platform for Innovation (E-HAPI)*. URL : <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/electric-aircraft.aspx> (visité le 09/06/2020).
- [69] E-Fan X. en. Library Catalog : www.airbus.com. URL : <https://www.airbus.com/innovation/future-technology/electric-flight/e-fan-x.html> (visité le 14/03/2020).
- [70] *From E-Fan to E-Fan X*. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=AfkWQL8Ziac> (visité le 14/03/2020).
- [71] *Eviation's All-Electric Alice Regional Airliner Secures a Major Launch Order* – AINtv. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=W0DHhiwvatQ> (visité le 14/03/2020).
- [72] AIRCRAFT / Eviation. en-US. Library Catalog : www.eviation.co. URL : <https://www.eviation.co/aircraft/> (visité le 14/03/2020).
- [73] *Meet Alice, the battery-powered plane that could herald the age of electric air travel*. en. Library Catalog : www.weforum.org. URL : <https://www.weforum.org/agenda/2019/08/aviation-electric-planes-climate-change/> (visité le 15/03/2020).
- [74] *Eviation Alice : le jet électrique présenté au Bourget*. fr. Library Catalog : www.automobile-propre.com Section : Avion électrique. URL : <https://www.automobile-propre.com/breves/eviation-alice-le-jet-electrique-presente-au-bourget/> (visité le 14/03/2020).
- [75] *Wright Electric - Transforming the Aviation Industry with Electric Planes*. en-US. Library Catalog : weflywright.com. URL : <https://weflywright.com/> (visité le 14/03/2020).
- [76] *Le futur avion électrique d'easyJet progresse*. fr-FR. Library Catalog : www.air-journal.fr Section : Actualité. URL : <https://www.air-journal.fr/2020-01-31-le-futur-avion-electrique-deasyjet-progresse-5217909.html> (visité le 14/03/2020).
- [77] *EasyJet partner starts developing engine for electric plane* - Reuters. URL : <https://www.reuters.com/article/us-easyjet-electric/easyjet-partner-starts-developing-engine-for-electric-plane-idUSKBN1ZT279> (visité le 27/03/2020).
- [78] *Wright Electric begins motor development program for 186-seat electric aircraft; 1.5MW motor, 3 kV inverter*. Library Catalog : www.greencarcongress.com. URL : <https://www.greencarcongress.com/2020/01/20200131-wright.html> (visité le 15/03/2020).

- [79] H55. en-US. Library Catalog : www.h55.ch. URL : <https://www.h55.ch> (visité le 14/03/2020).
- [80] Susan YING. *E2FLIGHT Conference 2020 Stuttgart*. EN. Fév. 2020.
- [81] AMPAIRE / *Leading The Charge*. en-US. Library Catalog : www.ampaire.com. URL : <https://www.ampaire.com> (visité le 15/03/2020).
- [82] Danielle CUTLER et Danielle CUTLER. *You Can Now Sign Up to Buy Your Own Hybrid-Electric Plane*. en. Library Catalog : robbreport.com. Juil. 2019. URL : <https://robbreport.com/motors/aviation/sign-up-now-for-your-own-twin-engined-hybrid-electric-plane-2859328/> (visité le 15/03/2020).
- [83] *Electric Aviation Company Scylax Forms Joint Venture With German Regional Airline*. en-US. Library Catalog : cleantechnica.com Section : Clean Transport. Nov. 2019. URL : <https://cleantechnica.com/2019/11/03/electric-aviation-company-scylax-forms-joint-venture-with-german-regional-airline/> (visité le 15/03/2020).
- [84] Calin GOLOGAN. *E2FLIGHT Conference 2020 Stuttgart*. EN. Fév. 2020.
- [85] Xavier ROBOAM. « New trends and challenges of electrical networks embedded in “more electrical aircraft” ». In : *2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. ISSN : 2163-5137. Juin 2011, p. 26-31. DOI : 10.1109/ISIE.2011.5984130.
- [86] Xiaolong ZHANG et al. « Large electric machines for aircraft electric propulsion ». en. In : *IET Electric Power Applications* 12.6 (juil. 2018), p. 767-779. ISSN : 1751-8660, 1751-8679. DOI : 10.1049/iet-epa.2017.0639. URL : <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-epa.2017.0639>.
- [87] Giampaolo BUTICCHI et al. « On-Board Microgrids for the More Electric Aircraft—Technology Review ». en. In : *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 66.7 (juil. 2019), p. 5588-5599. ISSN : 0278-0046, 1557-9948. DOI : 10.1109/TIE.2018.2881951. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8568981/>.
- [88] Efrain ALCORTA-GARCIA, Ali ZOLGHADRI et Philippe GOUPIL. « A Nonlinear Observer-Based Strategy for Aircraft Oscillatory Failure Detection : A380 Case Study ». In : *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 47.4 (oct. 2011), p. 2792-2806. ISSN : 2371-9877. DOI : 10.1109/TAES.2011.6034665.
- [89] A. GHODBANE et al. « Design of a tolerant flight control system in response to multiple actuator control signal faults induced by cosmic rays ». In : *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 52.2 (avr. 2016), p. 681-697. ISSN : 2371-9877. DOI : 10.1109/TAES.2015.140787.
- [90] Pat WHEELER et Sergei BOZHKO. « The More Electric Aircraft : Technology and challenges. » en. In : *IEEE Electrification Magazine* 2.4 (déc. 2014), p. 6-12. ISSN : 2325-5897, 2325-5889. DOI : 10.1109/MELE.2014.2360720. URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/7008830/>.
- [91] Pat WHEELER. « Technology for the more and all electric aircraft of the future ». en. In : *2016 IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA)*. Curicó, Chile : IEEE, oct. 2016, p. 1-5. ISBN : 978-1-5090-1147-6. DOI : 10.1109/ICA-ACCA.2016.7778519. URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/7778519/>.
- [92] Jiawei CHEN, Chengjun WANG et Jie CHEN. « Investigation on the Selection of Electric Power System Architecture for Future More Electric Aircraft ». en. In : *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 4.2 (juin 2018), p. 563-576. ISSN : 2332-7782. DOI : 10.1109/TTE.2018.2792332. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8254402/>.
- [93] *Dataero - Comment les avions s'alimentent en électricité?* URL : <https://www.dataero.fr/alimentation-electrique-avions/> (visité le 26/03/2020).
- [94] Bulent SARLIOGLU et Casey T. MORRIS. « More Electric Aircraft : Review, Challenges, and Opportunities for Commercial Transport Aircraft ». en. In : *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 1.1 (juin 2015), p. 54-64. ISSN : 2332-7782. DOI : 10.1109/TTE.2015.2426499. URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/7098414/>.

- [95] Michael TRASKOS. *High Voltage Impact the Aircraft Wiring System*. en-US. Library Catalog : www.lectromec.com Section : Miscellaneous. Mar. 2019. URL : <https://www.lectromec.com/high-voltage-impact-the-aircraft-wiring-system/> (visité le 26/03/2020).
- [96] B. H. NYA, J. BROMBACH et D. SCHULZ. « Benefits of higher voltage levels in aircraft electrical power systems ». en. In : *2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*. Bologna, Italy : IEEE, oct. 2012, p. 1-5. ISBN : 978-1-4673-1372-8 978-1-4673-1370-4 978-1-4673-1371-1. DOI : 10.1109/ESARS.2012.6387381. URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/6387381/>.
- [97] *A votre avis quelle est la longueur des câbles électriques d'un A380 ?* fr. Library Catalog : www.aeronestv.com. URL : <https://www.aeronestv.com/fr/lifestyle/a-votre-avis/2306-a-votre-avis-quelle-est-la-longueur-des-cables-electriques-d-un-a380.html> (visité le 09/04/2020).
- [98] *Temps de voyage de l'avion électrique – Le premier vol doté d'un équipage avec un fonctionnement électrique est déjà vieux d'un demi-siècle* | Arts Holding SE. fr-FR. Library Catalog : arts.eu. URL : https://arts.eu/fr_FR/journey-through-the-history-of-electric-aircraft (visité le 10/03/2020).
- [99] Amy JANKOVSKY. *E2FLIGHT Conference 2020 Stuttgart*. EN. Fév. 2020.
- [100] Patrick Christoph VRATNY. « Conceptual Design Methods of Electric Power Architectures for Hybrid Energy Aircraft ». en. In : (), p. 166.
- [101] James L. FELDER. *NASA Electric Propulsion System Studies*. Nov. 2015. URL : <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20160009274> (visité le 27/02/2020).
- [102] *The Wright Brothers | The First Successful Airplane*. URL : <https://airandspace.si.edu/exhibitions/wright-brothers/online/fly/1903/> (visité le 04/03/2020).
- [103] Martin HEPPELE. « Electric Flight – Potential and Limitations ». en. In : (), p. 30.
- [104] Benjamin J. BRELJE et Joaquim R.R.A. MARTINS. « Electric, hybrid, and turboelectric fixed-wing aircraft : A review of concepts, models, and design approaches ». en. In : *Progress in Aerospace Sciences* 104 (jan. 2019), p. 1-19. ISSN : 03760421. DOI : 10.1016/j.paerosci.2018.06.004. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0376042118300356>.
- [105] Jonathan M. RHEAUME et Charles LENTS. *Energy Storage for Commercial Hybrid Electric Aircraft*. English. SAE Technical Paper 2016-01-2014. ISSN : 0148-7191, 2688-3627. Warrendale, PA : SAE International, sept. 2016. DOI : 10.4271/2016-01-2014. URL : <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2016-01-2014/> (visité le 04/03/2020).
- [106] Ralph H JANSEN et al. « Overview of NASA Electrified Aircraft Propulsion Research for Large Subsonic Transports ». en. In : (), p. 20.
- [107] BATTERYWALI. *Calendar life VS Cycle life*. URL : <http://batterywali.com/> (visité le 27/02/2020).
- [108] *SUPERCONDUCTING MATERIALS*. URL : <https://er.jsc.nasa.gov/seh/pg110s95.html> (visité le 05/03/2020).
- [109] Julian HOELZEN et al. « Conceptual Design of Operation Strategies for Hybrid Electric Aircraft ». en. In : *Energies* 11.1 (jan. 2018), p. 217. ISSN : 1996-1073. DOI : 10.3390/en11010217. URL : <http://www.mdpi.com/1996-1073/11/1/217>.
- [110] P.J. MASSON et C.A. LUONGO. « High Power Density Superconducting Motor for All-Electric Aircraft Propulsion ». en. In : *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 15.2 (juin 2005), p. 2226-2229. ISSN : 1051-8223. DOI : 10.1109/TASC.2005.849618. URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/1440107/>.
- [111] *What the Oil Price Crash Means for the Climate - Bloomberg*. URL : <https://www.bloomberg.com/opinion/articles/2020-03-10/what-the-oil-price-crash-means-for-the-climate> (visité le 10/03/2020).
- [112] *CS-25 Large Aeroplanes*. en. Library Catalog : www.easa.europa.eu. URL : <https://www.easa.europa.eu/certification-specifications/cs-25-large-aeroplanes> (visité le 10/03/2020).

- [113] *Standard Airworthiness Certification – Regulations*. en-us. template. Last Modified : 2017-10-24T13:04:43-0400 Library Catalog : www.faa.gov. URL : https://www.faa.gov/aircraft/air_cert/airworthiness_certification/std_awcert/std_awcert_regs/regs/ (visité le 10/03/2020).
- [114] Stefan STÜCKL. « Methods for the Design and Evaluation of Future Aircraft Concepts Utilizing Electric Propulsion Systems ». de. In : (), p. 173.
- [115] Ariel COHEN. *Tesla's New Lithium-Ion Patent Brings Company Closer to Promised 1 Million-Mile Battery*. en. Library Catalog : www.forbes.com Section : Business. URL : <https://www.forbes.com/sites/arielcohen/2020/12/30/teslas-new-lithium-ion-patent-brings-company-closer-to-promised-1-million-mile-battery/> (visité le 11/03/2020).
- [116] *Lithium Batteries : Advanced Technologies and Applications* | Wiley. en-us. Library Catalog : www.wiley.com. URL : <https://www.wiley.com/en-us/Lithium+Batteries%3A+Advanced+Technologies+and+Applications-p-9781118183656> (visité le 01/03/2020).
- [117] Kevin G. GALLAGHER et al. « Quantifying the promise of lithium–air batteries for electric vehicles ». en. In : *Energy & Environmental Science* 7.5 (2014), p. 1555. ISSN : 1754-5692, 1754-5706. DOI : 10.1039/c3ee43870h. URL : <http://xlink.rsc.org/?DOI=c3ee43870h>.
- [118] *Future of electric flight*. en. Library Catalog : www.airbus.com. URL : <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2017/06/Future-of-electric-flight.html> (visité le 03/03/2020).
- [119] *Oxis Energy - Next Generation Battery Technology - Li2S*. en-US. Library Catalog : oxisenergy.com. URL : <https://oxisenergy.com/> (visité le 01/03/2020).
- [120] Abbas FOTOUHI et al. « Lithium-Sulfur Battery Technology Readiness and Applications—A Review ». en. In : *Energies* 10.12 (nov. 2017), p. 1937. ISSN : 1996-1073. DOI : 10.3390/en10121937. URL : <http://www.mdpi.com/1996-1073/10/12/1937>.
- [121] Xiulei JI et Linda F. NAZAR. « Advances in Li–S batteries ». en. In : *Journal of Materials Chemistry* 20.44 (nov. 2010). Publisher : The Royal Society of Chemistry, p. 9821-9826. ISSN : 1364-5501. DOI : 10.1039/B925751A. URL : <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2010/jm/b925751a>.
- [122] Markus HAGEN et al. « Lithium-Sulfur Cells : The Gap between the State-of-the-Art and the Requirements for High Energy Battery Cells ». en. In : *Advanced Energy Materials* 5.16 (août 2015), p. 1401986. ISSN : 16146832. DOI : 10.1002/aenm.201401986. URL : <http://doi.wiley.com/10.1002/aenm.201401986>.
- [123] *Oxis Energy to build plant for mass production of Li-sulfur cells*. Library Catalog : www.greencarcongress.com. URL : <https://www.greencarcongress.com/2019/06/20190616-oxis.html> (visité le 01/03/2020).
- [124] A. F. HOFMANN, D. N. FRONCZEK et W. G. BESSLER. « Mechanistic modeling of polysulfide shuttle and capacity loss in lithium–sulfur batteries ». In : *JOURNAL OF POWER SOURCES* 259 (2014), p. 300-310. ISSN : 0378-7753.
- [125] *Lithium-Sulfur Battery Project Aims to Double the Range of Electric Airplanes - IEEE Spectrum*. en. Library Catalog : spectrum.ieee.org. URL : <https://spectrum.ieee.org/energywise/aerospace/aviation/lithiumsulfur-battery-project-aims-to-double-the-range-of-electric-airplanes> (visité le 02/03/2020).
- [126] *Estimation of energy density of Li-S batteries with liquid and solid electrolytes* | Request PDF. en. Library Catalog : www.researchgate.net. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.06.109>. URL : https://www.researchgate.net/publication/305828220_Estimation_of_energy_density_of_Li-S_batteries_with_liquid_and_solid_electrolytes (visité le 01/03/2020).

- [127] *Lithium/Sulfur Cells Provide Long Cycle Life, High Specific Energy* | Power Electronics. URL : <https://www.powerelectronics.com/technologies/alternative-energy/article/21862282/lithiumsulfur-cells-provide-long-cycle-life-high-specific-energy> (visité le 10/03/2020).
- [128] Zhengcheng ZHANG et Sheng Shui ZHANG. *Rechargeable Batteries : Materials, Technologies and New Trends*. en. Springer, juin 2015. ISBN : 978-3-319-15458-9.
- [129] P. TAN et al. « Advances and challenges in lithium-air batteries ». en. In : *Applied Energy* 204 (oct. 2017), p. 780-806. ISSN : 03062619. DOI : 10 . 1016 / j . apenergy . 2017 . 07 . 054. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261917309091>.
- [130] G. GIRISHKUMAR et al. « Lithium–Air Battery : Promise and Challenges ». In : *The Journal of Physical Chemistry Letters* 1.14 (juil. 2010). Publisher : American Chemical Society, p. 2193-2203. DOI : 10 . 1021 / jz1005384. URL : <https://doi.org/10.1021/jz1005384>.
- [131] « The Viability of High Specific Energy Lithium Air Batteries ». en. In : (), p. 15.
- [132] Peter G. BRUCE, Laurence J. HARDWICK et K. M. ABRAHAM. « Lithium-air and lithium-sulfur batteries ». en. In : *MRS Bulletin* 36.7 (juil. 2011). Publisher : Cambridge University Press, p. 506-512. ISSN : 1938-1425, 0883-7694. DOI : 10 . 1557 / mrs . 2011 . 157. URL : <https://www.cambridge.org/core/journals/mrs-bulletin/article/lithiumair-and-lithiumsulfur-batteries/DC409CD1549DA54CE296C74572E5D248>.
- [133] Jake CHRISTENSEN et al. « A Critical Review of Li/Air Batteries ». en. In : *Journal of The Electrochemical Society* 159.2 (2011), R1-R30. ISSN : 0013-4651, 1945-7111. DOI : 10 . 1149 / 2 . 086202jes. URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.086202jes>.
- [134] Yijie LIU, Ping HE et Haoshen ZHOU. « Rechargeable Solid-State Li-Air and Li-S Batteries : Materials, Construction, and Challenges ». en. In : *Advanced Energy Materials* 8.4 (fév. 2018), p. 1701602. ISSN : 16146832. DOI : 10 . 1002 / aenm . 201701602. URL : <http://doi.wiley.com/10.1002/aenm.201701602>.
- [135] *ODS Metered Paywall*. en. Library Catalog : cen.acs.org. URL : <https://cen.acs.org/articles/odsmeter.html> (visité le 11/03/2020).
- [136] *From Liquid to Solid-State Batteries : Solutions for Clean Mobility*. en. Library Catalog : www.solvay.com. URL : <https://www.solvay.com/en/innovation/science-solutions/fast-charging-safe-batteries> (visité le 10/03/2020).
- [137] Arumugam MANTHIRAM, Xingwen YU et Shaofei WANG. « Lithium battery chemistries enabled by solid-state electrolytes ». en. In : *Nature Reviews Materials* 2.4 (avr. 2017), p. 16103. ISSN : 2058-8437. DOI : 10 . 1038 / natrevmats . 2016 . 103. URL : <http://www.nature.com/articles/natrevmats2016103>.
- [138] Deepak KUMAR et al. « Progress and prospects of sodium-sulfur batteries : A review ». en. In : *Solid State Ionics* 312 (déc. 2017), p. 8-16. ISSN : 01672738. DOI : 10 . 1016 / j . ssi . 2017 . 10 . 004. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167273817306501>.
- [139] *Is Elon Musk planning Tesla's electric plane in 5 years?* en. Library Catalog : www.livemint.com Section : Companies. Juil. 2019. URL : <https://www.livemint.com/companies/news/is-elon-musk-planning-tesla-s-electric-plane-in-5-years-1562037876297.html> (visité le 02/03/2020).
- [140] *OXIS Energy Li-S cells close to achieving 500Wh/kg; targeting 600Wh/kg with solid-state Li-S technology*. Library Catalog : www.greencarcongress.com. URL : <https://www.greencarcongress.com/2020/01/20200122-oxis.html> (visité le 10/03/2020).
- [141] Jasper BIEMOLT et al. « Beyond Lithium-Based Batteries ». en. In : *Materials* 13.2 (jan. 2020), p. 425. ISSN : 1996-1944. DOI : 10 . 3390 / ma13020425. URL : <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/2/425>.

- [142] M.A. HANNAN et al. « Review of energy storage systems for electric vehicle applications : Issues and challenges ». en. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69 (mar. 2017), p. 771-789. ISSN : 13640321. DOI : 10.1016/j.rser.2016.11.171. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032116309182>.
- [143] Justin SALMINEN et al. « Chapter 14 - Transport Energy – Lithium Ion Batteries ». en. In : *Future Energy (Second Edition)*. Sous la dir. de Trevor M. LETCHER. Boston : Elsevier, jan. 2014, p. 291-309. ISBN : 978-0-08-099424-6. DOI : 10.1016/B978-0-08-099424-6.00014-4. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080994246000144> (visité le 10/03/2020).
- [144] Nobuyuki IMANISHI et Osamu YAMAMOTO. « Rechargeable lithium–air batteries : characteristics and prospects ». en. In : *Materials Today* 17.1 (jan. 2014), p. 24-30. ISSN : 13697021. DOI : 10.1016/j.mattod.2013.12.004. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1369702113004586>.
- [145] Mats ZACKRISSON et al. « Life cycle assessment of lithium-air battery cells ». en. In : *Journal of Cleaner Production* 135 (nov. 2016), p. 299-311. ISSN : 0959-6526. DOI : 10.1016/j.jclepro.2016.06.104. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616307818>.
- [146] Borys LUKASIK et Witold WISNIOWSKI. « All-electric propulsion for future business jet aircraft : A feasibility study ». en. In : *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G : Journal of Aerospace Engineering* 231.12 (oct. 2017), p. 2203-2213. ISSN : 0954-4100, 2041-3025. DOI : 10.1177/0954410017727027.
- [147] Longjun LI et Arumugam MANTHIRAM. « Dual-electrolyte lithium–air batteries : influence of catalyst, temperature, and solid-electrolyte conductivity on the efficiency and power density ». en. In : *Journal of Materials Chemistry A* 1.16 (mar. 2013). Publisher : The Royal Society of Chemistry, p. 5121-5127. ISSN : 2050-7496. DOI : 10.1039/C3TA01241G. URL : <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2013/ta/c3ta01241g>.
- [148] Jim ADAMS et Mohan KARULKAR. « Bipolar plate cell design for a lithium air battery ». en. In : *Journal of Power Sources* 199 (fév. 2012), p. 247-255. ISSN : 0378-7753. DOI : 10.1016/j.jpowsour.2011.10.041. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775311020337>.
- [149] *CO2 emission intensity*. en. Data Visualization. Library Catalog : www.eea.europa.eu. URL : <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-5> (visité le 12/03/2020).
- [150] *Batteries voitures électriques : le vrai bilan CO2 de leur production - Moniteur Automobile*. fr. Library Catalog : www.moniteurautomobile.be. URL : <https://www.moniteurautomobile.be/actu-auto/decryptage/batteries-lithium-ion-voiture-electrique-vrai-bilan-co2-production.html> (visité le 13/03/2020).
- [151] Dominic A. NOTTER et al. « Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles ». In : *Environmental Science & Technology* 44.17 (sept. 2010). Publisher : American Chemical Society, p. 6550-6556. ISSN : 0013-936X. DOI : 10.1021/es903729a. URL : <https://doi.org/10.1021/es903729a>.
- [152] Yelin DENG et al. « Life cycle assessment of lithium sulfur battery for electric vehicles ». en. In : *Journal of Power Sources* 343 (mar. 2017), p. 284-295. ISSN : 0378-7753. DOI : 10.1016/j.jpowsour.2017.01.036. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775317300368>.
- [153] Hyung Chul KIM et al. « Cradle-to-Gate Emissions from a Commercial Electric Vehicle Li-Ion Battery : A Comparative Analysis ». In : *Environmental Science & Technology* 50 (juin 2016). DOI : 10.1021/acs.est.6b00830.
- [154] Joosung LEE et al. « Historical and Future Trends in Aircraft Performance, Cost, and Emissions ». In : *Annual Review of Energy and the Environment* 26 (nov. 2001). DOI : 10.1146/annurev.energy.26.1.167.

- [155] *Raw Materials Information System*. URL : <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/?page=crm-list-2017-09abb4> (visité le 12/03/2020).
- [156] Wenjuan LIU, Datu B. AGUSDINATA et Soe W. MYINT. « Spatiotemporal patterns of lithium mining and environmental degradation in the Atacama Salt Flat, Chile ». en. In : *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 80 (août 2019), p. 145-156. ISSN : 0303-2434. DOI : 10.1016/j.jag.2019.04.016. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243419300996>.
- [157] Victoria FLEXER, Celso Fernando BASPINEIRO et Claudia Inés GALLI. « Lithium recovery from brines : A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing ». en. In : *Science of The Total Environment* 639 (oct. 2018), p. 1188-1204. ISSN : 0048-9697. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2018.05.223. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718318746>.
- [158] *Corruption, pollution, consommation : les ravages du lithium en Argentine*. fr. Library Catalog : reporterre.net. URL : <https://reporterre.net/Corruption-pollution-consommation-les-ravages-du-lithium-en-Argentine> (visité le 13/03/2020).
- [159] *Portugal : bras de fer autour d'une mine de lithium*. fr. Library Catalog : www.lapresse.ca Section : Europe. Jan. 2020. URL : <https://www.lapresse.ca/international/europe/202001/17/01-5257268-portugal-bras-de-fer-autour-dune-mine-de-lithium.php> (visité le 13/03/2020).
- [160] *Electric cars are still better for the environment. But lithium mining has some problems*. en. Library Catalog : www.salon.com Section : The Economy & Innovation. Juin 2019. URL : <https://www.salon.com/2019/06/17/lithium-mining-for-green-electric-cars-is-leaving-a-stain-on-the-planet/> (visité le 13/03/2020).
- [161] Maxx CHATSKO. *Lithium Demand Could Triple by 2025. Does the World Have Enough?* en. Library Catalog : www.fool.com Section : investing. Fév. 2020. URL : <https://www.fool.com/investing/2020/02/27/lithium-demand-could-triple-by-2025-does-the-world.aspx> (visité le 13/03/2020).
- [162] « We're Going to Need More Lithium ». en. In : *Bloomberg.com* (). URL : <https://www.bloomberg.com/graphics/2017-lithium-battery-future/>.
- [163] Publications Office of the European UNION. *Raw materials scoreboard 2018 : European innovation partnership on raw materials*. en. Website. ISBN : 9789279897450 9789279897467 Library Catalog : op.europa.eu Publisher : Publications Office of the European Union. Nov. 2018. URL : <https://op.europa.eu:443/en/publication-detail/-/publication/117c8d9b-e3d3-11e8-b690-01aa75ed71a1> (visité le 13/03/2020).
- [164] *NOVA, pour une aéronautique plus verte*. fr-FR. Library Catalog : www.onera.fr. URL : <https://www.onera.fr/fr/actualites/nova-pour-une-aeronautique-plus-verte> (visité le 03/03/2020).
- [165] Olivier SCHOLZ. « UNE ENTRÉE D'AIR OPTIMISÉE AVEC DÉBIT MOTEUR AJUSTÉ SOUS LA CONTRAINTE D'INGESTION DE COUCHE LIMITE ». fr. In : (), p. 129.
- [166] *Read "Commercial Aircraft Propulsion and Energy Systems Research : Reducing Global Carbon Emissions" at NAP.edu*. en. DOI : 10.17226/23490. URL : <https://www.nap.edu/read/23490/chapter/7> (visité le 03/03/2020).
- [167] *2016 Report to Congress | About the National Academies*. URL : <https://www.nationalacademies.org/annualreport/inst16.html> (visité le 13/03/2020).
- [168] Amir S. GOHARDANI, Georgios DOULGERIS et Riti SINGH. « Challenges of future aircraft propulsion : A review of distributed propulsion technology and its potential application for the all electric commercial aircraft ». en. In : *Progress in Aerospace Sciences* 47.5 (juil. 2011), p. 369-391. ISSN : 03760421. DOI : 10.1016/j.paerosci.2010.09.001. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0376042110000497>.

- [169] Cheryl L. BOWMAN, Ty V. MARIEN et James L. FELDER. « Turbo- and Hybrid-Electrified Aircraft Propulsion for Commercial Transport ». en. In : *2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium*. Cincinnati, Ohio : American Institute of Aeronautics et Astronautics, juil. 2018. ISBN : 978-1-62410-572-2. DOI : 10 . 2514/6 . 2018-4984. URL : <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2018-4984>.
- [170] *The electric aircraft is taking off* | TechCrunch. URL : <https://techcrunch.com/2018/07/08/the-electric-aircraft-is-taking-off/?guccounter=1> (visité le 05/03/2020).
- [171] Rhona SMITH. « Directive 2005/36/EC of the European Parliament and of the Council of 7 September 2005 ». en. In : *Core EU Legislation*. London : Macmillan Education UK, 2015, p. 216-261. ISBN : 978-1-137-54501-5 978-1-137-54482-7. DOI : 10 . 1007 / 978 - 1 - 137 - 54482 - 7 _ 24. URL : http://link.springer.com/10.1007/978-1-137-54482-7_24 (visité le 10/03/2020).
- [172] FORBES. *Avions Hybrides : Une Réalité De Demain*. fr-FR. Library Catalog : www.forbes.fr Section : Technologie. Sept. 2019. URL : <https://www.forbes.fr/technologie/avions-hybrides-une-realite-de-demain/> (visité le 28/02/2020).
- [173] Emma NYGREN, Kjell ALEKLETT et Mikael HÖÖK. « Aviation fuel and future oil production scenarios ». en. In : *Energy Policy*. Carbon in Motion : Fuel Economy, Vehicle Use, and Other Factors affecting CO2 Emissions From Transport 37.10 (oct. 2009), p. 4003-4010. ISSN : 0301-4215. DOI : 10 . 1016 / j . enpol . 2009 . 04 . 048. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421509003152>.
- [174] Marty K. Droney BRADLEY. *Subsonic Ultra Green Aircraft Research : Phase 2. Volume 2; Hybrid Electric Design Exploration*. Rapp. tech. Avr. 2015. URL : <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20150017039> (visité le 03/03/2020).
- [175] Charles E. LENTS et al. « Parallel Hybrid Gas-Electric Geared Turbofan Engine Conceptual Design and Benefits Analysis ». In : *52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*. American Institute of Aeronautics et Astronautics. DOI : 10 . 2514 / 6 . 2016 - 4610. URL : <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2016-4610> (visité le 03/03/2020).
- [176] Hüseyin ARAT et Meryem SÜRER. « State of art of hydrogen usage as a fuel on aviation ». In : *European Mechanical Science* 2 (jan. 2018), p. 20-30. DOI : 10 . 26701/ems . 364286.
- [177] Yusuf BICER et Ibrahim DINCER. « Life cycle evaluation of hydrogen and other potential fuels for aircrafts ». en. In : *International Journal of Hydrogen Energy* 42.16 (avr. 2017), p. 10722-10738. ISSN : 0360-3199. DOI : 10 . 1016 / j . ijhydene . 2016 . 12 . 119. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319916336667>.
- [178] Sandrine CARLIER, James SMITH et Frank JELINEK. « GAES – Future Engine Technology Environmental Impact ». en. In : (), p. 172.
- [179] K SEECKT et D SCHOLZ. « JET VERSUS PROP, HYDROGEN VERSUS KEROSENE FOR A REGIONAL FREIGHTER AIRCRAFT ». en. In : (2009), p. 12.
- [180] Baharozu E, Soykan G et Ozerdem MB. « Future aircraft concept in terms of energy efficiency and environmental factors ». ko. In : *Energy* 140 (2017). Publisher : Pergamon-Elsevier Science Ltd., Oxford, England, p. 1368-1377. URL : <https://www.cheric.org/research/tech/periodicals/view.php?seq=1595358>.
- [181] Dries VERSTRAETE. « Long range transport aircraft using hydrogen fuel ». en. In : *International Journal of Hydrogen Energy* 38.34 (nov. 2013), p. 14824-14831. ISSN : 0360-3199. DOI : 10 . 1016 / j . ijhydene . 2013 . 09 . 021. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031991302212X>.
- [182] Ahmad BAROUTAJI et al. « Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors ». en. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 106 (mai 2019), p. 31-40. ISSN : 13640321. DOI : 10 . 1016 / j . rser . 2019 . 02 . 022. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032119301157>.

- [183] A. SARTBAEVA et al. « Hydrogen nexus in a sustainable energy future ». en. In : *Energy & Environmental Science* 1.1 (juil. 2008). Publisher : The Royal Society of Chemistry, p. 79-85. ISSN : 1754-5706. DOI : 10.1039/B810104N. URL : <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2008/ee/b810104n>.
- [184] Volker QUASCHNING. *Understanding Renewable Energy Systems*. T. 67. Journal Abbreviation : International Journal of Environmental Studies Publication Title : International Journal of Environmental Studies. Jan. 2005. ISBN : 978-1-84407-128-9. DOI : 10.4324/9781315800493.
- [185] Magdalena MOMIRLAN et T. VEZIROGLU. « The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet ». In : *International Journal of Hydrogen Energy* 30 (juil. 2005), p. 795-802. DOI : 10.1016/j.ijhydene.2004.10.011.
- [186] Kaveh MAZLOOMI et Chandima GOMES. « Hydrogen as an energy carrier : Prospects and challenges ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (juin 2012), p. 3024-3033. DOI : 10.1016/j.rser.2012.02.028.
- [187] G. CORCHERO et J. L. MONTAÑÉS. « An approach to the use of hydrogen for commercial aircraft engines : » en. In : *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G : Journal of Aerospace Engineering* (nov. 2005). Publisher : SAGE Publications Sage UK : London, England. DOI : 10.1243/095441005X9139. URL : <https://journals.sagepub.com/doi/10.1243/095441005X9139>.
- [188] F. HAGLIND, A. HASSELROT et R. SINGH. « Potential of reducing the environmental impact of aviation by using hydrogen Part I : Background, prospects and challenges ». en. In : *The Aeronautical Journal* 110.1110 (août 2006). Publisher : Cambridge University Press, p. 533-540. ISSN : 0001-9240, 2059-6464. DOI : 10.1017/S000192400000141X. URL : <https://www.cambridge.org/core/journals/aeronautical-journal/article/potential-of-reducing-the-environmental-impact-of-aviation-by-using-hydrogen-part-i-background-prospects-and-challenges/127BE4AA33FFCF212879EE3BE78BC36A>.
- [189] Germain GONDOR. « Pour le stockage de l'hydrogène : Analyse thermodynamique de la formation d'hydrides métalliques et optimisation du remplissage d'un réservoir. » fr. In : (), p. 181.
- [190] *Hydrogen Aircraft Technology*. en. Library Catalog : www.crcpress.com/Hydrogen-Aircraft-Technology/Brewer/p/book/9780849358388 (visité le 06/03/2020).
- [191] Best Imaging WEB. *Sources*. fr-be. Library Catalog : www.h2life.org/fr/hydrogene/sources (visité le 06/03/2020).
- [192] Nout van ZON. « Liquid Hydrogen Powered Commercial Aircraft ». en. In : (), p. 16.
- [193] Paul PEETERS, Stefan GOSSLING et Susanne BECKEN. « Innovation towards tourism sustainability : climate change and aviation ». en. In : *International Journal of Innovation and Sustainable Development* 1.3 (2006), p. 184. ISSN : 1740-8822, 1740-8830. DOI : 10.1504/IJISD.2006.012421. URL : <http://www.inderscience.com/link.php?id=12421>.
- [194] Sebastian VERHELST et Thomas WALLNER. « Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engines ». en. In : (), p. 133.
- [195] *Fuel Cells - Hydrogen Fuel Cell Description & Advantages*. en-US. Library Catalog : www.hydrogenics.com/technology-resources/hydrogen-technology/fuel-cells/ (visité le 06/03/2020).
- [196] Thomas H. BRADLEY et al. « Development and experimental characterization of a fuel cell powered aircraft ». en. In : *Journal of Power Sources* 171.2 (sept. 2007), p. 793-801. ISSN : 03787753. DOI : 10.1016/j.jpowsour.2007.06.215. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775307013213>.
- [197] Rittmar von HELMOLT et Ulrich EBERLE. « Fuel cell vehicles : Status 2007 ». en. In : *Journal of Power Sources* 165.2 (mar. 2007), p. 833-843. ISSN : 03787753. DOI : 10.1016/j.jpowsour.2006.12.073. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775307000651>.

- [198] R. PETERS et R.C. SAMSUN. « Evaluation of multifunctional fuel cell systems in aviation using a multistep process analysis methodology ». en. In : *Applied Energy* 111 (nov. 2013), p. 46-63. ISSN : 03062619. DOI : 10.1016/j.apenergy.2013.04.058. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261913003541>.
- [199] Paloma FERREIRA-APARICIO, Julio J. CONDE et Antonio M. CHAPARRO. « Fundamentals and components of portable hydrogen fuel-cell systems ». en. In : *Portable Hydrogen Energy Systems*. Elsevier, 2018, p. 15-39. ISBN : 978-0-12-813128-2. DOI : 10.1016/B978-0-12-813128-2.00002-4. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128131282000024>.
- [200] 13.3 Aircraft Range : the Breguet Range Equation. URL : <https://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/notes/node98.html> (visité le 04/03/2020).
- [201] « Monthly Energy Review – February 2020 ». en. In : (2020), p. 270.
- [202] Clemente CAPASSO et Ottorino VENERI. « Experimental analysis on the performance of lithium based batteries for road full electric and hybrid vehicles ». en. In : *Applied Energy* 136 (déc. 2014), p. 921-930. ISSN : 0306-2619. DOI : 10.1016/j.apenergy.2014.04.013. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914003560>.
- [203] Shaohua MA et al. « A method to improve the efficiency of an electric aircraft propulsion system ». en. In : *Energy* 140 (déc. 2017), p. 436-443. ISSN : 0360-5442. DOI : 10.1016/j.energy.2017.08.095. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217314706>.
- [204] *Consommation de carburant des avions de ligne - To the FL350*. fr. Library Catalog. Mai 2019. URL : <http://cockpiter737.canalblog.com/archives/2019/05/20/37352138.html> (visité le 09/03/2020).
- [205] *Combien d'électrons se déplacent dans un courant électrique de 1 ampère?* - Quora. URL : <https://fr.quora.com/Combien-d%C3%A9lectrons-se-d%C3%A9placent-dans-un-courant-%C3%A9lectrique-de-1-amp%C3%A8re> (visité le 09/03/2020).
- [206] BEN et Ben BRELJE. *Deriving the modified Breguet range equation for a hybrid-turboelectric aircraft*. en. Library Catalog : brelje.net. Sept. 2017. URL : <https://brelje.net/blog/deriving-modified-breguet-range-equation-hybrid-turboelectric-aircraft/> (visité le 13/03/2020).
- [207] Souha ELMOUSADIK et al. « New Preliminary Sizing Methodology for a Commuter Airplane with Hybrid-Electric Distributed Propulsion ». In : *Advanced Aircraft Efficiency in a Global Air Transport System (AEGATS 18)*. Toulouse, France, oct. 2018, p. 1-11. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01994750>.
- [208] Ed DE REYES et John MACNEILL. « Can cargo drones solve air freight's logjams? A drone startup says its big vertical-takeoff flier would be quick to land, load, and take off again ». en. In : *IEEE Spectrum* 57.6 (juin 2020), p. 30-35. ISSN : 0018-9235, 1939-9340. DOI : 10.1109/MSPEC.2020.9099930. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9099930/>.
- [209] *State of the aviation ETS | Transport & Environment*. URL : <https://www.transportenvironment.org/state-aviation-ets> (visité le 28/03/2020).
- [210] *Carbon Price Viewer*. en-GB. Library Catalog : ember-climate.org. URL : <https://ember-climate.org/carbon-price-viewer/> (visité le 30/03/2020).
- [211] Sam MORGAN. *Ryanair joins EU's top polluter club*. en-GB. Library Catalog : www.euractiv.com Section : Aviation. Avr. 2019. URL : <https://www.euractiv.com/section/aviation/news/ryanair-joins-eus-top-polluter-club/> (visité le 30/03/2020).
- [212] Dmitrii BOGDANOV et al. « Solar photovoltaics demand for the global energy transition in the power sector ». In : *Progress in Photovoltaics : Research and Applications* 25 (août 2018), p. 523. DOI : 10.1002/pip.2950.
- [213] ANONYMOUS. *2050 long-term strategy - EU ETS Trends to 2050*. en. Text. Library Catalog : ec.europa.eu. Nov. 2016. URL : https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en.

- [214] James I. HILEMAN, Russell W. STRATTON et Pearl E. DONOHOO. « Energy Content and Alternative Jet Fuel Viability ». In : *Journal of Propulsion and Power* 26.6 (nov. 2010). Publisher : American Institute of Aeronautics and Astronautics, p. 1184-1196. DOI : 10 . 2514 / 1 . 46232. URL : <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.46232>.
- [215] Cassandra Vivian ROSEN. « Scenario based lifecycle analysis of greenhouse gas emissions from petroleum-derived transportation fuels in 2050 ». en. In : (), p. 96.
- [216] Carla GROBLER et al. « Marginal climate and air quality costs of aviation emissions ». en. In : *Environmental Research Letters* 14.11 (nov. 2019). Publisher : IOP Publishing, p. 114031. ISSN : 1748-9326. DOI : 10 . 1088 / 1748 - 9326 / ab4942. URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab4942>.
- [217] Mahdi FASIHI. « Techno-economic assessment of LNG and diesel production and global trading based on hybrid PV-Wind power plants and PTG, GTL AND PTL technologies ». Pages : 268 Volume : 99. Thèse de doct. Mai 2017.
- [218] Mark CAMILLERI. « Aircraft Operating Costs and Profitability ». In : jan. 2018. DOI : 10 . 1007 / 978 - 3 - 319 - 49849 - 2 _ 12.
- [219] ICAO - Operating cost. URL : <https://www.icao.int/Search/pages/results.aspx?k=Operating%20cost> (visité le 02/04/2020).
- [220] Ronald E. MILLER. « Capital Costs in Air Transportation ». In : *The Journal of Industrial Economics* 12.3 (). Publisher : Wiley, p. 236-249. ISSN : 0022-1821. DOI : 10 . 2307 / 2097660. URL : <https://www.jstor.org/stable/2097660>.
- [221] Coût moyen pondéré du capital. fr. Page Version ID : 167905644. Fév. 2020. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Co%C3%BBt_moyen_pond%C3%A9r%C3%A9_du_capital&oldid=167905644 (visité le 01/04/2020).
- [222] Capital recovery factor. en. Library Catalog : capital.com. URL : <https://capital.com/capital-recovery-factor-definition> (visité le 08/04/2020).
- [223] Capital recovery factor. en. Page Version ID : 923516336. Oct. 2019. URL : https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Capital_recovery_factor&oldid=923516336 (visité le 01/04/2020).
- [224] The economics of airlines financial performance and wider economic benefits. en. Library Catalog : www.iata.org. URL : <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-economics-of-airline-financial-performance--wider-benefits/> (visité le 03/04/2020).
- [225] How Are Planes Decommissioned and How Much Value Can Be Salvaged? en. Library Catalog : www.flexport.com. URL : <https://www.flexport.com/blog/decommissioned-planes-salvage-value/> (visité le 05/04/2020).
- [226] What is a capital expenditure (CAPEX)? definition and meaning. en. Library Catalog : www.businessdictionary.com. URL : <http://www.businessdictionary.com/definition/capital-expenditure-CAPEX.html> (visité le 01/04/2020).
- [227] Kay PLÖTNER et al. « Operating Cost Estimation for Electric-Powered Transport Aircraft ». In : août 2013. DOI : 10 . 2514 / 6 . 2013 - 4281.
- [228] Boeing price list 2019. en. Library Catalog : www.statista.com. URL : <https://www.statista.com/statistics/273941/prices-of-boeing-aircraft-by-type/> (visité le 02/04/2020).
- [229] Jet Fuel Price Monitor. en. Library Catalog : www.iata.org. URL : <https://www.iata.org/en/publications/economics/fuel-monitor/> (visité le 29/03/2020).
- [230] Liam J.F. COMIDY, Mark D. STAPLES et Steven R.H. BARRETT. « Technical, economic, and environmental assessment of liquid fuel production on aircraft carriers ». en. In : *Applied Energy* 256 (déc. 2019), p. 113810. ISSN : 03062619. DOI : 10 . 1016 / j . apenergy . 2019 . 113810. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261919314977>.

- [231] Georgi ATANASOV. *E2FLIGHT Conference 2020 Stuttgart*. EN. Fév. 2020.
- [232] FPFIS TEAM. *WELL-TO-TANK Report version 4.a : JEC WELL-TO-WHEELS ANALYSIS*. en. Text. Library Catalog : ec.europa.eu. Mai 2014. URL : <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/well-tank-report-version-4a-jec-well-wheels-analysis> (visité le 31/03/2020).
- [233] Daniel TEICHMANN, Wolfgang ARLT et Peter WASSERSCHIED. « Liquid Organic Hydrogen Carriers as an efficient vector for the transport and storage of renewable energy ». en. In : *International Journal of Hydrogen Energy* 37.23 (déc. 2012), p. 18118-18132. ISSN : 03603199. DOI : 10.1016/j.ijhydene.2012.08.066. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036031991201868X>.
- [234] *Modular Aircraft Clip-Air – TRACE*. en-GB. Library Catalog : www.epfl.ch. URL : <https://www.epfl.ch/research/domains/transportation-center/research-overview/aeronautics/modular-aircraft-clip-air/> (visité le 31/03/2020).
- [235] Ilja PAWEL. « The Cost of Storage – How to Calculate the Levelized Cost of Stored Energy (LCOE) and Applications to Renewable Energy Generation ». en. In : *Energy Procedia* 46 (2014), p. 68-77. ISSN : 18766102. DOI : 10.1016/j.egypro.2014.01.159. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610214001751>.
- [236] LCOE. fr. Page Version ID : 167310132. Fév. 2020. URL : <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=LCOE&oldid=167310132> (visité le 26/03/2020).
- [237] *What is the true cost to you behind energy storage?* en-US. Library Catalog : www.solarpowerworldonline.com Section : Components. Déc. 2016. URL : <https://www.solarpowerworldonline.com/2016/12/calculating-true-cost-energy-storage/> (visité le 26/03/2020).
- [238] *How to determine meaningful, comparable costs of energy storage*. en-US. Library Catalog : www.apricum-group.com Section : Articles and interviews. Mar. 2016. URL : <https://www.apricum-group.com/how-to-determine-meaningful-comparable-costs-of-energy-storage/> (visité le 26/03/2020).
- [239] Andreas BELDERBOS, Erik DELARUE et William D'HAESELEER. « CALCULATING THE LEVELIZED COST OF ELECTRICITY STORAGE? » en. In : (), p. 2.
- [240] Deidre WOLFF et al. « The Effects of Lithium Sulfur Battery Ageing on Second-Life Possibilities and Environmental Life Cycle Assessment Studies ». en. In : *Energies* 12.12 (juin 2019), p. 2440. ISSN : 1996-1073. DOI : 10.3390/en12122440. URL : <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/12/2440>.
- [241] Kandler SMITH et al. « Life prediction model for grid-connected Li-ion battery energy storage system ». en. In : *2017 American Control Conference (ACC)*. Seattle, WA, USA : IEEE, mai 2017, p. 4062-4068. ISBN : 978-1-5090-5992-8. DOI : 10.23919/ACC.2017.7963578. URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/7963578/>.
- [242] *Degradation of Li/S Battery Electrodes On 3D Current Collectors Studied Using X-ray Phase Contrast Tomography* | *Scientific Reports*. URL : <https://www.nature.com/articles/srep10921>.
- [243] « The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation ». en. In : *Current Biology* 7.3 (mar. 1997), R126. ISSN : 09609822. DOI : 10.1016/S0960-9822(97)70976-X. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S096098229770976X>.
- [244] *Lithium-Air : A Battery Breakthrough Explained* | *IFLScience*. URL : <https://www.iflscience.com/technology/lithium-air-battery-breakthrough-explained/> (visité le 27/03/2020).
- [245] Kisoo YOO et al. « A Review of Lithium-Air Battery Modeling Studies ». en. In : *Energies* 10.11 (nov. 2017), p. 1748. ISSN : 1996-1073. DOI : 10.3390/en10111748. URL : <http://www.mdpi.com/1996-1073/10/11/1748>.

- [246] Amin LAHNAOUI et al. « Optimizing hydrogen transportation system for mobility via compressed hydrogen trucks ». en. In : *International Journal of Hydrogen Energy* 44.35 (juil. 2019), p. 19302-19312. ISSN : 03603199. DOI : 10.1016/j.ijhydene.2018.10.234. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319918335171>.
- [247] *A better approach to airline costs* | McKinsey. en. Library Catalog : www.mckinsey.com. URL : <https://www.mckinsey.com/industries/travel-transport-and-logistics/our-insights/a-better-approach-to-airline-costs> (visité le 02/04/2020).
- [248] Joost ZUIDBERG. « Identifying airline cost economies : An econometric analysis of the factors affecting aircraft operating costs ». en. In : *Journal of Air Transport Management* 40 (août 2014), p. 86-95. ISSN : 0969-6997. DOI : 10.1016/j.jairtraman.2014.06.007. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969699714000817>.
- [249] Almas HESHMATI et Jungsuk KIM. « A Review of the Airline Industry ». en. In : *Efficiency and Competitiveness of International Airlines*. Sous la dir. d'Almas HESHMATI et Jungsuk KIM. Singapore : Springer, 2016, p. 51-73. ISBN : 978-981-10-1017-0. DOI : 10.1007/978-981-10-1017-0_3. URL : https://doi.org/10.1007/978-981-10-1017-0_3.
- [250] Bill BOSTOCK. *Airbus says it has the technology to fly planes with no pilots, but the challenge will be convincing people to get on them*. fr. Library Catalog : www.businessinsider.fr Section : -. Juin 2019. URL : <https://www.businessinsider.fr/us/airbus-says-pilotless-flights-ready-when-you-are-2019-6> (visité le 01/04/2020).
- [251] Josef KALLO. *E2FLIGHT Conference 2020 Stuttgart*. EN. Fév. 2020.
- [252] *Challenges of growth - European aviation in 2040*. en. Library Catalog : www.eurocontrol.int. URL : <https://www.eurocontrol.int/publication/challenges-growth-2018> (visité le 05/04/2020).
- [253] *Busiest Routes 2019*. URL : <https://www.oag.com/reports/busiest-routes-2019> (visité le 05/04/2020).
- [254] Yongha PARK et Morton E. O'KELLY. « Fuel burn rates of commercial passenger aircraft : variations by seat configuration and stage distance ». en. In : *Journal of Transport Geography* 41 (déc. 2014), p. 137-147. ISSN : 0966-6923. DOI : 10.1016/j.jtrangeo.2014.08.017. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966692314001793>.
- [255] *Fuel economy in aircraft*. en. Page Version ID : 946663448. Mar. 2020. URL : https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Fuel_economy_in_aircraft&oldid=946663448 (visité le 09/04/2020).
- [256] M.R. MANSOR et al. « Natural fiber polymer composites ». en. In : *Biomass, Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy*. Elsevier, 2019, p. 203-224. ISBN : 978-0-08-102426-3. DOI : 10.1016/B978-0-08-102426-3.00011-4. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081024263000114>.
- [257] Ulf Paul BREUER. *Commercial Aircraft Composite Technology*. en. Cham : Springer International Publishing, 2016. ISBN : 978-3-319-31917-9 978-3-319-31918-6. DOI : 10.1007/978-3-319-31918-6. URL : <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-31918-6>.
- [258] *Définition d'un matériau Composite*. URL : <http://www.composite.free.fr/materiaucomposite.html> (visité le 03/05/2020).
- [259] Naveen Jesu AROCKIAM, Mohammad JAWAID et Naheed SABA. « Sustainable bio composites for aircraft components ». en. In : *Sustainable Composites for Aerospace Applications*. Elsevier, 2018, p. 109-123. ISBN : 978-0-08-102131-6. DOI : 10.1016/B978-0-08-102131-6.00006-2. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081021316000062>.
- [260] THE FACULTY OF OPERATION AND ECONOMICS OF TRANSPORT THE AIR TRANSPORT DEPARTMENT UNIVERZITNA 1, 010 26 ZILINA, SLOVAK REPUBLIC, MRAZ.MARIE@GMAIL.COM et Mrazova MARIA. « Advanced composite materials of the future in aerospace industry ». en. In : *INCAS BULLETIN* 5.3 (sept. 2013), p. 139-150. ISSN : 20668201, 22474528. DOI : 10.13111/2066-8201.2013.5.3.14. URL : http://bulletin.incas.ro/files/mrazova_m_v5_iss_3_full.pdf.

- [261] Jens BACHMANN, Carme HIDALGO et Stéphanie BRICOUT. « Environmental analysis of innovative sustainable composites with potential use in aviation sector—A life cycle assessment review ». en. In : *Science China Technological Sciences* 60.9 (sept. 2017), p. 1301-1317. ISSN : 1674-7321, 1869-1900. DOI : 10.1007/s11431-016-9094-y. URL : <http://link.springer.com/10.1007/s11431-016-9094-y>.
- [262] Jens BACHMANN et al. « Outlook on ecologically improved composites for aviation interior and secondary structures ». en. In : *CEAS Aeronautical Journal* 9.3 (sept. 2018), p. 533-543. ISSN : 1869-5582, 1869-5590. DOI : 10.1007/s13272-018-0298-z. URL : <http://link.springer.com/10.1007/s13272-018-0298-z>.
- [263] *Aluminum Alloy Development for the Airbus A380 : Total Materia Article*. URL : <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=227> (visité le 30/04/2020).
- [264] R ARRAVIND, Dr M SARAVANAN et R Mohamed RIJUVAN. « STRUCTURAL ANALYSIS OF SPAR MADEUP OF CARBON FIBRE COMPOSITE MATERIAL ». en. In : (2013), p. 7.
- [265] Kandasamy JAYAKRISHNA et al. « Materials selection for aerospace components ». en. In : *Sustainable Composites for Aerospace Applications*. Elsevier, 2018, p. 1-18. ISBN : 978-0-08-102131-6. DOI : 10.1016/B978-0-08-102131-6.00001-3. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081021316000013>.
- [266] Xenofon KATIFES. « BENG MECHANICAL ENGINEERING hONOUR'S PROJECT ». en. In : (), p. 68.
- [267] *Structure des ailes d'un aérodyné*. URL : <https://www.lavionnaire.fr/CelluleAilesSec.php> (visité le 22/04/2020).
- [268] « Useful Solutions for Standard Problems ». en. In : *Materials Selection in Mechanical Design*. Elsevier, 2011, p. 525-558. ISBN : 978-1-85617-663-7. DOI : 10.1016/B978-1-85617-663-7.00019-9. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781856176637000199>.
- [269] *CES EduPack | Granta Design*. URL : <https://grantadesign.com/fr/education/ces-edupack/> (visité le 24/04/2020).
- [270] Peter DOBSON. « DESIGN OF A WING SPAR ». en. In : (), p. 18.
- [271] « Modelling and Structural Analysis of Three-Dimensional Wing ». en. In : *International Journal of Engineering and Advanced Technology* 9.1 (oct. 2019), p. 6820-6828. ISSN : 2249-8958. DOI : 10.35940/ijeat.A2983.109119. URL : <https://www.ijeat.org/wp-content/uploads/papers/v9i1/A2983109119.pdf> (visité le 30/04/2020).
- [272] *Wings (Part One)*. URL : <http://www.flight-mechanic.com/wings-part-one/> (visité le 30/04/2020).
- [273] Michael F. ASHBY. « Multiple Constraints and Conflicting Objectives ». en. In : *Materials Selection in Mechanical Design*. Elsevier, 2011, p. 197-216. ISBN : 978-1-85617-663-7. DOI : 10.1016/B978-1-85617-663-7.00007-2. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781856176637000072>.
- [274] Mohammad ASIM et al. « Potential of natural fiber/biomass filler-reinforced polymer composites in aerospace applications ». en. In : *Sustainable Composites for Aerospace Applications*. Elsevier, 2018, p. 253-268. ISBN : 978-0-08-102131-6. DOI : 10.1016/B978-0-08-102131-6.00012-8. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081021316000128>.
- [275] *Sustainable Composites for Aerospace Applications*. en. Elsevier, 2018. ISBN : 978-0-08-102131-6. DOI : 10.1016/C2016-0-01691-1. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/C20160016911>.
- [276] Zhongsen ZHANG et al. « High performances of plant fiber reinforced composites—A new insight from hierarchical microstructures ». en. In : *Composites Science and Technology* 194 (juil. 2020), p. 108151. ISSN : 02663538. DOI : 10.1016/j.compscitech.2020.108151. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266353819332087>.

- [277] N. KARTHI et al. « An overview : Natural fiber reinforced hybrid composites, chemical treatments and application areas ». en. In : *Materials Today : Proceedings* (jan. 2020), S2214785320300511. ISSN : 22147853. DOI : 10.1016/j.matpr.2020.01.011. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214785320300511>.
- [278] Muhammad H. HAMIDON et al. « Effects of fibre treatment on mechanical properties of kenaf fibre reinforced composites : a review ». en. In : *Journal of Materials Research and Technology* 8.3 (mai 2019), p. 3327-3337. ISSN : 22387854. DOI : 10.1016/j.jmrt.2019.04.012. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2238785418308561>.
- [279] *Potential of Sustainable Materials in Wing Structural Design*. en. Library Catalog : www.researchgate.net/publication/274016830_Potential_of_Sustainable_Materials_in_Wing_Structural_Design (visité le 03/05/2020).
- [280] CYCOM®. en. Library Catalog : www.solvay.com/en/brands/cycom (visité le 03/05/2020).
- [281] Michael F. ASHBY. « Processes and Process Selection ». en. In : *Materials Selection in Mechanical Design*. Elsevier, 2011, p. 367-414. ISBN : 978-1-85617-663-7. DOI : 10.1016/B978-1-85617-663-7.00013-8. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781856176637000138>.
- [282] *GKN Aerospace manufactures Airbus A350 XWB wing spars using Umeco's large-scale composite tooling mandrels*. en. Library Catalog : www.jeccomposites.com/knowledge/international-composites-news/gkn-aerospace-manufactures-airbus-a350-xwb-wing-spars-using (visité le 08/05/2020).
- [283] *LMECA2453 - Advanced Manufacturing Technologies*. en.
- [284] A. CROSKY et al. « 4 - Fibre placement processes for composites manufacture ». en. In : *Advances in Composites Manufacturing and Process Design*. Sous la dir. de Philippe BOISSE. Woodhead Publishing, jan. 2015, p. 79-92. ISBN : 978-1-78242-307-2. DOI : 10.1016/B978-1-78242-307-2.00004-X. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978178242307200004X>.
- [285] *Airbus A400M Atlas*. en. Page Version ID : 953468758. Avr. 2020. URL : https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Airbus_A400M_Atlas&oldid=953468758 (visité le 07/05/2020).
- [286] *A400M wing assembly : Challenge of integrating composites : CompositesWorld*. URL : <https://www.compositesworld.com/articles/a400m-wing-assembly-challenge-of-integrating-composites> (visité le 07/05/2020).
- [287] Wilhelm WOIGK et al. « Experimental investigation of the effect of defects in Automated Fibre Placement produced composite laminates ». en. In : *Composite Structures* 201 (oct. 2018), p. 1004-1017. ISSN : 02638223. DOI : 10.1016/j.compstruct.2018.06.078. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822317339946>.
- [288] Jonathan P.-H. BELNOUE et al. « Understanding and predicting defect formation in automated fibre placement pre-preg laminates ». en. In : *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* 102 (nov. 2017), p. 196-206. ISSN : 1359835X. DOI : 10.1016/j.compositesa.2017.08.008. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X17303081>.
- [289] V. CAPITANI, M. CAPRIOLO et D. SENI. « Characterization of casting defects in composite carbon fiber material detected by ultrasonic inspection ». en. In : *Ultrasound* 66.2 (juil. 2011), p. 14-20. ISSN : 1392-2114. DOI : 10.5755/j01.u.66.2.525. URL : <http://www.ultragarsas.ktu.lt/index.php/USnd/article/view/525>.
- [290] S PACIORNIK et al. « Analysis of the mechanical behavior and characterization of pultruded glass fiber-resin matrix composites ». en. In : *Composites Science and Technology* 63.2 (fév. 2003), p. 295-304. ISSN : 02663538. DOI : 10.1016/S0266-3538(02)00249-X. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S026635380200249X>.

-
- [291] Anthony JOHNSON et Andrew GIBSON. « Sustainability and Its Application Within Engineering Design ». en. In : *Sustainability in Engineering Design*. Elsevier, 2014, p. 65-111. ISBN : 978-0-08-099369-0. DOI : 10 . 1016 / B978 - 0 - 08 - 099369 - 0 . 00003 - 0 . URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780080993690000030>.
- [292] U KLING et al. « FUTURE AIRCRAFT STRUCTURES USING RENEWABLE MATERIALS ». In : sept. 2015.
- [293] Michael F. ASHBY. « Assessing Sustainable Developments ». en. In : *Materials and Sustainable Development*. Elsevier, 2016, p. 39-54. ISBN : 978-0-08-100176-9. DOI : 10 . 1016 / B978 - 0 - 08 - 100176 - 9 . 00003 - 7 . URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081001769000037>.
- [294] Nathalie MAYER. *Le record de supraconductivité à haute température confirmé*. fr. Library Catalog : www.futura-sciences.com Section : physique. URL : <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/supraconducteur-record-supraconductivite-haute-temperature-confirme-59399/> (visité le 10/06/2020).
- [295] JC. Airbus MAVERIC : l'aile volante, alternative crédible aux avions classique ? fr-FR. Library Catalog : thegoodlife.thegoodhub.com Section : The Good Flights. URL : <https://thegoodlife.thegoodhub.com/diaporama/airbus-maveric-laile-volante-une-alternative-credible-aux-avions-classique/> (visité le 03/06/2020).
- [296] Yohan KIM, Joosung LEE et Jaemyung AHN. « Innovation towards sustainable technologies : A socio-technical perspective on accelerating transition to aviation biofuel ». en. In : *Technological Forecasting and Social Change* 145 (août 2019), p. 317-329. ISSN : 00401625. DOI : 10 . 1016 / j . techfore . 2019 . 04 . 002 . URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S004016251730611X>.
- [297] *L'aéroport de Charleroi aura bientôt des panneaux photovoltaïques*. fr. Library Catalog : www.lanouvellegazette.be. Oct. 2019. URL : <http://www.lanouvellegazette.be/448653/article/2019-10-03/laeroport-de-charleroi-aura-bientot-des-panneaux-photovoltaïques> (visité le 04/06/2020).
- [298] *Liege Airport veut se mettre au vert : 7.000 nouveaux panneaux vont être installés sur ses toits d'ici 2020*. fr. Library Catalog : www.sudinfo.be. Juil. 2019. URL : <https://www.sudinfo.be/id132362/article/2019-07-25/liege-airport-veut-se-mettre-au-vert-7000-nouveaux-panneaux-vont-etre-installes> (visité le 04/06/2020).

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl