



RAPPORT GÉNÉRAL

ÉTUDE DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DE L'INDUSTRIE MANUFACTURIÈRE AÉRONAUTIQUE ET DES MOYENS DE RÉDUCTION DE CET IMPACT



C. ATIN, S. DURA ,
A. LASSERRE, B. ROIRON, ISAE-SUPAERO
R. ZUPPO

Septembre 2021 — Mars 2022

Résumé : L'industrie manufacturière aéronautique compte pour 2% des émissions de gaz à effet de serre du secteur aérien. On cherche ici à définir ces impacts en fonction de différents indicateurs : **émissions de gaz à effet de serre, consommation d'énergie et génération de déchets**. On étudie la **phase manufacturière** et la **production de matériaux** (aluminium, titane, fibres de carbone et acier). Nous avons décidé d'étudier l'impact de la production du fuselage d'Airbus A320 et constaté que les matériaux critiques sur lesquels il est important d'évoluer sont le titane et les fibres de carbone.

Diverses solutions existent pour réduire cet impact environnemental. Une première possibilité est d'améliorer l'efficacité des moyens de production en agissant sur les sources d'énergie, via leur décarbonation, ou en changeant les méthodes de production via l'intégration de méthodes telles que la fabrication additive qui permet d'agir sur tous les indicateurs évoqués. Une seconde possibilité est d'agir sur l'efficacité des matériaux en les recyclant ou en les remplaçant. Des solutions novatrices pour le **recyclage** des fibres de carbone et des métaux sont à l'étude et sont très prometteuses pour réduire leur impact environnemental à la production.

Abstract : The aeronautical manufacturing industry accounts for 2% of the aviation sector's greenhouse gas emissions. We seek to define these impacts according to different indicators : **greenhouse gas emissions, energy consumption and waste generation**. We study the **manufacturing phase** and the **production of materials** (aluminum, titanium, carbon fiber and steel). We decided to study the impact of the production of the Airbus A320 fuselage and found that the critical materials on which it is important to evolve are titanium and carbon fiber.

Various solutions exist to reduce this environmental impact. The first possibility is to improve the efficiency of the means of production by acting on the energy sources, via their decarbonization, or by changing the production methods via the integration of methods such as additive manufacturing, which makes it possible to act on all the indicators mentioned. A second possibility is to act on the efficiency of materials by recycling or replacing them. Innovative solutions for the **recycling** of carbon fibers and metals are being studied and are very promising for reducing their environmental impact during production.

Introduction

En prévision de 2050, le tonnage total de matières premières nécessaire au développement de énergies vertes sera de 2 à 8 fois la production mondiale de 2010. Comment s'adapter à ce contexte et s'inscrire dans le cadre d'une recherche aérospatiale plus verte ? Si la nécessité des voyages en avion commence à faire débat, il reste le mode de transport indispensable pour changer de continent et trouver une alternative serait difficilement concevable dans le monde interconnecté d'aujourd'hui. Dans ce cas, il devient nécessaire de repenser le secteur aéronautique et en opérer une transition vers un mode moins polluant, mais aussi moins nécessiteux en ressources énergétiques ou naturelles.

Bien que représentant 2,5% des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) par la consommation de combustible fossile, l'aéronautique est la cause d'autres facteurs néfastes, comme l'émission d'oxydes d'azote (NOx), provoquant des pluies acides et ayant un effet indirect sur le réchauffement climatique, ainsi que les traînées de condensation qui augmentent la part de l'aéronautique à 5% des émissions mondiales. L'industrie manufacturière aéronautique compte, elle, pour 1% des émissions du secteur aérien, faisant de cette industrie une part infime des émissions de gaz à effets de serre dans le monde. Cependant ses impacts sont mal connus et donc sous-estimés. Il est important de prendre en compte tous aspects de la production d'aéronefs. En effet, sa consommation énergétique est équivalente à la production de douze centrales nucléaires et les émissions de gaz à effet de serre pour la production de cette énergie ne sont pas comptabilisées dans l'emprunte totale du secteur aéronautique. Finalement, sa consommation de matières premières et d'eau favorisent les pénuries et ont un impact non négligeable sur l'environnement. Il serait donc intéressant de trouver et d'évaluer des moyens pour réduire l'impact du secteur manufacturier aéronautique sur l'environnement.

Dans ce cadre et dans celui de l'amélioration des technologies, de nombreuses solutions ont été envisagées ou mises en œuvre dans le domaine de la recherche voire de l'industrie. La pertinence, la faisabilité et le déploiement à l'échelle industrielle sont évaluées, et des résultats sont déjà accessibles. Ces solutions visent à réduire les émissions de gaz à effet de serre, réduire la consommation d'énergie ou de matières premières, améliorer l'efficacité des matériaux ou encore trouver des matériaux de remplacement. Le recyclage des pièces en fin de vie ou la fabrication additive font partie de ces solutions mais impliquent avec leur développement de nombreux défis, par exemple l'incertitude sur l'état physico-chimique ou sur la tenue mécanique des matériaux, influant sur la sécurité même des aéronefs. Il est donc nécessaire de savoir maintenant si ces différentes solutions sont applicables au secteur manufacturier aéronautique, et si elles peuvent participer à la réduction de son impact environnemental.

Ce rapport s'attachera à faire un bilan d'abord général de l'impact environnemental du secteur manufacturier aéronautique puis en se concentrant sur la gamme d'avions Airbus et plus précisément sur la production de fuselages de l'A320 et de son impact sur différents aspects introduits préalablement. Il aura pour objectif suivant d'évaluer les solutions retenues pour ré-

duire cet impact sur le secteur puis d'en mesurer la pertinence et l'ampleur sur l'exemple du fuselage de l'A320.

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un projet étudiant réalisé au sein du DMSM de l'ISAE-SUPAERO et s'appuiera grandement sur l'étude bibliographique menée au préalable au cours de ce projet.

Table des matières

1	Bilan général de l'impact environnemental du secteur manufacturier aéronautique	1
1.1	Etape matériaux	1
1.1.1	Analyse	1
1.1.2	Impacts environnementaux	2
1.2	Etape manufacturière	4
1.2.1	Analyse	4
1.2.2	Impacts environnementaux	5
1.3	Etude de cas Airbus	7
1.3.1	Méthode et indicateurs	8
1.3.2	Empreinte carbone (EC)	8
1.3.3	Besoin en énergie	11
1.3.4	Génération de déchets	14
1.3.5	Bilan des indicateurs	16
1.4	Étude de cas du fuselage de l'A320 d'Airbus	19
2	Moyens de réduction de cet impact environnemental	22
2.1	Améliorer l'efficacité des moyens de production	22
2.1.1	Agir sur les sources d'énergie	22
2.1.2	Changer les méthodes de production	26
2.2	Améliorer l'efficacité des matériaux	28
2.3	Remplacer	33
2.4	Étude de cas du fuselage de l'A320 d'Airbus	34

Chapitre 1

Bilan général de l'impact environnemental du secteur manufacturier aéronautique

Cette partie a pour objectif d'exposer dans les détails les impacts des différentes étapes de l'industrie manufacturière aéronautique sur l'environnement. Après avoir fait le bilan pour les deux étapes matériaux et manufacturière, elle développera cet impact à partir de chiffres pour calculer les indicateurs introduits et les appliquer aux différents avions de la gamme d'avions Airbus. Finalement, le cas du fuselage de l'A320 sera étudié afin de mesurer son impact sur l'environnement sous le prisme des trois indicateurs retenus.

1.1 Etape matériaux

La première étape de la construction d'un avion est l'étape des matériaux, cela comprend notamment l'extraction, la production et le transport aux fabricants. Pour cette étape, seuls les principaux matériaux sur la base de leur poids ont été étudiés, car ce sont eux qui représentent le plus la flotte aérienne. Bien que les composants d'un avion soient d'une très grande variété, quatre groupes de matériaux représente plus de 90% de la masse d'un avion : les alliages d'aluminium, les alliages de titane, les alliages d'acier et les polymères renforcés de fibres de carbone (CFRP). En général, l'aluminium, l'acier et le CFRP sont utilisés pour la fabrication de la structure de l'avion tandis que l'acier et le titane sont utilisés pour le moteur de l'avion.

1.1.1 Analyse

Afin de déterminer les impacts environnementaux de l'étape matériaux, une méthode est de multiplier la demande globale de matériaux du secteur aéronautique et les intensités environnementales associées des processus de production moyens. Il faut donc déterminer la consommation annuelle de matériaux du secteur et les intensités environnementales.

Pour la demande globale du secteur aéronautique deux approches sont possibles : L'approche « top-down » consiste à estimer la consommation annuelle de matériaux au niveau de l'ensemble du secteur. Peu de littérature scientifique existe à l'échelle sectorielle, L'article d'E. Pierrat^[10] utilise des estimations de la demande totale de matières faites par des spécialistes du marché aéronautique. L'approche « bottom-up » se concentre sur l'estimation de la demande

annuelle de matériaux sur la base du nombre d'avions livrés en une année, combinée à la composition des matériaux pour un avion civil moyen. Il considère un poids total qui comprend environ 53% d'aluminium, 10% d'acier, 8% de titane, 28% de composites et 3% d'autres matériaux, sur la base de la composition des avions les plus livrés par Airbus et Boeing. Les pertes de matériaux survenant au cours de la fabrication ont également été prises en compte à l'aide de ratios "buy-to-fly" (BTF). L'article^[10] utilise les deux approches afin d'avoir un résultat plus précis.

On définit l'intensité environnementale comme la quantité de l'indicateur environnemental associée à la production d'une unité de masse de matière. Les intensités environnementales des processus de production des matériaux peuvent être trouvées à partir de base de données d'inventaire du cycle de vie (ICV ou ecoinvent^[10]) ou via la littérature scientifique (notamment pour les fibres de carbone). Il faut aussi prendre en compte la part de matériaux recyclés car cela peut influencer de manière significative la performance environnementale de l'étape matériaux. Les métaux tels que l'aluminium et l'acier sont efficacement recyclés dans le monde, à l'inverse du titane et des CFRP.

1.1.2 Impacts environnementaux

Cette étude se portant principalement sur les constructeurs aéronautiques, il est important de noter que leur levier afin de diminuer les impacts environnementaux de l'étape matériaux est limité. En effet, l'extraction de matériaux se fait par de grands groupes peu influençables, les constructeurs n'ont que peu de poids afin changer réellement la manière d'extraire les matériaux, comme expliqué par E. Pierrat.

Les indicateurs environnementaux calculés par l'article d'E. Pierrat^[10] pour l'année 2017 ont été résumés dans les graphiques suivants :

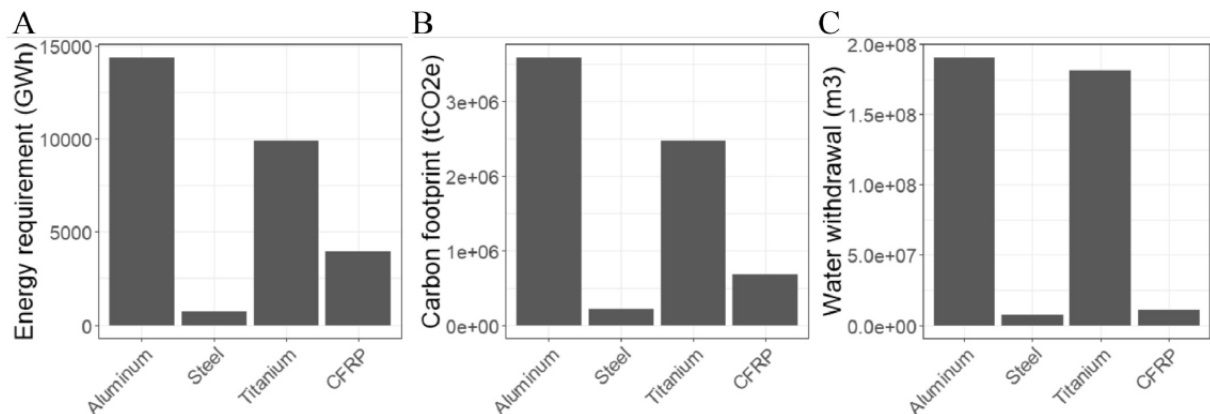


FIGURE 1.1 – Impacts environnementaux des quatre matériaux : Aluminium, acier, titane et CFRP

Pour l'étape matériaux, les valeurs suivantes des indicateurs ont été obtenues : une empreinte carbone de $9.96 Mt_{eq,CO_2}$, une consommation en eau de 391 millions de m^3 et des besoins en énergie de $29 TWh$. On remarque que l'aluminium a les plus gros impacts environnementaux pour les trois indicateurs du graphique. Ensuite vient le titane, les CFRP et finalement l'acier. Ces résultats sont à nuancer car l'aluminium bien qu'étant prépondérant, est aussi le métal le

plus utilisé dans un avion, à raison d'environ la moitié de la masse d'un avion, ce qui engendre forcément des indicateurs élevés.

1.2 Etape manufacturière

Une fois que les matériaux ont été produits, une nouvelle étape démarre avec les fabricants du secteur aérien. Cette étape regroupe de nombreux acteurs, possédant différents postes au sein de la supply chain. Il est assez complexe d'obtenir des données sur la fabrication des avions. En effet, de nombreux constructeurs préfèrent garder leurs données confidentielles, ou mettre en avant les résultats les plus "satisfaisants" sur le plan environnemental. Nous avons néanmoins tenté de quantifier l'impact environnemental de cette étape.

1.2.1 Analyse

Différents points de vue sont possibles pour étudier ce problème. La première possibilité est de séparer les constructeurs aéronautiques en fonction de leur position dans la supply chain. On calcule ensuite pour chaque groupe son impact sur l'environnement. Cette séparation permet de rendre plus facile l'évaluation de l'impact sur l'environnement, en supposant qu'au sein d'un même groupe, les entreprises suivent les mêmes processus de fabrication.

Un second point de vue possible est de raisonner en distinguant les parties de l'avion comme le fuselage, le moteur, ou encore les ailes, et l'on tente de mesurer l'impact environnemental moyen de la fabrication de cette partie. Il faut rester vigilant sur le fait que l'impact environnemental de la fabrication des matériaux a déjà été évalué dans la partie précédente pour éviter une double comptabilisation.

Pour réaliser l'étude de l'étape manufacturière, l'article d'E. Pierrat^[10] a décomposé les données des 100 plus grandes entreprises du secteur aérien. Sur ce total, seul 88 entreprises ont pu être étudiées, en raison du manque de données sur certaines compagnies. Pour suivre le premier point de vue, ces entreprises ont été divisées en quatre grands groupes, en fonction de leur position dans la supply chain : le tier 3 pour les entreprises focalisées sur la fabrication de composants, le tier 2 pour les assembleurs de sous-systèmes, le tier 1 pour les fabricants de systèmes et le tier 0 pour les assembleurs finaux, type Airbus ou Boeing. Une étude a également été menée en raisonnant par modules : les entreprises sont regroupées en fonction des parties de l'avion qu'elles conçoivent : le module électroniques, le module système, le module propulsion et le module fuselage. Certaines entreprises faisant partie de plusieurs modules, il a été choisi d'employer une méthode d'allocation^[10] : les parts d'allocation sont proportionnelles aux ventes de l'unité de l'entreprise dédiée au module, par rapport aux ventes totales.

Après avoir divisé les entreprises par groupe, on regarde individuellement l'impact environnemental de chaque entreprise. La meilleure source de données reste les rapports environnementaux des entreprises. On détermine dans un premier temps les indicateurs de l'entreprise. On normalise ensuite ces indicateurs par les ventes, ce qui permet de tenir compte de la taille du fabricant. L'impact environnemental moyen de la catégorie (tier ou module) est obtenu en prenant la moyenne géométrique des impacts environnementaux des entreprises.

1.2.2 Impacts environnementaux

Bien que les rapports environnementaux soient obligatoires pour les sociétés cotées, de nombreuses entreprises restent encore floues sur l'aspect environnemental. Ainsi, les indicateurs environnementaux que nous avons décidé d'étudier sont transmis de manière inégale par les entreprises. Si l'empreinte carbone, largement démocratisée, est régulièrement transmise par les fabricants, la génération de déchets au contraire est plus difficile à obtenir.

Les indicateurs environnementaux calculés^[10] ont été résumés dans les graphiques suivants :

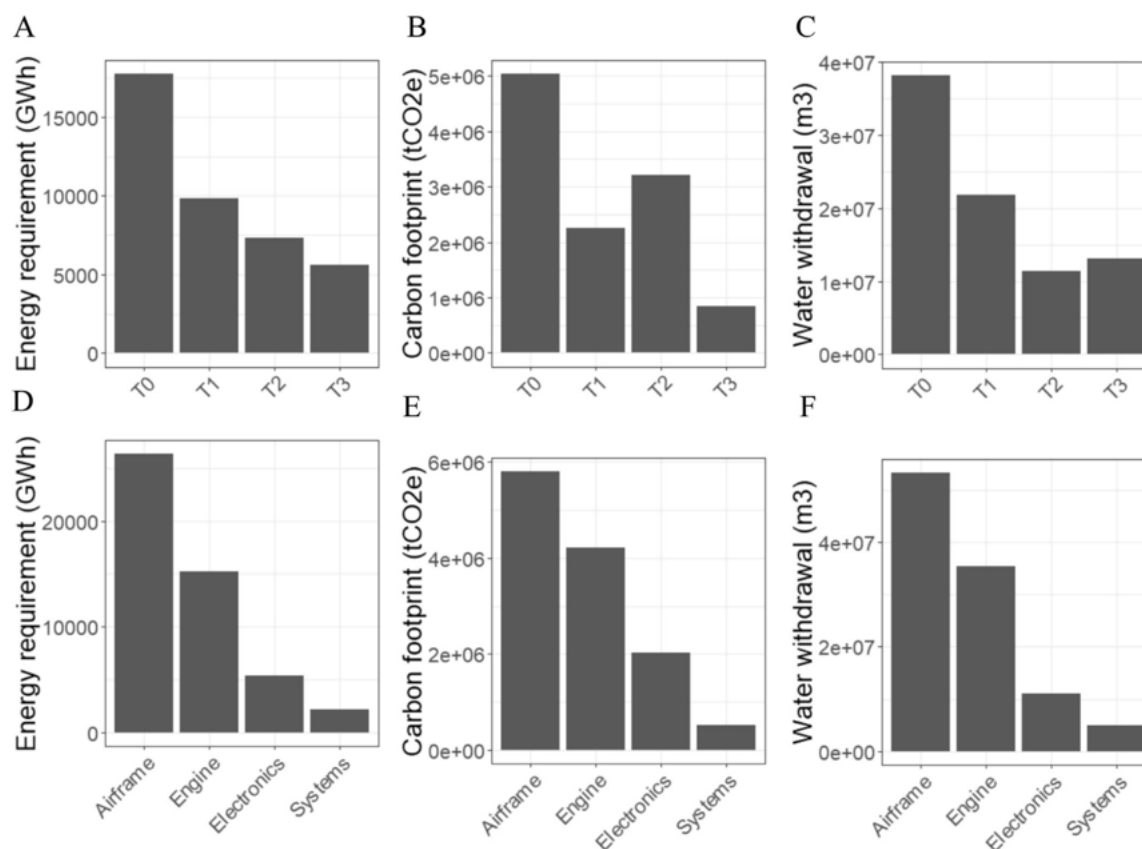


FIGURE 1.2 – Impacts environnementaux de l'étape manufacturière en fonction des modules de l'avion et des tiers

Par la classification Tiers, les valeurs suivantes des indicateurs ont été obtenues : une empreinte carbone de $11.4 Mt_{eq,CO_2}$, une consommation en eau de 84.4 millions de m^3 et des besoins en énergie de $40 TWh$. L'approche par Modules donne des résultats sensiblement plus élevés, de l'ordre de 20%. On remarque que ce sont les entreprises du tier 0, ou bien spécialisées dans le fuselage, qui ont le plus gros impact sur l'environnement. Les entreprises spécialisées dans les propulsions, principalement les tiers 1 et 2, arrivent en seconde position. Plus la position dans la supply chain est élevée, plus les entreprises réalisent des processus complexes et manipulent des pièces massives, assemblées tout au long de la supply chain. Cette logique

explique l'impact environnemental des assembleurs finaux.

Une idée intéressante est d'observer les indicateurs normalisés par les ventes des différentes catégories. Ceci est mis en évidence dans les graphiques ci-dessous :

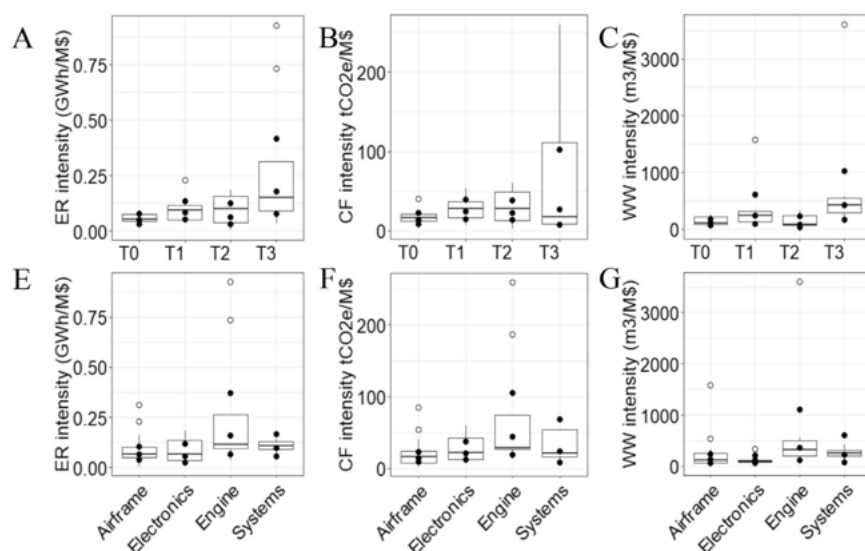


FIGURE 1.3 – Impacts environnementaux par vente de l'étape manufacturière en fonction des modules de l'avion et des tiers

L'ordre est quelque peu chamboulé, puisque ce sont les tiers 1 et 2 qui obtiennent les scores les plus élevés en matière d'empreinte carbone et de consommation d'énergie. Pour ce qui est de la classification Module, ce sont les entreprises spécialisées dans les moteurs et la propulsion qui ont les plus mauvais scores par rapport à leurs ventes.

1.3 Etude de cas Airbus

Dans cette partie, nous allons dresser un état des lieux de la répartition des répercussions environnementales du secteur manufacturier aérien. Pour cela, nous nous intéresserons aux quatre matériaux les plus utilisés dans la construction des avions de ligne actuels : l'aluminium, l'acier, le titane et les polymères renforcés aux fibres de carbone (CFRP). À eux quatre, ils représentent en moyenne 90% de la masse d'un avion^[10]. Afin de rendre plus concret cette comparaison entre matériaux, nous avons fait le choix d'appliquer nos calculs aux modèles construits par Airbus.

Pour réaliser notre étude nous avons donc besoin de la proportion de masse qu'occupe chacun des 4 matériaux choisis au sein des différents avions. Les détails des fractions massiques des aéronefs construits par Airbus sont donc détaillés dans la table suivante : 1.1 :

Modèle	Fraction massique % (FM)				
	Aluminium	Acier	Titane	CFRP	Total
A300/A310	67	12	4	9	92
A320	58	11	5	18	92
A330/A340	73	7	10	8	98
A380	75	7	8	7	97
A350	19	7	14	53	93

TABLE 1.1 – Fraction massique des quatre matériaux dans différents modèles Airbus

Nous répertorions également la masse totale de chacun des avions de la gamme Airbus qui vont nous permettre de mettre en perspective les fractions massiques détaillées plus haut. Tous les chiffres présentés dans le tableau précédent et dans le prochain serviront pour l'ensemble des calculs des 3 prochaines sous parties :

Modèle	Masse de l'avion (tonnes)
A300/A310	86,2
A320	40,3
A330/A340	115
A380	270
A350	200

TABLE 1.2 – Fraction massique des quatre matériaux dans différents modèles Airbus

Mesurer les conséquences de l'utilisation de ces quatre matériaux sur l'ensemble des externalités environnementales (cycle de l'eau, biodiversité et écosystèmes, toxicité des déchets,...) est à l'heure actuelle très complexe. En effet, à cause du manque de données pour certains critères (cosommation d'eau) ou à cause du caractère inquantifiable de certains autres (impact sur la biodiversité), il est difficile de trouver une métrique unique qui résume en même temps tous ces impacts pour chaque matériau. C'est pour cela que nous avons décidé de nous concentrer sur trois points nous semblant critiques :

- La quantité de CO_2 émis

- La consommation d'électricité
- La gestion des déchets

Ces indicateurs prennent en compte l'impact environnemental des quatre matériaux de leur création (extraction pour les métaux, conception pour CFRP) jusqu'à leur intégration dans l'avion. De plus, afin de prendre en compte l'intégralité des impacts pour chacun des matériaux, il est nécessaire d'introduire le Buy-to-fly ratio (BTF). Cet indicateur correspond au rapport entre la masse de matériau réellement consommé et la masse finale présente dans l'avion^[10]. Pour les quatre matériaux considérés, cet indicateur est fourni dans la table 1.3.

Matériau	Aluminium	Acier	Titane	CFRP
BTF	5 :1	16 :1	10 :1	1.5 :1

TABLE 1.3 – Buy-to-fly ratio pour les quatre matériaux

1.3.1 Méthode et indicateurs

Afin de pouvoir mesurer l'efficacité des moyens de réduction de l'impact environnemental de l'industrie aéronautique, il est nécessaire de détailler une méthode permettant de comparer ces indicateurs. Cette méthode suit celle détaillée dans l'article d'E. Pierrat^[10] mais réduira l'échelle et les limites de l'étude.

Les indicateurs utilisés dans la quantification de l'impact environnemental de la construction de chaque famille sont précisés :

- Besoins en énergie (BE) : consommation totale d'énergie de l'étape (en GWh)
- Empreinte carbone (EC) : capture la contribution des activités humaines au réchauffement climatique (t_{eqCO_2})
- Génération de déchets (GD) : somme de la masse des déchets générés solides et liquides (t)

1.3.2 Empreinte carbone (EC)

Dans un premier temps, pour calculer les émissions de GES de matériaux, il faut quantifier la masse d'équivalent CO_2 émise par masse de matériau produit (t_{eqCO_2}/t). Cet indicateur prend en compte l'émission de GES lors de l'extraction, de la transformation mais aussi du transport des matériaux entre le lieu d'extraction et le lieu d'utilisation.

On peut retenir les valeurs suivantes pour les émissions en masse d'équivalent CO_2 par tonne de matériau produit^[7] :

Matériau	Aluminium	Acier	Titane	CFRP
Emission (t_{eqCO_2}/t)	22,4	2	30	29,5

TABLE 1.4 – Emission d'équivalent CO_2 par tonne de métal produit

A la lecture de cette table, on constate que l'acier est le matériau le moins émetteur par tonne produite et l'aluminium arrive en deuxième. Cette comparaison simpliste n'est néanmoins pas révélatrice de la réalité des impacts au niveau de la construction un avion. En effet les 4 matériaux ne sont pas présents dans les mêmes proportions. Il faut donc calculer la masse totale de GES émis pour pouvoir comparer l'impact des différents matériaux. En prenant en compte le Buy To Fly ratio, on peut donc calculer pour les différents avions de la gamme Airbus, l'empreinte carbone en faisant le calcul suivant :

$$EC_{matériau, avion} = m_{avion} * FM_{matériau, avion} * BTF_{matériau} * EC_{unitaire_{matériau}}$$

On retrouve donc le détail par matériau et par avion dans le tableau 1.5.

Modèle	Masse de GES par matériau (t)				
	Aluminium	Acier	Titane	CFRP	Total
A300/A310	6468	331	1034	343	8177
A320	2618	1418	605	321	3685
A330/A340	9402	257	3450	407	13517
A380	22680	604	6480	836	30601
A350	4256	448	8400	4691	17795

TABLE 1.5 – Masse de GES émise par matériau et par avion

On exprime donc les mêmes données sous forme de % par avion dans le tableau 1.9.

Modèle	Fraction de la masse de GES par matériau (%)				
	Aluminium	Acier	Titane	CFRP	Total
A300/A310	79	4	13	4	100
A320	71	4	16	9	100
A330/A340	70	2	26	3	100
A380	74	2	21	3	100
A350	24	3	47	26	100

TABLE 1.6 – Pourcentage de la masse de GES émis par matériau et par avion

On constate que l'aluminium est le plus important émetteur de GES pour quasiment tous les avions. Ce résultat n'est pas surprenant car l'aluminium représente plus de 50% de la masse de la plupart des Airbus, possède un BTF moyen et une EC dans la moyenne supérieure. Parmi les anciens modèles excepté l'A350, il concentre ainsi aux alentours de 74% (avec une fraction massique similaire) de l'empreinte carbone de chaque avion. Cependant on peut noter que dans l'A350, la fraction massique d'aluminium est divisée par 3 avec l'arrivée de la fibre de carbone. Cette diminution en masse que se répercute au niveau de la répartition de l'empreinte carbone. Avec cette nouvelle architecture d'avions, l'aluminium descend au troisième rang des émetteurs de GES, doublé par le titane et les CFRP. Et si cette tendance venait à se poursuivre, l'aluminium ne serait alors plus la principale source de gaz à effet de serre pendant la phase de manufacture.

Cette disparition de l'aluminium dans la structure des avions Airbus se fait donc au profit de l'arrivée massive des CFRP et de l'ajout de titane pour obtenir des gains en masse. Dans le cas du titane, on passe ainsi de 7% de la masse de l'avion en moyenne sur les précédents Airbus, à 14%. Simplement en doublant cette fraction massique, le titane devient le matériau avec la plus grosse participation dans l'empreinte carbone de la fabrication de l'A350. Il représente ainsi à lui seul 47% des GES émis pour seulement 15% de la masse totale de l'avion. Cette mauvaise performance s'explique par son mauvais BTF et sa très mauvaise EC unitaire qui jusqu'à présent étaient cachés par sa faible présence (moins de 10% de la fraction massique).

En comparaison, les CFRP dont la fraction massique a été multipliée par presque 10 dans l'A350 et qui présente aussi une mauvaise EC unitaire, bénéficie de son faible BTF pour limiter ses émissions globales (un quart de l'EC pour la moitié de la masse de l'avion).

Enfin l'acier présente des émissions stables et très faibles au travers des différents modèles, grâce à sa faible fraction massique moyenne. Sa participation aux émissions globales (entre 2 et 5%) restant plus petite que sa fraction massique dans l'avion.

Après cette analyse matériau par matériau, on peut se poser la question de l'homogénéité de l'EC entre les différents avions. On peut donc tracer l'évolution de l'EC en fonction de la masse à vide.

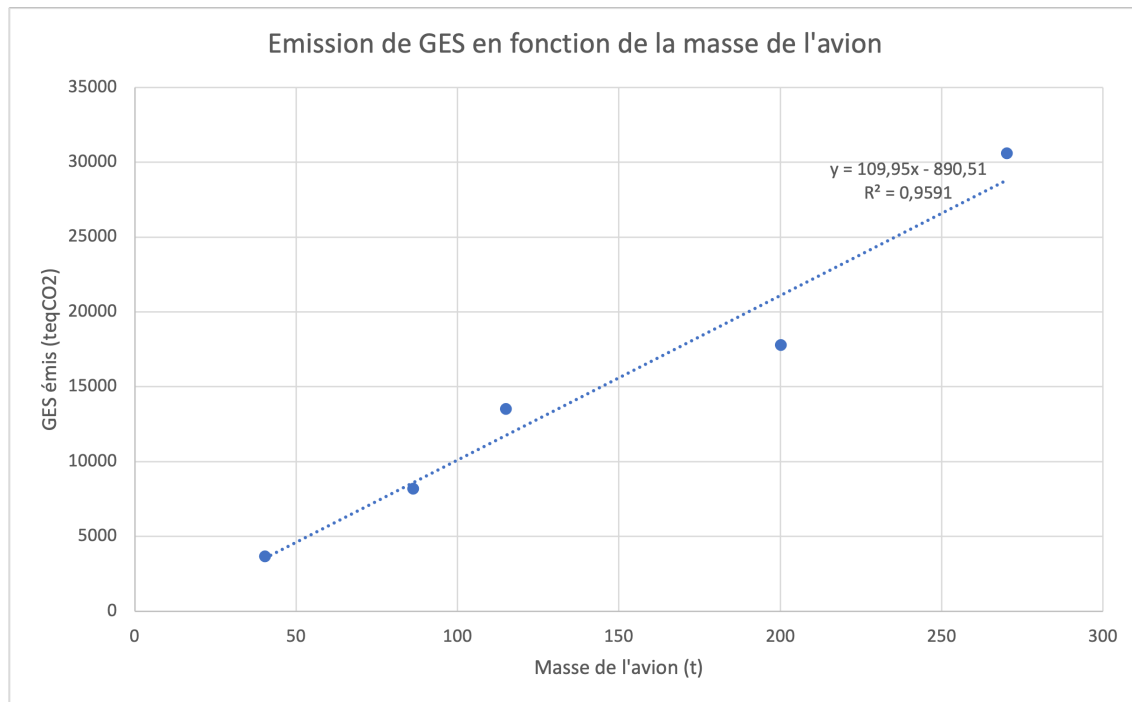


FIGURE 1.4 – Evolution de l’EC de la fabrication d’un avion en fonction de sa masse

On observe donc une très grande linéarité entre les deux variables que l’on cherche à modéliser. On obtient ainsi l’équation suivante :

$$EC_{avion}(t) = 109 * M_{avion}(t) - 890$$

Avec cette modélisation, on obtient un coefficient de détermination (R^2) de 0,959. Ainsi même si notre modèle n’est basé que sur cinq avions, on peut dire que ce modèle explique bien la tendance.

En conclusion, on pourra retenir en première approximation que la masse de GES émis lors de la fabrication d’un avion est proportionnel à 110 fois sa masse. Il est cependant important de faire remarquer que ce calcul ne prend en compte que le mix énergétique des trois principaux pays producteurs des matériaux^[7].

1.3.3 Besoin en énergie

Dans un deuxième temps, nous nous intéressons aux conséquences de la production d’un avion sur le plan énergétique. Pour cela, il faut déterminer la consommation d’énergie pour chacun des matériaux puis du total en prenant comme unité l’énergie utilisée par tonne de matériau produit (MWh/t). Cette donnée inclut l’extraction, le traitement et le transport des matériaux. D’après notre revue de littérature, nous avons pu identifier les coefficients suivants :

Matériau	Aluminium	Acier	Titane	CFRP
Consommation (MWh/t)	5.9	6.4	10.0	400

TABLE 1.7 – Consommation d’énergie par tonne de matériau produit

Et en utilisant une formule similaire à celle de la partie précédente on peut calculer la consommation totale due à l'avion ainsi que le détail pour chaque matériau :

$$Conso_{matériau,avion} = m_{avion} * FM_{matériau,avion} * BTF_{matériau} * Conso_{matériau}$$

Modèle	Consommation d'énergie par matériau (MWh)				
	Aluminium	Acier	Titane	CFRP	Total
A300/A310	1703	1059	344	1280	4387
A320	690	453	201	1196	2541
A330/A340	2477	824	1150	1518	5969
A380	5974	1935	2 160	3119	13188
A350	1121	1434	2800	17490	22845

TABLE 1.8 – Consommation d'énergie pour la production des différents matériaux par avion

On obtient ainsi très facilement la proportion de consommation d'énergie liée à chaque matériau :

Modèle	Fraction de la consommation d'énergie par matériau (%)				
	Aluminium	Acier	Titane	CFRP	Total
A300/A310	39	24	8	29	100
A320	27	18	8	47	100
A330/A340	41	14	14	25	100
A380	45	15	16	24	100
A350	5	6	12	77	100

TABLE 1.9 – % de la consommation énergétique par matériau et par avion

On peut tout d'abord remarquer que les parts de la consommation énergétique sont un peu plus partagées avec cet indicateur qu'elles ne l'étaient avec le précédent. En effet ici, deux matériaux sont les principaux consommateurs. Ainsi l'aluminium est premier pour les avions utilisant le moins de CFRP avec à chaque fois une fraction de la consommation aux alentours de 40%. Pour ces 3 avions l'aluminium souffre surtout de sa fraction massique. En effet son coefficient unitaire de consommation d'énergie est le plus faible des 4 matériaux. Mais ce n'est pas suffisant pour contrer l'effet de sa fraction massique et de son BTF combinés. C'est aussi pour cela que dès que sa fraction massique diminue, sa participation à la consommation d'énergie devient beaucoup plus faible pour le faire reculer dans la hiérarchie des consommateurs. Dans tous les cas sa fraction massique reste toujours supérieure à sa fraction de consommation. Ainsi dans le pire cas (A380) où il représente 75% de la masse totale de l'avion, il ne représente que 45% de la consommation énergétique.

Le CFRP, lui suit la situation inverse. Il est deuxième pour les anciens avions typés aluminium et occupe la première position pour les avions plus modernes. Cette position de pire matériau du point de vue de la consommation énergétique s'explique surtout par son coefficient

unitaire de 110 qui est 10 fois plus grand que son plus proche voisin. Ainsi son BTF exceptionnel et sa faible présence en terme de fraction massique lui permettent de compenser cela dans les avions où il représente moins de 10% de la masse totale. Cependant dès que sa fraction massique augmente il devient de loin le plus gros consommateur dans le processus de fabrication de l'avion. Par exemple dans le cas de l'A320, dans lequel il ne représente que 18% de la fraction massique, le CFRP est responsable de près de 47% de la consommation énergétique.

Enfin le titane et l'acier ont des comportements assez similaires au niveau de la consommation d'énergie. En effet, tout deux assez faiblement présents en terme de fraction massique (15% de la masse seulement), ils représentent à eux deux tout de même 30% de la consommation en moyenne sur chaque avion. Ceci peut s'expliquer par des BTF mauvais et un coefficient de consommation unitaire moyen. En résumé, ces deux matériaux sont sauvés par la présence du CFRP qui surconsomme par rapport à sa masse et fait ainsi baisser leur % de consommation mais aussi de leur faible présence.

Si l'on regarde maintenant à l'échelle de l'avion, on peut noter la même chose que dans la partie précédente. C'est à dire que hors A350, la consommation énergétique peut s'écrire comme :

$$CE_{avion} = 46 * M_{avion} + 542$$

Le R^2 de 0,99 nous confirme qu'une tendance linéaire existe bel et bien. Cependant nous avons volontairement exclu de cette modélisation l'A350 qui ne s'inscrit pas dans cette même dynamique.

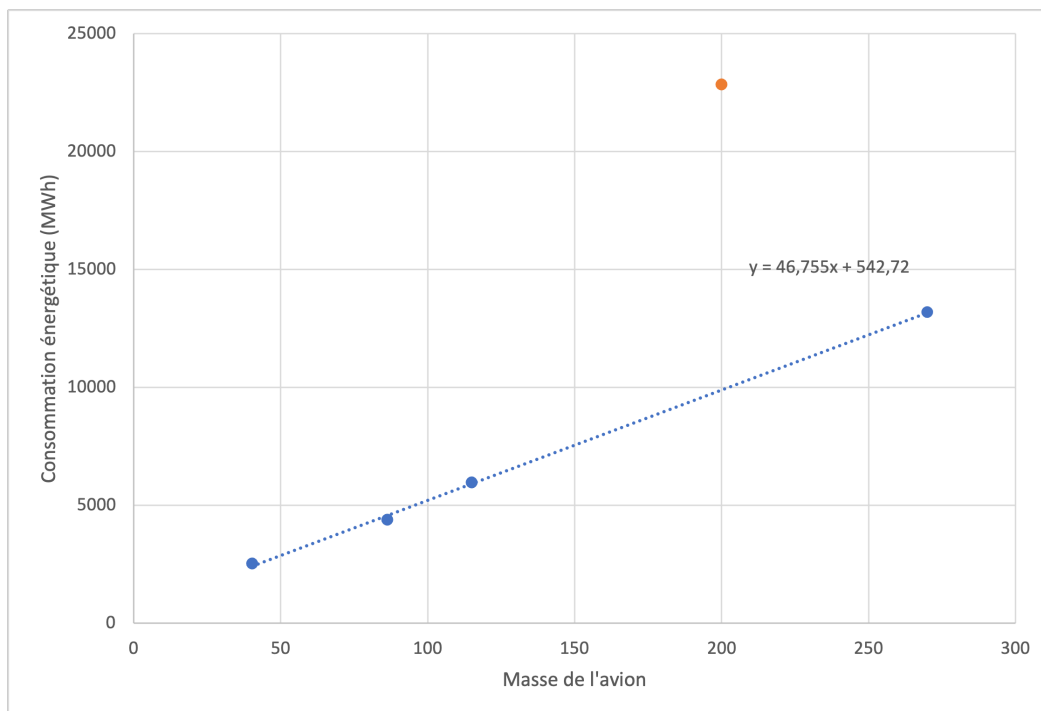


FIGURE 1.5 – Evolution de la consommation énergétique de la fabrication d'un avion en fonction de sa masse

En conclusion, on pourra retenir que hors A350, la quantité d'énergie nécessaire à la fabrication d'un avion est proportionnelle à sa masse. Il est important de remarquer que l'introduction

du CFRP en masse pour l'A350, peut difficilement être défendu pour des raisons écologiques (dans le cadre de ce rapport en tout cas, et en ne prenant en compte que ces quelques facteurs environnementaux). En effet, au vu du paragraphe précédent, la quantité de GES émis lors de la fabrication d'un A350 est restée dans la suite logique des précédents modèles, quand sa consommation énergétique bondit à plus de 2 fois celle d'un avion de masse équivalent construit avec plus d'aluminium.

1.3.4 Génération de déchets

Enfin, on s'intéresse à notre troisième indicateur qui mesure la quantité de déchets générés lors des étapes matériau et manufacturière. Les données que nous allons utiliser ici pour calculer cette indicateur ne prennent en compte que les déchets générés par la partie chimique de la production des métaux et les résidus miniers^[7]. Comme pour les deux parties précédentes, on retrouve les trois tableaux présentant le coefficient unitaire de chaque matériaux, les masses totales générées par avion ainsi les fractions massiques^[7] (tableaux 1.10, 1.11 et 1.12).

Matériau	Aluminium	Acier	Titane	CFRP
Déchets générés (t/t)	4.5	2.4	16.9	0.3

TABLE 1.10 – Masse de déchets générés par tonne de matériau produit

Modèle	Génération de déchets par matériau (t)				
	Aluminium	Acier	Titane	CFRP	Total
A300/A310	1299	397	583	3	2283
A320	526	170	341	3	1040
A330/A340	1890	309	1944	4	4126
A380	4556	726	3650	9	8941
A350	855	538	4732	48	6173

TABLE 1.11 – Génération de déchets par matériau et par avion

Modèle	Fraction de la masse des déchets générés (%)				
	Aluminium	Acier	Titane	CFRP	Total
A300/A310	57	17	26	0	100
A320	51	16	33	0	100
A330/A340	46	7	47	0	100
A380	51	8	41	0	100
A350	14	9	77	1	100

TABLE 1.12 – % de la masse de déchets générés par matériau et par avion

On constate que l'aluminium est le plus important émetteur de déchets quasiment tous les avions. Ce résultat n'est pas surprenant car il représente plus de 50% de la masse de la plupart

des Airbus et possède un BTF moyen et un taux de génération de déchets dans la moyenne supérieure. Parmi les anciens modèles (tous hors A350), il concentre aux alentours de 50% (avec une fraction massique légèrement supérieure) de la masse de déchets. Cependant il est important de noter que dans l'A350, la fraction massique d'aluminium est divisée par 3 avec l'arrivée de la fibre de carbone et que cela fait chuter notablement la quantité de déchets qu'il génère. Cette première place de générateur de déchets est donc surtout due à sa présence en grande quantité dans la majorité des avions.

Cette disparition de l'aluminium dans la structure de l'A350 se fait au profit de l'arrivée massive du CFRP et de l'ajout de titane. Dans le cas du titane, on passe de 7% de la masse de l'avion en moyenne sur les précédents Airbus, à 14%. Simplement en doublant cette fraction massique, le titane devient le matériau le plus générateur de déchets, de très loin, dans le cas de la fabrication de l'A350. Il représente ainsi à lui seul 77% des déchets émis pour seulement 15% de la masse totale de l'A350. Même dans les autres modèles on remarque que sa part des déchets est très importante comparée à sa fraction massique. Ces mauvaises performances s'expliquent par son mauvais BTF et son très mauvais taux de génération de déchets.

En comparaison, le CFRP dont la fraction massique a été multipliée par presque 10 pour l'A350 bénéficie de son très bon taux unitaire de génération de déchets pour ne participer qu'à auteur d'1% des déchets émis. De manière générale, le CFRP est exceptionnel du point de vue de cet indicateur.

Enfin l'acier présente des émissions stables et faibles au travers des différents modèles, grâce à sa faible fraction massique moyenne et son faible taux. Sa participation aux émissions globales (entre 7 et 15%) étant équivalente à sa fraction massique dans l'avion.

En reprenant le détail par avion, on retrouve cette linéarité que nous avons remarquer depuis le début.

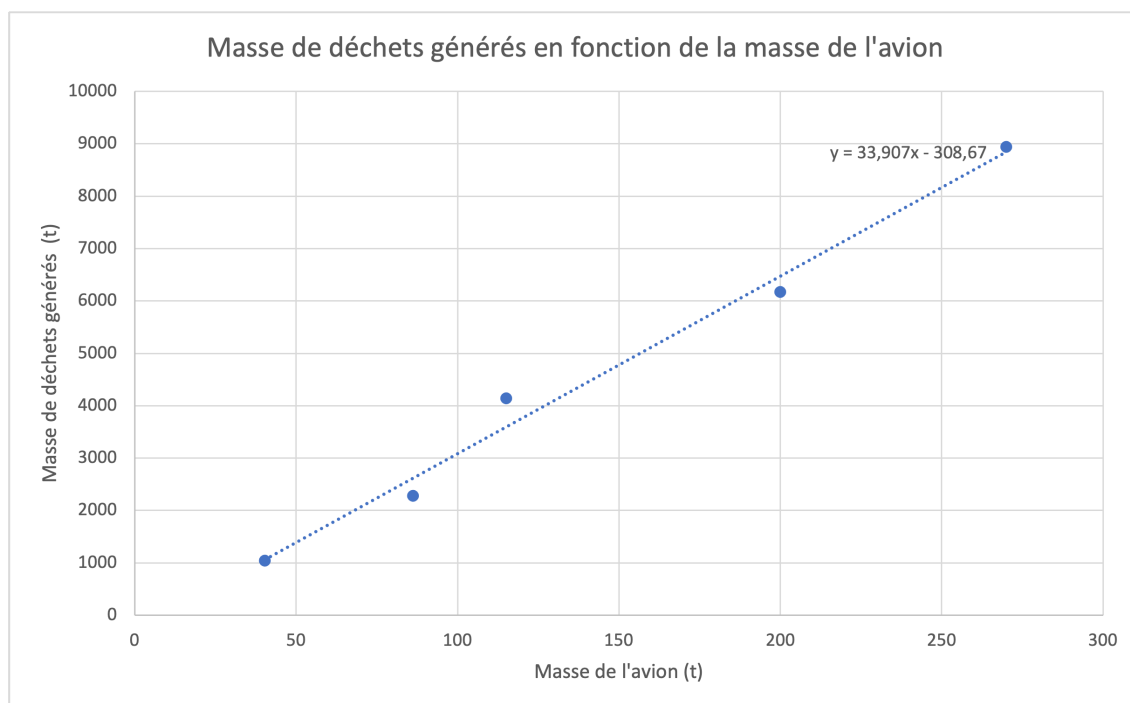


FIGURE 1.6 – Evolution de la masse de déchets générés lors de la fabrication d'un avion en fonction de sa masse

En conclusion, on pourra remarquer que l'analyse des déchets générés est très semblable à celle que l'on peut faire sur les émissions de GES. On peut donc arriver à la même conclusion : en première approximation que la masse de déchets émis lors de la fabrication d'un avion est égale à 30 fois sa masse. On pourra également noter qu'aucune baisse de génération de déchets n'est notable pour l'A350 malgré l'utilisation du CFRP. Ceci est dû à l'ajout de titane dont le taux de déchets est très mauvais.

1.3.5 Bilan des indicateurs

Nous avons dans les parties précédentes détaillé chaque matériau suivant les trois indicateurs que nous nous sommes fixés dans la première partie. Cependant, à part tirer de grossières conclusions concernant la linéarité observable entre la masse de GES émis, la masse de déchets générés et la masse de l'avion, cette étude ne nous a pas permis de comparer objectivement les matériaux entre eux. On peut tout de même retenir qu'il semblerait qu'en première approximation, la répartition de la masse sur les quatre indicateurs influence peu l'EC et la quantité de déchets générés. On peut aussi dire la même chose pour la consommation d'énergie tant que le CFRP n'est pas majoritaire dans la construction de l'avion, sinon la consommation explose. Ainsi il semblerait que du point de vue manufacturier et avec les trois indicateurs choisis, il n'est pas très intéressant d'utiliser du CFRP associé à du titane (les deux permettent en théorie d'alléger l'avion) pour réduire son empreinte environnementale car c'est l'effet inverse qui se produit.

L'objectif de ce paragraphe est donc de proposer une méthode permettant d'obtenir un classement des matériaux suivant les différents indicateurs que nous nous sommes fixés et d'établir un score de criticité. Cela pourrait permettre de cibler rapidement le matériau sur lequel la marge de progression en terme d'impact environnemental est la plus grande. Pour cela on base notre étude sur les trois indicateurs vus plus haut, mais aussi le BTF ratio, le pourcentage d'utilisation maximale et la tendance. En effet, pour améliorer l'impact environnemental d'un matériau, on peut actionner plusieurs leviers :

- Son impact intrinsèque (les trois indicateurs détaillés plus haut) que l'on peut améliorer par de meilleurs procédés d'extraction ou de création par exemple ;
- La quantité à utiliser (BTF), si on diminue ce chiffre à l'aide de meilleures techniques d'assemblage par exemple, la masse totale à utiliser diminue tout comme l'impact environnemental
- La quantité présente dans l'avion. Il est en effet peu probable qu'un matériau présent à hauteur de 0,5% de la fraction massique de l'A380 émettent autant de CO_2 que la masse d'aluminium. Ainsi il faut prioriser des matériaux dont la présence est importante car un petit gain sur le coefficient du matériau peut avoir de grosses répercussions au global ;
- La tendance. Il est inutile de concentrer ses efforts sur un matériau très présent avant et qui représente maintenant un faible pourcentage.

Certaines de ces mesures sont caractéristiques des avions produits par Airbus (Tendance, utilisation) mais sont, en première approximation, proches des valeurs que l'on aurait pu obtenir avec Boeing. On peut donc légitimement généraliser notre étude au secteur aéronautique mondial. Tous ces indicateurs et leur valeurs ont donc été regroupés dans la table 1.16 avec les valeurs associés à chaque matériau.

Il faut donc maintenant définir une méthode pour établir un classement. Pour cela de nombreux moyens existent, et nous en avons retenu deux.

Matériau	Aluminium	Acier	Titane	CFRP
Emission (t_{eqCO_2}/t)	22,4	2.3	30	29,5
Consommation (MWh/t)	5.9	6.4	10.0	110
Déchets générés (t/t)	4.5	2.4	16.9	0.3
BTF	5 :1	16 :1	10 :1	1.5 :1
Utilisation max (%)	75	12	14	53
Tendance (%)	-56	0	6	46

TABLE 1.13 – Résumé des indicateurs par matériaux

La première méthode sera appelée méthode des rangs et est détaillée dans les deux tableaux suivants. Ici on s'intéresse donc à la position de chaque matériaux vis à vis des autres. Pour chaque indicateurs, on classe les matériaux de 1 à 4. A chaque place est attribué un nombre de point égal à la position. Ainsi l'aluminium qui présente le meilleur taux de consommation énergétique se voit attribué 1 point quand le titane s'en voit attribué 3 pour ce même indicateur. On somme ensuite ces points sur tous les indicateurs. On regarde alors qui a le plus gros total de point, c'est à dire qui a cumulé le plus de mauvaises places, pour voir quel est le matériau le plus critique au vu des indicateurs choisis. Selon les besoin des l'étude, le choix des indicateurs de comparaison peut varier.

Une dernière spécificité est introduite pour tenir compte d'excellentes performances ou de très mauvaises. Ainsi lorsqu'une case est en rouge, cela veut dire que la performance est très mauvaise en comparaison avec les autres et le matériau se voit donc ajouter un point de pénalité. Au contraire une case verte signifie une très bonne performance et l'élément se voit donc retirer un point. Cette notion de très bonne ou très mauvaise performance est défini grâce à un outil statistique appelé la Median Average Deviation (MAD). On considère ici qu'un élément supérieur à 1,5 fois la moyenne des écarts à la médiane est mauvais. Et inversement un élément inférieur à 1,5 fois la moyenne des écarts à la médiane est un bon élément.

Grâce à cette méthode on obtient le tableau de score suivant :

Matériau	Aluminium	Acier	Titane	CFRP
Score avec les 3 indicateurs	6	4	12	8
Score avec les 3 indicateurs + BTF	7	9	16	8
Score avec les 3 indicateurs + BTF + Utilisation max	12	10	18	11
Score avec les 3 indicateurs + BTF + Tendance	7	11	19	13
Score avec tout les indicateurs	12	12	21	16

TABLE 1.14 – Score de priorisation en fonction de l'impact et de l'importance relative dans l'avion

Ainsi le titane est élu à l'unanimité, matériau le plus critique. Il souffre notamment d'être considéré comme très mauvais dans 2 catégories différentes sans jamais être exceptionnellement bon dans aucune autre. Les axes d'amélioration concernant le titane sont donc multiples : meilleur BTF, meilleures techniques d'extraction pour générer moins de déchets et émettre moins de CO2. Étant un matériau très à la mode en ce moment dans de nombreux domaines,

il serait intéressant que des solutions à ces problèmes soient trouvées rapidement. La deuxième place se joue entre l'aluminium et le CFRP suivant les indicateurs choisis. On retiendra à cette place le CFRP pour sa consommation énergétique très mauvaise, à peine compensée par son BTF et ses peu de déchets générés. Le plus problématique étant surtout que la tendance sur les nouveaux avions est à l'augmentation de la quantité de CFRP à bord. Le problème de consommation énergétique pourrait donc se révéler encore plus important d'ici quelques années. L'aluminium souffre surtout de sa fraction massique dans les précédents modèles, sans ça, il présenterait comme l'acier un bon bilan.

Cette méthode de comparaison basée sur le rang fonctionne très bien et est assez facile d'utilisation et d'interprétation. Cependant elle ne relate pas fidèlement les écarts entre les éléments. Ainsi l'écart dans l'utilisation max entre l'acier et le titane vaut 1 point tout comme l'écart entre le titane et le CFRP alors que l'écart de valeurs réelles est plus important.

Pour résoudre ce problème on peut utiliser la méthode de l'échelle. Pour cela on procède en deux étapes :

- On met nos données entre 0 et 1 (scaling) par n'importe quelle méthode, ici on a utilisé le MinMax.
- On somme.

Cette mise à l'échelle va nous permettre d'avoir des valeurs comparables et qu'on pourra donc sommer, tout en gardant la distribution d'origine intacte.

Ce qui donne en mettant tout à l'échelle :

Matériau	Aluminium	Acier	Titane	CFRP
Emission (t_{eqCO_2}/t)	0.73	0	1	0.98
Consommation (MWh/t)	0	0	0.04	1
Déchets générés (t/t)	0.25	0.13	1	0
BTF	0.24	1	0.59	0
Utilisation max (%)	1	0	0.03	0.65
Tendance (%)	0	0.55	0.61	1

TABLE 1.15 – Indicateurs mis à l'échelle

$$Nouvelle_{valeur} = (Valeur - \min(indicateur)) / (\max(indicateur) - \min(indicateur))$$

On peut donc calculer la somme, l'indicateur avec le score le plus haut sera donc l'élément avec le plus critique :

Matériau	Aluminium	Acier	Titane	CFRP
Score avec les 3 indicateurs	0.98	0.13	2.04	1.98
Score avec les 3 indicateurs + BTF	1.22	1.13	2.63	1.98
Score avec les 3 indicateurs + BTF + Utilisation max	2.22	1.23	2.66	2.63
Score avec les 3 indicateurs + BTF + Tendance	1.22	1.68	3.23	2.98
Score avec tout les indicateurs	2.22	1.68	3.27	3.63

TABLE 1.16 – Score de priorisation ne fonction de l’impact et de l’importance relative dans l’avion

Ainsi avec cette méthode on obtient des résultats assez similaires à la première. Ici le CFRP est déclaré matériau le plus critique juste devant le titane. L’aluminium et l’acier formant un deuxième groupe beaucoup plus loin dans le classement.

La conclusion de cette analyse permet de mettre en lumière que les deux matériaux les plus critiques (à l’unanimité des deux méthodes) en terme d’impact environnemental ont été choisi pour porter la nouvelle génération d’avion. Cependant si ce sont les plus critiques cela veut aussi dire que la marge de progression est importante mais cela nécessitera d’important travaux de RD.

1.4 Étude de cas du fuselage de l’A320 d’Airbus

Le fuselage de l’A320 est composé en quasi-totalité d’alliages d’aluminium (fraction introuvable). La production de ses pièces et son assemblage sont réparties entre la France pour l’avant et l’Allemagne à partir des ailes jusqu’à l’arrière. La masse totale de la structure du fuselage de l’A320 est de 4547 kg, représentant donc 10% du poids total de l’avion. M. Achternbosch et al.^[4] ont exposé la consommation énergétique et les émissions de GES de la production d’un fuselage d’A320 selon les différentes étapes de production (figures 1.7 et 1.8). Les deux étapes qui se démarquent le plus sont les étapes de fabrication de l’alliage d’aluminium qui contient une fraction de titane, et de production des pièces du fuselage. Leurs parts sont rassemblées dans la table 1.17 ainsi que celles de l’étape assemblage.

Étape	Consommation énergétique totale du fuselage	Émissions de GES totales du fuselage
Matériau	63 %	68 %
Production	26 %	21 %
Assemblage	4 %	5 %

TABLE 1.17 – Part des trois étapes prépondérantes dans la consommation énergétique et les émissions de GES de la fabrication du fuselage d’A320

Ainsi, la fabrication de l’alliage d’aluminium représente deux tiers du total. Pour obtenir 4.5t d’alliage, 98t d’équivalent CO_2 ont été émises, soit un taux de $21.8t_{eq,CO_2}/t$, similaire à ce qui a été présenté auparavant. Cependant, la consommation énergétique ne correspond pas à ce qui a été présenté avant. En effet, dans ce cas de figure, elle est à 1.45TJ pour 4.5t d’alliage, soit $89.5MWh/t$.

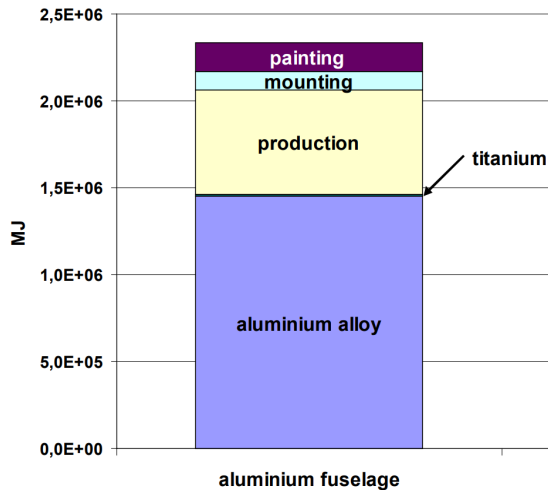


FIGURE 1.7 – Consommation d'énergie pour la production d'un fuselage en aluminium

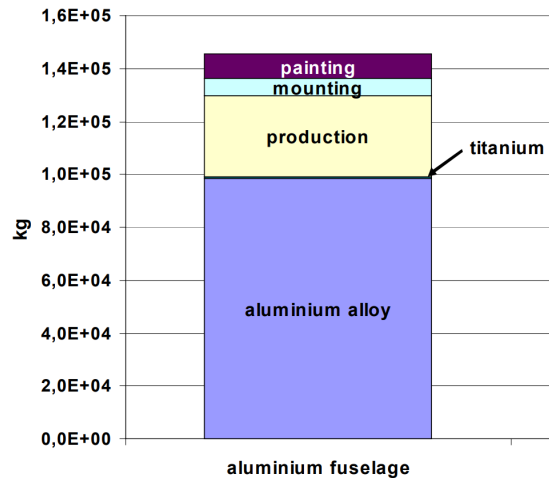


FIGURE 1.8 – Émissions d'équivalent CO_2 dans la production d'un fuselage en aluminium

Concernant les déchets générés par les différentes étapes, l'étape d'extraction représente 50% de la masse totale (figure 1.9). Le taux de génération de déchets est de 36t pour 4.5t d'alliage, soit $8t/t$, légèrement supérieur à ce qui a été présenté plus haut.

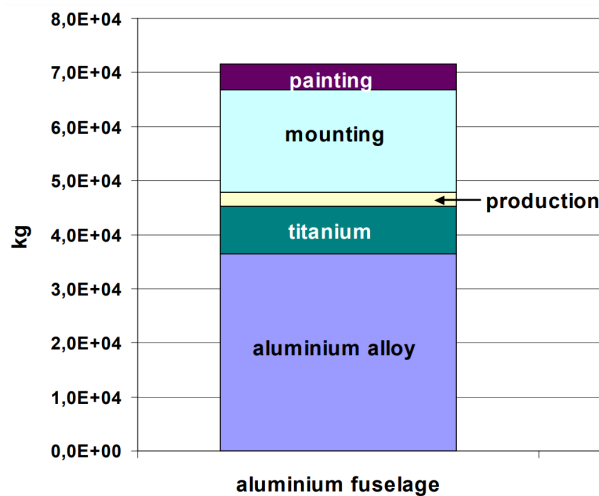


FIGURE 1.9 – Déchets générés par les différentes étapes de fabrication du fuselage

Les indicateurs mis en place préalablement sont donc partiellement retrouvés dans cette étude du fuselage d'A320. Néanmoins avec peu de données, il est difficile de détailler avec précision l'implication des causes de ces écarts avec les autres sources utilisées.

Finalement, l'impact environnemental de l'industrie manufacturière aéronautique est multiple, principalement dû à la complexité du processus de production des avions et l'implication de nombreux acteurs inter-dépendants et internationaux.

Si la manufacture, à proprement parler, des avions, nécessite des grandes quantités d'énergie et produit une quantité importante de carbone, il ne faut pas négliger l'étape de production

des matériaux de base. Ces matériaux, principalement l'aluminium, le titane, l'acier et les polymères renforcés en fibre de carbone, requièrent également une grande quantité d'énergie et dégagent des GES pendant leur production. Bien plus, cette étape demande de grande quantité d'eau, près de cinq fois plus que pour la partie manufacturière.

Ainsi comme l'a montré l'étude de cas sur les avions Airbus, en simplifiant le problème à l'étape matériau, l'impact environnemental de la fabrication d'un l'avion évolue de manière linéaire avec la masse de l'avion. Cette conclusion semble se généraliser à tout type d'avion, petit ou gros, et tous les types d'architectures (base alu ou base carbone). Nous avons aussi mis en lumière que les matériaux les plus critiques d'un point de vue environnemental (comprendre ceux sur lequel une petite amélioration aurait le plus gros impact positif) sont les CFRP et le titane, matériaux choisis pour porter la future flotte d'A350.

Chapitre 2

Moyens de réduction de cet impact environnemental

Dans cette partie, des solutions pour réduire l'impact environnemental de l'industrie manufacturière aéronautique seront exposées. Après avoir détaillé leur fonctionnement, leur intégration dans l'industrie et leurs conséquences sur les indicateurs précédemment introduits, le cas du fuselage d'A320 sera repris pour évaluer les réductions possibles et conclure sur la pertinence de ces solutions.

2.1 Améliorer l'efficacité des moyens de production

L'objectif de cette partie est d'évaluer des moyens d'amélioration de l'efficacité de production, c'est-à-dire produire plus avec autant de ressources ; dans notre cas, extraire, produire et assembler autant matériaux tout en réduisant l'impact environnemental et donc en réduisant les indicateurs définis dans la partie précédente.

2.1.1 Agir sur les sources d'énergie

La solution la plus évidente lorsque qu'il s'agit de réduire les émissions de GES des moyens de production est la décarbonation des sources d'énergie. En effet, comme vu précédemment, la Chine est le premier producteur des matériaux utilisés dans l'aéronautique, mais sa production d'énergie provient à presque 90% de sources fossiles. Deux solutions sont alors envisageables : changer les sources d'énergie ou délocaliser la production.

Décarboner la production

Le mix énergétique des pays producteurs influe directement sur l'indicateur d'émission de GES. Décarboner les sources d'énergie permettrait donc à ces pays d'émettre moins lors de l'extraction et de la production des matériaux.

Dans le cadre de son plan de neutralité carbone d'ici 2060 pour lutter contre le réchauffement climatique, la Chine a entrepris des chantiers de développement de production d'énergie renouvelable conséquents. Si son mix énergétique actuel est composé de près de 90% de

sources fossiles, une étude de l'Institut Chinois de Recherche sur l'Energie (CERI)¹ atteste que les énergies renouvelables pourraient représenter 86% de ce mix en 2050, et 89% en comptant le nucléaire, tout en détaillant ce mix. La part des énergies fossiles ne serait donc plus que de 11%.

Cette solution permettrait donc non seulement de réduire les émissions de GES mais aussi la consommation d'énergie lors de l'étape matériaux. Il est possible de calculer les émissions avec le futur mix de la Chine détaillé dans la figure 2.1 en plus des valeurs de GES émis par énergie produite des principales sources d'énergies.

Source d'énergie	Émissions de GES ($g_{eq,CO_2}/kWh$ produits)	Part dans le mix chinois (%)	
		En 2019	En 2050
Charbon	990	71	6
Pétrole	750	10	2
Gaz	450	9	3
Hydraulique	10	4	14
Éolien	10	1	32
Solaire	40	1	29

TABLE 2.1 – Émissions des différentes sources d'énergie et leur part dans le mix chinois en 2019 et prévu en 2050

La Chine est le producteur principal d'acier, d'aluminium et de titane dans le monde, avec plus de la moitié de la production totale de ces métaux. L'impact de la modification du mix énergétique chinois sur l'indicateur d'émissions de GES ($t_{eq,CO_2}/t$) peut donc être déterminé.

Par exemple, la quantité d'aluminium produit par la Chine représente 56% de la production mondiale. On considère les hypothèses suivantes :

- la consommation reste constante ;
- l'énergie requise ne varie pas en changeant de source d'énergie ;
- la Chine garde ses parts de marché dans le futur ;

Ces hypothèses ne sont pas forcément réalistes mais permettent d'illustrer la tendance future en terme d'émission de GES. On constate alors que les émissions de GES par quantité d'énergie produite sont divisées par huit avec le mix énergétique de 2050, elles passent de $820g_{eq,CO_2}/kWh$ en 2019 à $100g_{eq,CO_2}/kWh$ en 2050. Il est donc possible de calculer le nouvel impact sur les émissions de GES des trois métaux dont la Chine est le producteur principal (figure 2.4).

Métaux	Aluminium	Acier	Titane
Part de la production chinoise	56 %	51%	52%
$t_{eq,CO_2}/t$ actuel	22.4	2.3	35.7
$t_{eq,CO_2}/t$ en 2050	11.4	1.3	19.5

TABLE 2.2 – Émissions de GES par tonne de métal produit en prenant en compte le mix énergétique prévu de la Chine en 2050

1. <http://en.cctp.org.cn/>

Évidemment, ces calculs supposent que seule la Chine suivra un programme de décarbonation et qu'elle tiendra les objectifs qu'elle s'est fixés d'ici 2050. Néanmoins, même en considérant uniquement la décarbonation du mix chinois, les émissions des trois métaux principaux est réduit presque de moitié.

Cette solution n'a été appliquée ici qu'à l'étape matériaux et non à l'étape manufacturière, car les valeurs d'émissions de GES utilisées dépendent des matériaux. Même en considérant que le mix de consommation de l'industrie aéronautique dans les pays concernés soit le même que le mix de l'industrie en général, il est difficile de calculer la réduction des émissions de GES dans l'étape manufacturière car la part des différents pays dans les émissions de GES et la consommation d'énergie n'est pas précisée.

Délocaliser la production

Il est aussi possible de développer des filières de production des matériaux dans les pays ayant déjà un mix énergétique décarboné. Outre les conséquences géopolitiques (diversification des sources d'approvisionnement, risque de pénurie réduit, indépendance industrielle), cette démarche pourrait réduire la moyenne des émissions de GES des matériaux. Néanmoins, elle reste très coûteuse pour les pays qui doivent développer toute une filière et elle pourrait ne pas être rentable dans le cas de filons avec une teneur en matériaux faible.

Il est possible de calculer les émissions avec le mix actuel de la France (figure 2.3 pour comparer avec la Chine. Néanmoins, il faut prendre en compte l'ampleur de l'industrie, et la France ne pourrait pas assumer l'entièreté de la part chinoise.

Source d'énergie	Émissions de GES ($g_{eq,CO_2}/kWh$ produits)	Part dans le mix français (%) en 2019
Gaz	450	41
Nucléaire	10	29
Pétrole	750	10
Hydraulique	10	8
Éolien	10	5
Charbon	990	5
Solaire	40	2

TABLE 2.3 – Émissions des différentes sources d'énergie et leur part dans le mix français

Ainsi, les émissions de GES de l'industrie française en 2019 sont presque trois fois inférieures à celles de l'industrie chinoise, passant de $820g_{eq,CO_2}/kWh$ à $310g_{eq,CO_2}/kWh$. Si la totalité de la production de l'aluminium, de l'acier et du titane de la Chine était maintenant prise en charge par la France, leur impact sur les émissions de GES seraient réduit du tiers.

Métaux	Aluminium	Acier	Titane
Part de la production	56 %	51%	52%
$t_{eq,CO_2}/t$ actuel	22.4	2.3	35.7
$t_{eq,CO_2}/t$ avec le mix français	14.6	1.6	24.1

TABLE 2.4 – Émissions de GES par tonne de métal produit en supposant que la France remplace la Chine dans la production des trois métaux

Néanmoins, il est aussi important de noter que la nature de la source d'énergie fait varier la consommation d'énergie à cause des différences d'efficacités énergétiques (figure 2.1).

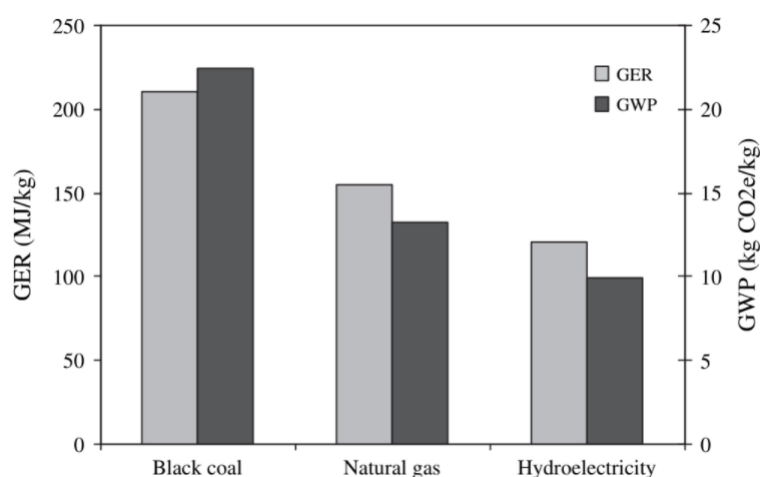


FIGURE 2.1 – Influence de la source d'énergie sur la consommation d'énergie (GER) et sur les émissions de GES (GWP) pour la production d'aluminium^[7]

Ainsi, en prenant en compte les résultats comparatifs des tables 2.1 et 2.3, le taux d'émission de GES et la consommation d'énergie de la production d'aluminium se voient divisés par cinq dans le meilleur des deux cas (table 2.5).

Mix énergétiques	Chine	France	Chine 2050
Consommation d'énergie (MWh/t)	46.5	22.7	9.4

TABLE 2.5 – Consommation d'énergie requise pour la production d'aluminium en fonction du mix énergétique

Finalement, changer les sources de production d'énergie permet de réduire en plus des émissions de GES la consommation d'énergie, ayant aussi un impact positif sur la réduction des émissions de GES.

2.1.2 Changer les méthodes de production

Les solutions exposées précédemment ne permettent cependant pas d’agir sur les quantités de déchets générés. Pour cela, il est nécessaire de revoir les méthodes de production afin d’améliorer leur efficacité. La solution envisagée par le et l’autre concernant l’étape manufacturière.

La fabrication additive

La fabrication additive est une des méthodes de production envisagée dans l’industrie manufacturière. Elle est aujourd’hui en développement et, bien que certaines pièces dans l’aéronautique soient déjà fabriquées de cette façon, la grande majorité sont des pièces auxiliaires, n’ayant pas de fonction structurelle ou fonctionnelle dans l’avion. Il est donc intéressant d’étudier les avantages et inconvénients^[6] de cette méthode dans le cas où l’on envisagerait d’étendre son utilisation, avant de s’intéresser au potentiel de réduction de l’impact environnemental du secteur manufacturier aérien qu’elle peut apporter.

La fabrication additive permet la conception de nouvelles géométries, difficiles ou parfois impossibles avec les procédés de fabrication conventionnels pouvant améliorer les performances des pièces fabriquées en plus d’être plus efficaces sur le plan environnemental car nécessitant moins de matière et allégeant l’avion. Elle permet aussi d’économiser les outils et les machines prévus pour les nombreuses étapes de la fabrication soustractive ainsi que de réduire les déchets de métaux, réduisant donc simultanément les émissions de GES, l’énergie consommée et la masse de déchets générés. Néanmoins, la cadence de production des pièces par fabrication additive est assez faible comparée aux méthodes de fabrication conventionnelles. De plus, au stade de développement actuel, la répétabilité des pièces et de leurs propriétés est assez faible, et les contraintes résiduelles et l’inconstance de leur surface empêche de les utiliser pour des applications nécessitant une précision forte dans les propriétés mécaniques de pièce comme l’aéronautique. Pour l’instant les pièces produites par fabrication additive sont donc majoritairement à fonction auxiliaire, non-déterminante dans tenue structurelle des systèmes.

Il s’agit désormais de quantifier les économies faites par le remplacement des procédés conventionnels par la fabrication additive. Pour cela, la masse remplaçable des métaux a été calculée et l’analyse du cycle de vie des matériaux a été développée pour calculer les réductions en masse, en émission de GES, en consommation d’énergie et en génération de déchets^[6].

Ainsi, sur un avion moyen de 40.6t, des catégories susceptibles d’accepter la transition vers la fabrication additive ont été déterminées sur la base du volume impacté et de la complexité. Finalement, une réduction de 1310 à 2160kg a été calculée, en plus d’une réduction de 1832 à 6890 GJ et de 165 à 620 t_{eq,CO_2} . Quant à la réduction des déchets, le BTF pour des matériaux comme l’aluminium a été estimé à 1.5 avec la fabrication additive. Les détails par matériau sont regroupés dans le tableau 2.6.

Matériau	Aluminium	Acier	Titane
Masse (kg)	880-1240	50-100	380-820
Consommation d'énergie (MWh)	67-461	0.6-2.8	442-1422
Emission de GES (t_{eqCO_2})	14-160	1-10	150-450

TABLE 2.6 – Réductions de masse, d'énergie consommée et d'émission de GES pour un avion de 40.6t par la fabrication de composants via la fabrication additive

En prenant comme exemple l'A320 d'Airbus, dont la masse est est de 40,3t, il est possible de mesurer les réductions possibles obtenues par la fabrication additive (table 2.7). Les valeurs prises en compte sont les plus faibles.

Indicateurs	A320 conventionnel	A320 avec FA
Émissions de GES (t_{eqCO_2})	2950	2785
Consommation d'énergie (MWh)	2541	2031
Masse (t)	40.3	39.0

TABLE 2.7 – Comparaison des indicateurs pour un A320 avec les fabrications conventionnelle et additive

Finalement, la fabrication additive ne permet pas de diminuer les indicateurs par tonne de matériaux produit mais permet de réduire directement l'impact du processus de fabrication sur les trois domaines étudiés.

Concernant la maturité des technologies employées pour cette réduction d'impact, la fiabilité des pièces produites est l'un des freins principaux à la démocratisation de cette méthode, même si des entreprises produisent déjà des pièces en fabrication additive, à l'image de GE pour le turboréacteur GE9X et Airbus pour des pièces cabine.

2.2 Améliorer l'efficacité des matériaux

Un moyen d'améliorer l'efficacité des matériaux une fois produit est le recyclage. En effet, dans certains cas les matériaux en fin de vie sont recyclables et permettent ainsi de faire des économies de déchets, d'énergie et d'émission de GES en évitant la production d'un nouveau matériau.

Le recyclage des CFRP

En France, le volume de déchets composites à base de fibres de carbone est estimé à 2500 tonnes à l'horizon 2025^[13]. Dans le cas d'Airbus, 100 tonnes de déchets liés aux chutes de fibres sont créées par an sur le site de Saint Nazaire^[1]. Le pourcentage de matériaux composites à fibres longues de carbone dans les structures aéronautiques ne cesse d'augmenter et atteint 50% dans les programmes récents (A350)^[11].

Le recyclage sur CFRP permettrait de réduire l'impact carbone de l'avion au vu des indicateurs environnementaux considérés dans la partie 1.3.1 sur deux axes :

- Recycler les chutes de CFRP à la production de l'avion : cela permettrait de diminuer la quantité de déchets liés à la production ;
- Utiliser directement des fibres de carbones recyclées : cela permettrait de limiter la quantité de matériau vierge à produire et induit des économies en GES, énergie et quantité de déchets produits.

Différentes technologies de recyclage des fibres de carbone existent :

- Broyage : les fibres sont broyées avec le tout sous forme de poudre. Le procédé est peu coûteux mais les matériaux perdent beaucoup de leur valeur ;
- Solvolysse : Cette technique consiste à traiter un polymère ou un composite à matrice polymère par un solvant réactif comme de l'eau capable de dépolymériser la résine en coupant les liaisons présentes dans le réseau macromoléculaire, conduisant à un mélange liquide de produits de dépolymérisation. La solvolysse permet de conserver en effet les fibres intactes^[1] ;
- Pyrolyse : Ce procédé consiste à brûler les composites pour séparer les fibres des résines^[1]. Ce processus est déjà développé à l'échelle industrielle et est le plus utilisé aujourd'hui^[11] ;
- Vapo-thermolyse : Ce procédé combine la pyrolyse et la vapeur d'eau surchauffée à pression ambiante afin de décomposer la matrice organique du composite ;
- Fragmentation électrodynamique : on génère des ondes de choc pour casser le composite et séparer la résine des fibres^[11] ;
- La technologie Fairmat : régénération des fibres de carbone à froid.^[13]

Par exemple, avec la technologie Fairmat, on obtient un matériau émettant 5 fois moins de CO_2 que son équivalent neuf, aussi résistant que l'aluminium mais 2,5 fois plus léger. Le matériau perd en performance par rapport à la matière vierge mais peut remplacer d'autres matériaux : aluminium ou acier sous certaines conditions.

Ainsi, dans ce cas précis, on travaille sur l'indicateur environnemental qui évalue la masse de déchets produits car cette technologie permettrait de réutiliser les déchets composites issus

des chutes de production de la filière manufacturière aéronautique.

Une usine appliquant cette technologie serait capable de recycler 5000 tonnes de déchets par an^[13].

De même, Alpha Recyclage Composites^[2] projette de produire des composites de seconde génération qui pourraient ainsi permettre de réduire la part des déchets produits dans la production des CFRP et l'empreinte carbone liée à cette production de CFRP.

En général, en considérant la fin de vie des matériaux CFRP, le recyclage a un coût environnemental plus élevé que la fin de vie classique à travers l'incinération ou l'enfouissement. Cependant, l'utilisation d'un matériau CFRP recyclé est bien moins coûteuse en carbone que la production et l'utilisation d'un matériau CFRP neuf^[11].

On compare ici le coût environnemental de trois méthodes de recyclage des composites : la méthode thermique de pyrolyse, la méthode chimique de solvolysse et une méthode de fragmentation électrodynamique. Dans tous les cas on considère un matériau CFRP de 1kg, composé à 60% de fibres de carbone et 40% de résine époxy et on compare ce matériau recyclé à un matériau CFRP vierge. L'analyse de cycle de vie de matériaux CFRP classique est comparée à celle de matériaux recyclés avec ces techniques grâce à l'outil LCA (définition des objectifs, analyse de l'inventaire du cycle de vie, évaluation de l'impact du cycle de vie et l'interprétation) qui compare l'impact environnemental de la production à la fin de vie d'un matériau^[11].

Le recyclage peut induire une modification des propriétés mécaniques à un matériau CFRP vierge. Pour les méthodes évoquées ci-dessus, on obtient les résultats suivants :

- Par rapport à un matériau vierge, le recyclage par pyrolyse crée un matériau avec une résistance en traction diminuée d'en moyenne 42% ;
- Le recyclage par solvolysse en état supercritique n'altère pas les propriétés mécaniques des matériaux ;
- Par rapport à un matériau vierge, le recyclage par fragmentation électrodynamique crée un matériau avec une résistance mécanique diminuée d'en moyenne 17%^[11].

L'altération des propriétés mécaniques peut évoluer avec l'amélioration de ces techniques de recyclage. Toutefois, le milieu aéronautique étant un milieu très exigeant en termes de résistance mécanique des matériaux, il est possible que ces méthodes ne permettent pas toutes de produire des matériaux assez résistants pour la filière aéronautique, à l'exception de la méthode par solvolysse. Les deux autres méthodes peuvent cependant rester intéressantes dans une optique de réduction et revalorisation des déchets produits lors de la fabrication des fibres de carbone.

On regarde ici l'impact environnemental selon différents critères des 3 méthodes étudiées de recyclage d'un kg de CFRP en comparaison avec les méthodes "usuelles" de fin de vie que sont l'enfouissement et l'incinération. On obtient le résultat suivant sur la figure 2.2 :

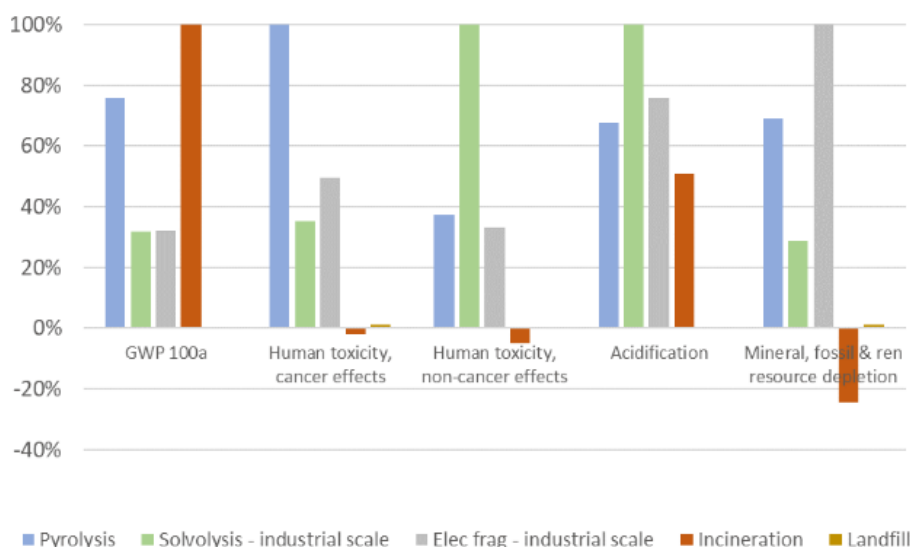


FIGURE 2.2 – Comparaison des impacts environnementaux entre les méthodes de Pyrolyse, Solvolyse, Fragmentation électrodynamique, enfouissement et incinération sur la fin de vie d'un kg de CFRP ^[11]

Cependant, en considérant l'impact environnemental évité en utilisant du CFRP recyclé à l'étape de construction et l'impact environnemental du traitement en fin de vie, on obtient la figure 2.3.

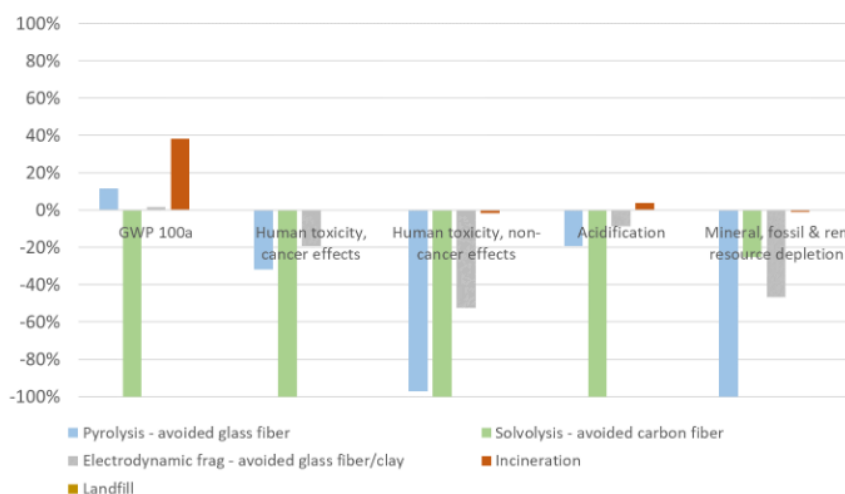


FIGURE 2.3 – Comparaison des impacts environnementaux entre les méthodes de Pyrolyse, Solvolyse, Fragmentation électrodynamique, enfouissement et incinération sur la fin de vie d'un kg de CFRP en considérant le recyclage du matériau a posteriori ^[11]

Pour expliquer cette différence, on s'intéresse à la méthode par solvolysse. A nouveau, il s'agit de la méthode la plus intéressante dans notre cas car elle n'altère pas les propriétés mécaniques du matériau. Avec un matériau recyclé avec la méthode par solvolysse, on substitue 0,6kg de fibre de carbone à partir d'un kilo de CFRP recyclé et :

- Le recyclage par solvolysse consomme 10 fois moins d'énergie que la production de la même quantité de CFRP vierge ;
- La production d'un kg de CFRP recyclé par solvolysse génère 70 à 95% moins d'impact environnemental que la production de CFRP vierge dans les catégories étudiées, comme on peut le voir sur la figure 2.4.

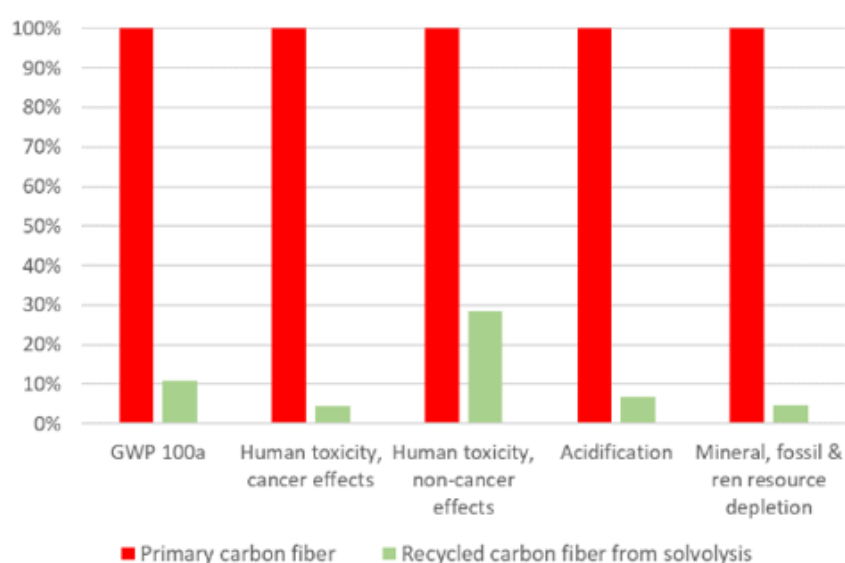


FIGURE 2.4 – Comparaison des impacts environnementaux sur la création d'1kg de CFRP vierge en comparaison avec la création d'1kg de CFRP à partir du recyclage par solvolysse ^[11]

Le recyclage des métaux

Nous allons détailler ici les méthodes qui peuvent être utilisées sur les déchets générés par la manufacture (chutes) pour les retransformer et les rendre à nouveau utilisable pour des pièces d'avions.

L'aluminium, métal le plus présent dans la composition des avions, est connu pour être recyclable à l'infini. Dans le cadre de la manufacture d'avion, l'aluminium est majoritairement utilisé en alliage plus complexes à recycler. Ainsi des entreprises spécialisées telle que Constellium, employée par Airbus pour l'A380, proposent déjà des services qui intègrent ces méthodes de recyclage. En faisant cela, l'entreprise annonce être capable de diviser par deux l'empreinte carbone du matériau ($11t_{eqCO_2}/t$ en recyclage contre $22.4t_{eqCO_2}/t$).

Le titane bien que présent en plus petite quantité dans l'avion que l'aluminium présente les moins bonnes valeurs pour les 3 indicateurs environnementaux. De plus son buy to fly ratio étant très élevé, beaucoup de chutes sont générées au moment de son intégration dans la structure de l'avion. Il y a donc un grand intérêt écologique (mais aussi économique) à trouver une moyen de réutiliser ces chutes. En France seul EcoTitanium propose une solution à ce problème en étant capable de produire du Titane recyclé de qualité suffisante. L'entreprise annonce être capable de diviser par 4 les émissions carbones liées à la production du titane en utilisant comme matériel de base les chutes de production. Mais récemment une nouvelle méthode vient d'être mise au point et pourrait changer complètement la donne ([14]).

Enfin pour l'acier, matériau recyclable par excellence, de nombreuses méthodes existent et sont pour la plupart déjà mises en place dans le secteur aéronautique. D'après un état des lieux datant de 2008, le recyclage de l'acier permet de diviser par 3 les émission de CO_2 et de diviser par deux la puissance électrique nécessaire à la production d'une tonne d'acier par rapport à une production primaire^[9].

2.3 Remplacer

Plusieurs pistes sont envisagées concernant l'utilisation de nouveaux type de matériaux :

Pour les métaux, les solutions les plus prometteuses sont les classes d'alliages d'aluminium-lithium et aluminium-magnésium-scandium. L'entreprise Constellium commercialise ce type d'alliage sous le nom d'Airware ®. Ces alliages ont plusieurs propriétés intéressantes [3] :

- Une diminution de 3 à 6% de la densité ce qui permet un gain de masse.
- Un gain de masse de 5 à 10% environ par optimisation des épaisseurs en prenant en compte les améliorations de propriétés mécaniques (résistance mécanique-tolérance au dommage).

Ces alliages permettraient des gains de performances de l'ordre de 10% à 15%.

À ces nouveaux alliages on peut associer la technique de soudage FSW (soudage par friction) qui pourra s'appliquer aux panneaux de fuselage . Cette nouvelle technique de soudage fait partie des rares technologies qui permettent à la fois à des diminutions de coût et de masse, grâce à la suppression des nombreuses fixations et à la réduction d'épaisseur dans les zones de jonction. En revanche, pour les alliages d'aluminium, un effort conséquent sera nécessaire en ce qui concerne la résistance à la corrosion et les protections notamment les traitements de surfaces.

Les composites sont des matériaux avec de nombreux avantages (réduction de masse, diminution de la maintenance. . .) et ont déjà permis de substituer une grande partie du métal utilisé. Une probable évolution de ces matériaux est les matériaux composites à matrices thermiques. Ces derniers présentent de nombreux avantages :

- Ils possèdent une meilleure tenue en tolérance aux dommages.
- Ils sont soudables.
- Ils se recyclent plus facilement.

Cependant, les coûts actuels de ces matériaux sont élevés et la consolidation qui doit être effectuée à plus haute température reste un défi industriel.

2.4 Étude de cas du fuselage de l'A320 d'Airbus

À partir du travail effectué dans la partie 1.4 et des moyens de réduction introduits précédemment, il s'agit maintenant de les appliquer au cas du fuselage de l'A320 d'Airbus.

Premièrement, la part de la production de l'alliage d'aluminium dans la consommation énergétique et dans les émissions de GES de la production du fuselage représente deux tiers, c'est donc sur l'étape matériau qu'il est intéressant de concentrer les réductions.

Décarbonation

Bien que l'assemblage du fuselage se fasse dans les usines françaises ou allemandes, l'extraction et la production de l'alliage d'aluminium est réalisée principalement par la Chine. Il est alors possible de calculer les émissions de la production de l'aluminium nécessaire pour un fuselage avec un mix énergétique plus décarboné.

En reprenant les calculs effectués dans la section 2.1.1, la consommation énergétique et les émissions de GES produites par la production de l'alliage d'aluminium nécessaire pour le fuselage de l'A320 sont fortement influencées par le mix énergétique pris en compte. Les valeurs sont répertoriées dans le tableau 2.8.

Mixe énergétique	Chine	France	Chine (2050)
Consommation énergétique (MWh)	1.45	197	81
Émissions de GES (t_{eqCO_2})	98	66	51

TABLE 2.8 – Influence du mix énergétique sur la consommation énergétique et les émissions de GES pour la production de l'alliage d'aluminium nécessaire à la production du fuselage

Recyclage

Dans l'étude de M. Achternbosch^[4], il est indiqué que 3.4 sur 12.4t d'aluminium utilisées sont recyclées. Dans l'hypothèse où l'entièreté des ressources en aluminium viendrait du recyclage, c'est-à-dire que la masse de GES émise par tonne d'aluminium serait divisée par 2, les émissions de GES de l'étape matériau passeraient de 98t à 57t, faisant donc passer le taux d'émission de GES de l'alliage d'aluminium produit de $21.8t_{eq,CO_2}/t$ à $12.6t_{eq,CO_2}/t$.

Il n'est malheureusement pas envisageable d'évaluer les réductions possibles obtenues par la fabrication additive concernant le fuselage car sa structure n'est pas propice à l'industrialisation via la fabrication additive, les pièces étant très volumineuses et leur géométrie pas assez particulière pour que la fabrication additive apporte une plus-value conséquente.

Conclusion

L'objectif premier de ce rapport étant d'établir le bilan de l'impact environnemental de l'industrie manufacturière aéronautique, il a été constaté que ce dernier est très vaste et compliqué à évaluer dans tous les domaines. Néanmoins, en se concentrant majoritairement sur quatre matériaux et trois indicateurs de cet impact, il est possible de faire apparaître des tendances. En effet, l'impact de la production des avions était, jusqu'au développement des avions à majorité de CFRP, proportionnel à leur poids. Il n'est donc pas nécessairement envisageable de développer des avions plus gros ou plus petits pour influencer l'impact total de la flotte dans le cas où le nombre de passagers reste constant. Avec l'émergence du composite dans l'aéronautique, le titane prend aussi une place plus importante, principalement à cause de la corrosion galvanique. Or, le titane est le matériau avec l'impact environnemental le plus élevé et les CFRP consomment aussi énormément d'énergie. Ce problème est néanmoins largement compensé par l'allègement des structures d'avions et donc la diminution de la consommation dans la phase d'opération, justifiant le développement de programmes comme celui de l'A350. Il est donc plus intéressant de trouver des solutions qui n'impactent pas l'efficacité de la phase d'opération, à moins de l'améliorer.

Des solutions ont donc été établies pour réduire l'impact développée auparavant. Si les sources d'énergie ont un fort impact sur les émissions de GES et la consommation énergétique dans la production de matériaux, elle ne se limite pas à l'aéronautique. La voie de la décarbonation des sources d'énergie bénéficie à tous les domaines de l'industrie et de nombreux pays à l'instar de la Chine constatent que c'est le seul moyen pour diminuer à terme drastiquement les émissions de GES. D'autres méthodes industrielles sont développées pour améliorer l'efficacité des moyens de production et des matériaux. Le recyclage des métaux, déjà largement répandu est notamment mis à mal par l'augmentation de la complexité des alliages utilisés afin de garder leurs propriétés et leurs performances. De même, les CFRP sont encore très mal recyclés car formés de plusieurs matériaux. La voie du remplacement de certains matériaux par d'autres ayant des meilleurs performances ou étant plus faciles à réparer ou recycler est prometteuse dans le but d'économiser sur beaucoup de plans.

Dans le cas du fuselage d'A320 d'Airbus, les émissions de GES de sa production peuvent être divisées par 2 si la filière de recyclage de l'aluminium se développe davantage ou en 2050 avec le futur mix énergétique de la Chine. Sa consommation énergétique pourra elle être divisée par 5. Il faut tout de même faire attention à l'effet de rebond qui consisterait à produire plus d'avions sous prétexte qu'ils polluent moins.

De nombreuses externalités environnementales n'ont pas été prises en compte dans cette étude, comme l'impact sur la biodiversité ou sur les sociétés humaines, car difficilement quantifiables. Néanmoins, il peut être intéressant de noter que les étapes d'extraction, de production et de transport des matériaux perturbent les écosystèmes dans lesquels ces opérations prennent place. L'industrie minière, les machines et les produits chimiques utilisés dégradent fortement

la biodiversité, la terre et l'eau de ces localisations, et des éventuelles populations humaines y vivant.

Une des solutions qui n'a pas été envisagée ici est la diminution de la demande du transport aérien. Si moins de personnes prennent l'avion, moins d'avions seront nécessaires, et ceux-ci seront plus petits, réduisant l'impact de la production sur l'environnement, mais surtout la consommation en carburant et donc les émissions de GES en opération, qui représente la quasi-totalité de la pollution de l'avion au cours de sa vie.

Bibliographie

- [1] Composites : recyclage par solvolyse. *Environnement Magazine*, 2015.
- [2] Alpha recyclage composites (site web). 2022.
- [3] AAE and 3AF. Matériaux aéronautiques d'aujourd'hui et demain, 2014.
- [4] M. Achternbosch, K. R. Bräutigam, Chr. Kupsch, B. Ressler, and G. Sardemann. Material flow analysis - a comparison of manufacturing, use and fate of cfrp-fuselage components versus aluminium-components for commercial airliners. Workshop 'CFRP for Future Aircraft Fuselage Structures', Braunschweig, October 24, 2002, 2002. 11.01.01 ; LK 01.
- [5] J. Bueb and E. To. Comment évaluer l'externalité carbone des métaux. *Note d'analyse, France Stratégie*, 2020.
- [6] R. Huang, M. Riddle, D. Graziano, J. Warren, S. Das, S. Nimbalkar, J. Cresko, and E. Masanet. Energy and emissions saving potential of additive manufacturing : the case of lightweight aircraft components. *Journal Cleaner Production*, 135, 2016.
- [7] T. E. Norgate, S. Jahanshahi, and W. K. Rankin. Assessing the environmental impact of metal production processes. *Journal of Cleaner Production*, 15, 2006.
- [8] U.S. Department of Energy. Bandwidth study on energy use and potential energy saving opportunities in u.s. carbon fiber reinforced polymer manufacturing. *Office of energy efficiency renewable energy*, 2017.
- [9] Bureau of International Recycling. Report on the environmental benefits of recycling. *Journal of Supercritical Fluids, Elsevier*, 2008.
- [10] E. Pierrat, L. Rupcic, Z. Hauschild, M., and A. Laurent. Global environmental mapping of the aeronautics manufacturing sector. *Journal of Cleaner Production*, 297, 2021.
- [11] B. Pillain, P. Loubet, F. Pestalozzi, J. Woidasky, A. Erriguible, and et al. positioning supercritical solvolysis among innovative recycling and current waste management scenarios for carbon fiber reinforced plastics thanks to comparative life cycle assessment. *Journal of Supercritical Fluids, Elsevier*, 2019.
- [12] S. Pimenta and S. T. Pinho. Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications : Technology review and market outlook. *Waste Management*, 31, 2011.
- [13] L. Rousselle. Fairmat veut rendre accessibles les composites en fibres de carbone recyclés. *Usine Nouvelle*, 2021.
- [14] N. S. Weston and M. Jackson. Fast-forge of titanium alloy swarf : A solid-state closed-loop recycling approach for aerospace machining waste. *Journal of Supercritical Fluids, Elsevier*, 2020.