



Métier de l'ingénieur généraliste 2019

Rapport du projet Optimaéro

Projet encadré par Vincent Maurel et réalisé par

d'Agrain France
Anceaux Malo
Boutrouelle Mathis
Cattan Yannis
Desroches Clément
Dupont Florent
Favre Ambroise
Fenoux Valentin
Hennion Corentin
Horsin Julien
Jacquillat Augustin
Le Clerc Théophile
Mondon Arnaud
Tardy Nastassia

Remerciements

Dans un premier nous voudrions remercier chaleureusement Vincent Maurel pour son implication et sa dévotion tout au long de ces trois semaines de MIG. Son aide nous a été précieuse dans la réalisation de ce rapport. Il a su nous aiguiller de façon pertinente vers chacun de nos objectifs.

De plus nous souhaitons également remercier Safran Technologies, Safran Aircraft Engines et le centre des matériaux des Mines pour l'encadrement de chacun des mini-projets. Nous remercions en particulier Pierre Sallot et Edern Menou de Safran Tech ; Maurine Chaumeil, Adrien Pertat, Nicolas Tantot et Samy El Karnighi de Safran Aircraft Engine ; ainsi que Basile Marchand et Robin Mallick au Centre des Matériaux pour leur aide tout au long de ces projets.

Nous voudrions enfin remercier l'ensemble des équipes de Safran Aircraft Engines, Safran Gennevilliers, Safran Nacelles, Safran Technologies, du Bureau d'Enquêtes et d'Analyse, de la Direction Générale de l'Armement AT, de Air-France Industries & KLM engineering and maintenance et du Centre des Matériaux des Mines ParisTech pour leurs chaleureux accueils lors de chacune de nos visites. Et finalement, encore un grand merci à Vincent Maurel pour avoir organisé ces visites.

Sommaire

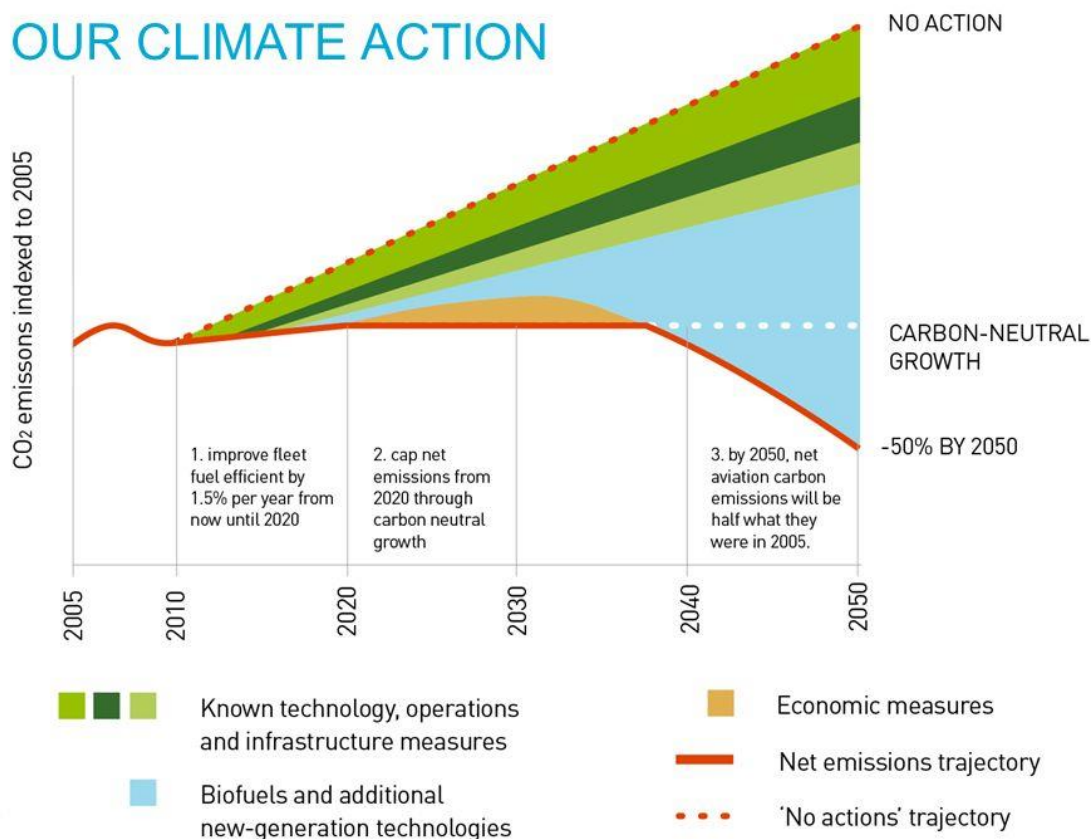
I. Introduction générale	4
1) Contexte	
2) Présentation des mini-projets	
II. Étude des propriétés thermomécaniques de l'alliage Ti2AlNb	7
1) Contexte d'étude	
2) Expérience de compression	
3) Mise en place d'une simulation pour comprendre et exploiter les résultats expérimentaux	
4) Analyse de la microstructure des pions écrasés avant et après traitement thermique	
5) Discussion	
6) Conclusion	
III. Impact de diverses améliorations sur les émissions carbone	15
1) Introduction et hypothèses	
2) Optimisation de l'utilisation d'une flotte	
3) Optimisation technologique des avions	
4) Conclusion	
IV. Élaboration de critères d'éco-conception de différents matériaux	22
1) Critère économique	
2) Critère socio-écologique	
3) Critère géopolitique	
V. Conclusion générale	33
VI. Annexes	34
1) Annexe partie II	
2) Annexes partie III	

I. Introduction générale

1) Contexte

Avec une croissance du nombre de passagers transportés de 6,4% en 2018 (OACI, 2018) et la prévision d'une croissance quasi-constante lors des prochaines années, le trafic aérien ne cesse de se densifier. Aujourd'hui, le domaine de l'aéronautique représente 2 à 3% des émissions européennes de gaz à effet de serre (EASA, 2019). La récente prise de conscience du changement climatique se manifeste plus particulièrement dans l'émergence du *flygskam*, comprendre la honte de prendre l'avion, médiatisé par Greta Thunberg. (Courrier international, 2019).

Ainsi, la prise de conscience collective du changement climatique pousse les motoristes, comme Safran, à réduire la consommation des avions non plus seulement pour des raisons économiques, mais également écologiques. Dans cette optique, l'industrie aéronautique se fixe comme objectif de réduire de 50% les émissions globales de gaz à effet de serre (indexées sur celles de 2005) d'ici à 2050 (ATAG, 2017).



Compte-tenu de la croissance prévisionnelle du trafic aérien, cet objectif ambitieux implique de réelles innovations technologiques, notamment sur les moteurs. C'est là qu'intervient le groupe Safran. Le laboratoire de R&T Safran Tech, qui nous a ouvert ses

portes, étudie les manières d'optimiser les turboréacteurs d'avions et d'innover sur la conception de moteurs.

Émissions de CO₂ et consommation de kérosène sont étroitement liées. Ainsi, pour réduire les émissions de CO₂, les moteurs doivent consommer moins. Le principal levier d'action est la réduction de la masse des moteurs. C'est la thématique récurrente de nos différentes visites, que cela soit à Safran Nacelle au Havre ou à Villaroche sur le site de Safran Aircraft Engine. Toutefois, selon Safran Tech, une rupture technologique est indispensable afin de réduire drastiquement les émissions en un temps si restreint.

La sécurité, aspect important du secteur aéronautique, représente un obstacle à cette évolution rapide. Il s'agit d'un des domaines les plus réglementés ; réglementations sonores, sécuritaires, écologiques, etc. Une grande partie de ces normes sont publiées par l'ICAO (International Civil Aviation Organisation) et poussent les motoristes à s'adapter. Cela se traduit par une multitude de tests et simulations, très coûteux, que doit valider un moteur pour rentrer sur le marché. Le développement du moteur Leap a ainsi duré 20 ans. De plus, certaines recommandations sont émises par le bureau enquêtes et analyses (B.E.A.), entité indépendante chargée d'enquêter sur les accidents d'avions et que l'on a eu l'opportunité de visiter. Ces recommandations invitent les compagnies et motoristes à mettre à jour leurs systèmes de sécurité.

Globalement, le secteur de l'aéronautique doit répondre en un temps record à des attentes sociétales et économiques tout en préservant la sécurité des passagers et en respectant des normes toujours plus strictes. Cette faible marge de manœuvre stimule des projets de recherches sur toute la vie de l'avion, de sa conception (avec les matériaux) à son usage et sa fin de vie.

2) Présentation des mini-projets

Chacun de nos mini-projets touche un aspect différent de la conception et de l'utilisation d'un avion.

Un premier mini-projet se concentre sur l'optimisation d'un alliage particulier développé en collaboration entre le Centre des Matériaux des Mines et SAFRAN, le S12 (ou le Ti₂-Al-Nb). Cet alliage présente le double avantage d'avoir des caractéristiques thermo-mécaniques intéressantes tout en ayant une densité faible par rapport au alliage base Nickel actuellement utilisés pour réaliser les pièces chaudes du moteur (5 contre 9). Avant de pouvoir envisager son utilisation pour fabriquer des pièces de moteur, ses propriétés dont sa résistance au fluage et sa microstructure doivent être documentées, et un protocole doit être élaboré pour déterminer les conditions d'élaborations conduisant aux meilleures propriétés d'usage.

Un second mini-projet, réalisé à Safran Aircraft Engine (SAE) s'intéresse à mesurer l'impact CO₂ d'une insertion technologique au sein d'une flotte (réduction de masse, meilleure efficacité des moteurs) et d'une meilleure utilisation des flottes, dans le but de proposer des solutions pour réduire l'impact environnemental du secteur aéronautique.



Enfin, un dernier mini-projet, réalisé à SafranTech, s'attache à concevoir un critère d'éco-conception pour comparer l'empreinte économique, environnementale et éthique des matériaux ainsi que leur criticité, à savoir leur sécurité d'approvisionnement. Tout cela est réalisé dans le but de coupler ce critère avec les données fonctionnelles, notamment mécaniques, et d'optimiser la choix et l'élaboration des alliages.

L'articulation des mini-projets illustre la question globale des outils, méthodes et limitations des progrès envisageables dans le domaine aéronautique sur l'empreinte carbone. Si on considère notre nouvel alliage comme la colonne verticale du projet global, les deux autres mini-projets permettent d'évaluer ses performances en terme d'approvisionnement puis d'usage. En effet, le deuxième mini-projet analyse l'impact environnemental de son insertion dans une flotte tandis que le troisième mini-projet élabore un critère d'éco-conception permettant de mesurer la criticité du matériau, voir s'il est raisonnable de le considérer en termes de protection de l'environnement et d'éthique.

Bibliographie

- *Rapport annuel 2018.* (s. d.). Consulté 3 décembre 2019, à l'adresse <https://www.icao.int/annual-report-2018/Pages/FR/default.aspx>
- *Climate change | european aviation environmental report.* (s. d.). Consulté 4 décembre 2019, à l'adresse <https://www.easa.europa.eu/eaer/climate-change>
- *Tendance. "Honte de prendre l'avion" : Comment le "flygskam" est en train de changer nos habitudes.* (2019, octobre 29). Consulté 4 décembre 2019, à l'adresse *Courrier international website:* <https://www.courrierinternational.com/revue-de-presse/tendance-honte-de-prendre-lavion-comment-le-flygskam-est-en-train-de-changer-nos>
- *CFM et le moteur LEAP : Promesses tenues.* (2019, juin 17). Consulté 12 décembre 2019, à l'adresse *Safran Aircraft Engines website:* <https://www.safran-aircraft-engines.com/fr/media/cfm-and-leap-engine-delevering-what-we-promised-version-anglaise-uniquement-20190617>

II. Étude des propriétés thermomécaniques de l'alliage Ti2AlNb (S12)

Réalisé en collaboration avec le Centre des Matériaux

Comment réduire les émissions de gaz à effet de serre des avions ? Le cahier des charges que doivent satisfaire ces engins de pointe est très restrictif : on recherche un point optimum de fonctionnement, entre consommation de kérosène et émission de CO2 minimales, rendement maximum, contraintes pratiques de fonctionnement des pièces (températures élevées de fonctionnement qui doivent être inférieures à la température de fusion du matériau d'une pièce, par exemple), masse minimale ... Dans ce contexte, il s'agit de jouer sur chacun des paramètres auxquels on peut avoir accès. En particulier, le choix des matériaux des pièces du moteur est primordial. Actuellement, des alliages à base de Titane, Nickel et Aluminium sont les plus représentés dans les moteurs d'avions, comme pour celui de la figure ci-dessous.

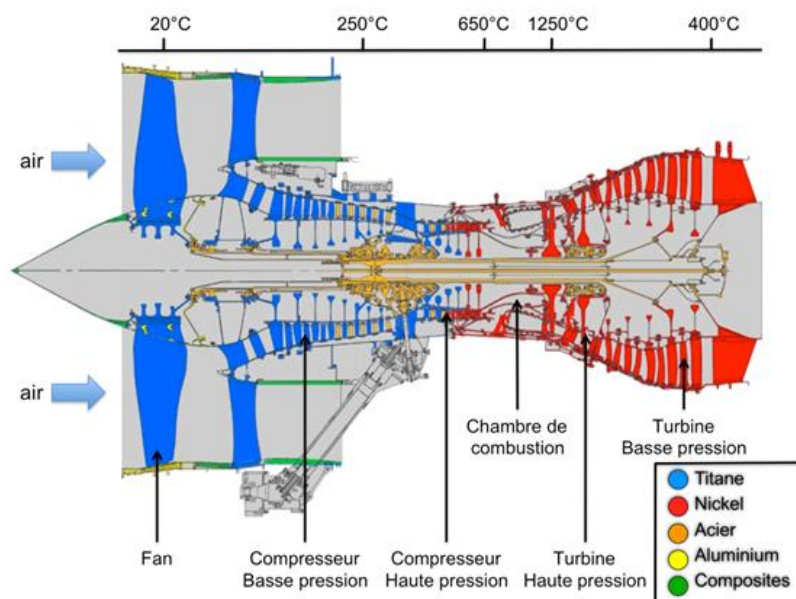


Figure 1 : Schéma de la structure d'un turboréacteur double flux

L'étude portera sur un nouvel alliage de Titane étudié dans le cadre d'une collaboration tripartite entre Safran-Tech, TIMET et le Centre des Matériaux Mines ParisTech : l'alliage S12, basé sur la composition stœchiométrique Ti_2AlNb . Nous allons d'abord mettre en avant le contexte d'étude de cet alliage, puis expliciter la démarche utilisée, les résultats obtenus, et enfin discuter de la validité de ces derniers.

1) Contexte d'étude

Le titane présente l'avantage de la légèreté (60% de la densité de l'acier). Si l'alliage base Ti le plus utilisé est actuellement le TA6V (4,4 g/cm³), les caractéristiques mécaniques et thermiques de ce dernier - notamment en fluage - deviennent insuffisantes à des températures au-delà de 600°C. C'est pourquoi le nickel, de masse volumique deux fois plus importante (8 à 9 g/cm³), est utilisé dans la chambre de combustion et dans les turbines

hautes et basses pressions, où la température des gaz monte jusqu'à 1300°C (cf. fig 1) . La recherche d'un alliage qui puisse allier résistance aux hautes températures et faible masse volumique présente dès lors un enjeu important. L'alliage proposé (le Ti2AlNb, ou S12) possède une densité plus faible que les alliages à base de nickel et présente des caractéristiques mécaniques intéressantes aux températures de services (>650-700 °C). Les études précédentes (Carisey, 1998; German, 2003) ont permis d'optimiser la composition chimique de l'alliage. La composition de l'alliage S12 proposée par L.Germann est présentée dans le Tableau 1.

L'objectif de la thèse de Robin Mallick, au Centre des Matériaux de l'école des Mines, est de trouver un protocole qui permettent d'optimiser la microstructure de l'alliage au cours des traitements thermomécaniques et en particulier de réduire la taille des grains afin de permettre l'industrialisation de l'alliage S12. Pour ce faire, des essais mécaniques à haute température seront analysés et les résultats seront couplés à des calculs de simulation numérique afin d'identifier les mécanismes de recristallisation et de modéliser les transformations microstructurales au cours de la déformation .

2) Expérience de compression

Afin de diminuer la taille des grains, on réalise deux essais de compression à chaud (1010°C) et à vitesse de déformation constante $\dot{\epsilon} = 0,1 s^{-1}$. On met en place le montage suivant :

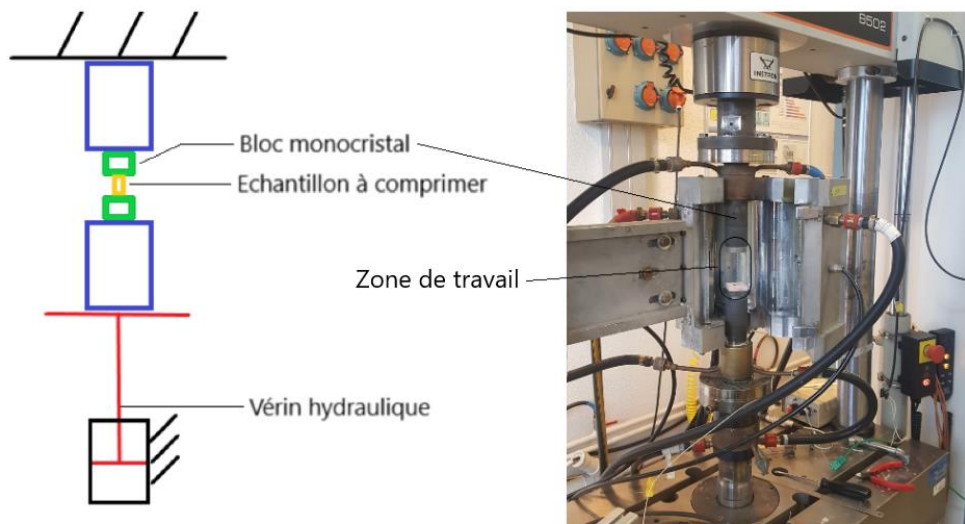


Figure 2 : Schéma du montage expérimental

Pendant l'essai, on mesure l'effort appliqué et le déplacement de la traverse, d'où on déduit la déformation et la contrainte normale. On obtient les courbes suivantes (fig 5) :

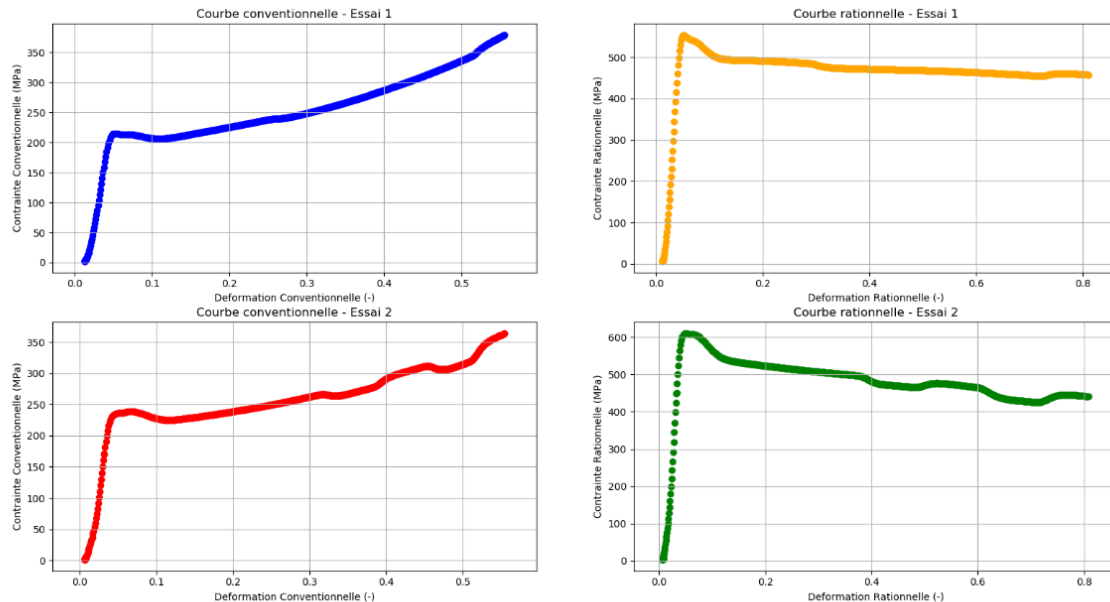


Figure 3 : Réponses contrainte-déformation des échantillons

Deux définitions différentes de la déformation et de la contraintes sont exploitées :

- d'une part, la définition conventionnelle :

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0}$$

- d'autre part, la définition rationnelle : (cette définition est plus précise pour l'essai réalisé car elle prend en compte l'augmentation de la surface lors de la compression)

$$\sigma_{vraie} = \frac{F}{S} = \sigma (1 - \varepsilon)$$

$$\varepsilon_{vraie} = -\log \frac{\Delta h}{h_0}$$

On obtient un module de Young de **10 GPa** et une limite d'élasticité de **220 MPa**.

3) Mise en place d'une simulation pour comprendre et exploiter les résultats expérimentaux

Pour étudier les effets de l'écroutissage sur la microstructure, comme on étudie des petits échantillons, il est nécessaire de savoir quels sont les effets dûs aux dimensions du pion. En effet, la symétrie de la pièce par exemple, concentre les effets de compression au coeur du pion. Afin de mieux aborder ces phénomènes, nous nous appuyons sur une simulation numérique de l'essai de compression.

Pour valider un modèle de comportement associé au matériau étudié, nous avons mis en place une simulation sous Z-set pour retrouver les courbes expérimentales représentées ci-dessus. Les hypothèses globales sont les suivantes: le maillage est fixé, le module de Young est de **100 GPa**, la face basse de l'échantillon est encastrée et la face haute se rapproche de

la face encastrée telle que la vitesse de déformation soit constante. On empêche les déplacements horizontaux des deux faces du cylindre (aucun glissement, alors qu'il devrait y avoir des frottements à l'interface) dans le but de limiter les temps de calculs.

Une première tentative consiste en un modèle basique ne prenant pas en compte le temps mais seulement l'élasticité et la plasticité, ce qui fait que la courbe contrainte-déformation est indépendante de la vitesse de déformation. Le second modèle visco-plastique prenant en compte la dépendance temporelle, on obtient des courbes plus précises (fig 4).

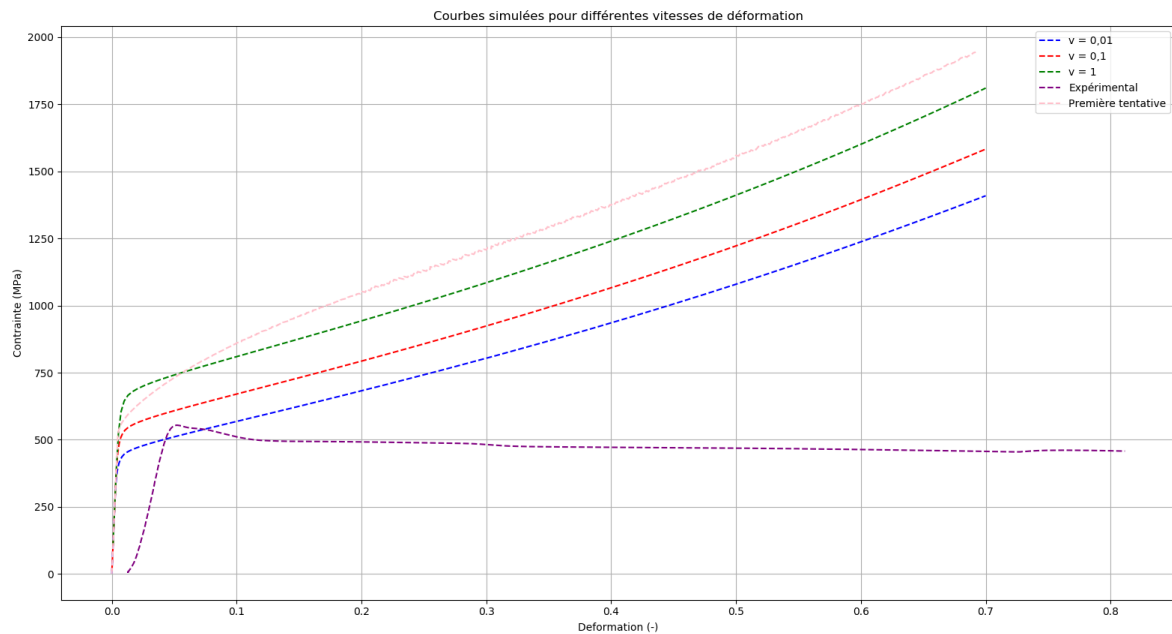


Figure 4 : Courbes contrainte/déformation simulées pour différentes vitesses de déformation

Ci-dessous une image extraite d'une simulation plus raffinée. Dans cette simulation, un maillage, c'est-à-dire la discrétisation spatiale du milieu continu de l'échantillon observé, est plus fin :

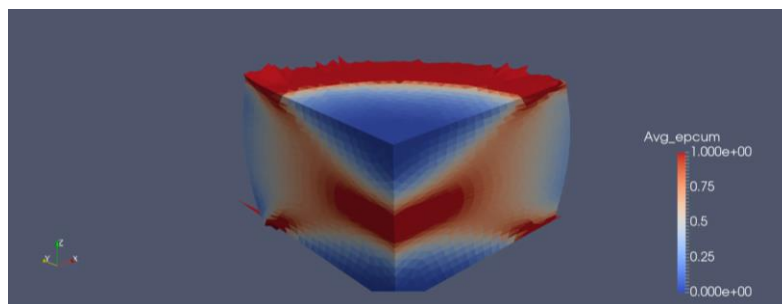


Figure 5 : Image de la simulation Z-set, les couleurs représentent la déformation moyenne de la maille

Cette simulation, plus précise, permet de mieux localiser la zone dans laquelle nous pourrions chercher les grains recristallisés. On définit ainsi la zone du pion qui sera examinée par la suite.

4) Analyse de la microstructure des pions écrasés avant et après traitement thermique

4-1) Caractérisation au microscope optique de la microstructure avant et après traitement thermique

Deux échantillons ont été déformés à 1010°C avec une vitesse de déformation de 0,1 s⁻¹ et jusqu'à une déformation de 0,7 (correspondant à une réduction de la hauteur du pion de 50%). Afin d'étudier l'influence d'un maintien à haute température après déformation, un échantillon a subi un traitement thermique à 1050°C pendant une heure. Par la suite, les deux échantillons sont découpés, polis jusqu'à une granulométrie de 0,3 µm (solution d'alumine), attaqués chimiquement avec une solution à base d'acide fluorhydrique. Les pions déformés, polis et attaqués sont observés au microscope optique. Les images en résultant sont présentées aux figures 6 et 7.

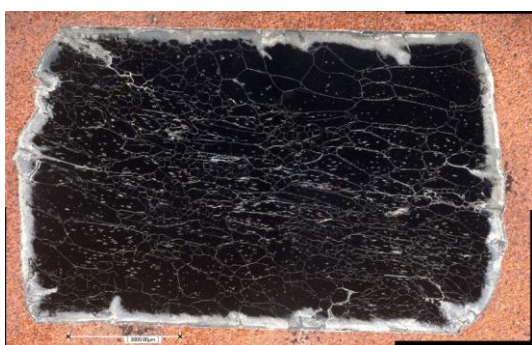


Figure 6 : Echantillon déformé à 1010°C, à une vitesse de déformation de 0,7 s⁻¹ suivi d'un maintien isotherme de 1h à 1050°C

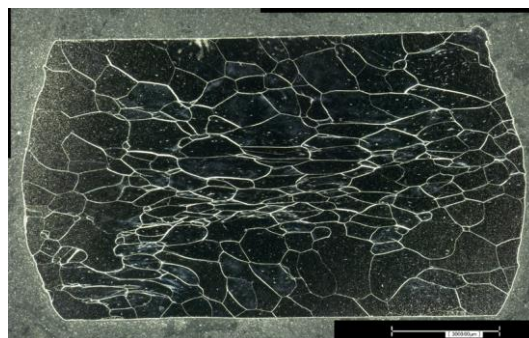


Figure 7 : Echantillon déformé à 1010°C, à une vitesse de déformation de 0,7 s⁻¹. Etat brut de déformation

On observe en contraste clair les joints de grains. Les grains après déformation (figure 7) sont écrasés, on remarque que la déformation se concentre au centre de l'échantillon. Sur l'échantillon recuit (figure 6), on observe des grains plus petits et plus nombreux que ceux observés sur le premier échantillon. Ces petits grains pourraient résulter d'un phénomène de minimisation de l'énergie stockée au cours de la déformation : la recristallisation.

En effet, les défauts engendrés par la déformation plastique, comme les dislocations, rendent le matériau thermodynamiquement instable. L'écroutissage va provoquer des accumulations locales de dislocations. L'énergie stockée va permettre, pour des températures suffisantes, la germination de nouveaux grains non déformés. Ces derniers vont alors croître au détriment des anciens grains déformés. Afin de comparer la microstructure de manière plus précise, on traite les images obtenues sous *ImageJ*. Il est alors possible de déterminer quantitativement la fraction surfacique recristallisée, qui est de l'ordre de 30% (voir annexe 2, p.35).

Afin de valider, l'hypothèse de la germination de nouveaux grains au cours d'un maintien à haute température d'un échantillon déformé, les échantillons sont analysés par diffraction d'électrons rétrodiffusés (en anglais electron backscatter diffraction ou EBSD).

L'EBSD est une technique cristallographique de caractérisation microstructurale permettant de mesurer l'orientation cristallographique de nombreux matériaux, qui peut être utilisée pour déterminer la déformation stockée dans chaque grain. Cette méthode permet aussi de caractériser les grains grâce aux changements d'orientation de la maille cristalline. En effet, au sein d'un grain, les mailles cristallines qui le composent ont presque la même orientation cristalline. On repère ainsi les joints de grains et donc la taille de grain.

4-2) Caractérisation à l'EBSD de la microstructure avant et après traitement thermique

On place chacun des deux échantillons (celui qui a subi un traitement thermique et celui qui n'en a pas subi) dans l'EBSD et on obtient les figures suivantes:

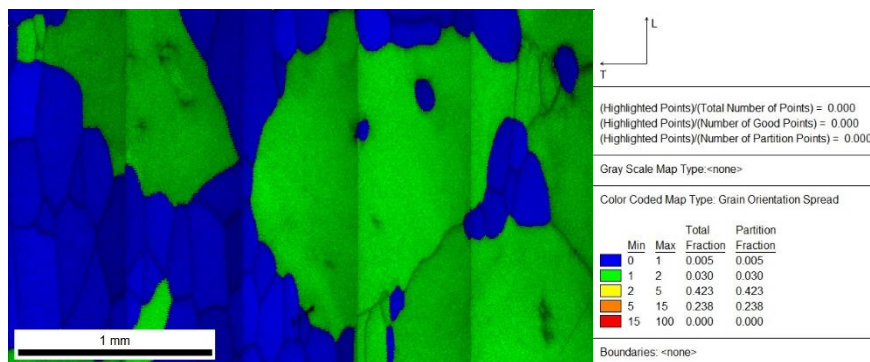


Figure 8 : Désorientation moyenne de chaque grain (échantillon recuit)

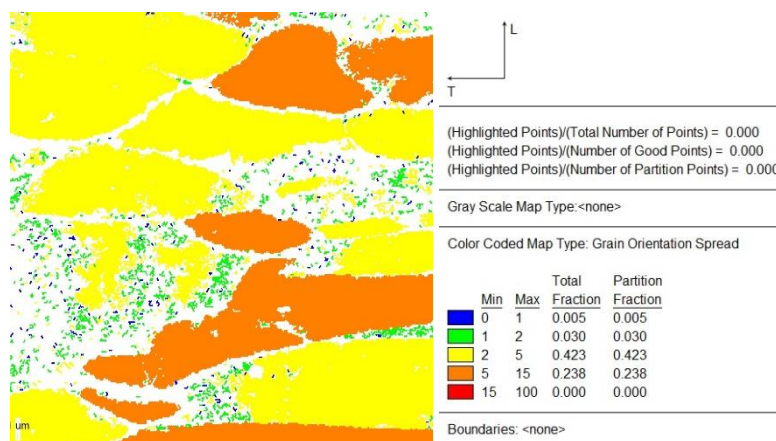


Figure 9 Désorientation moyenne de chaque grain (échantillon non recuit)

Les couleurs représentent les désorientations moyennes de chaque grain (la moyenne sur le grain de l'écart à l'orientation moyenne du grain). Une forte désorientation du grain indique qu'il est fortement déformé et qu'il possède donc une énergie emmagasinée importante. Ainsi, si la désorientation moyenne d'un grain est inférieure à 1°, on considère le grain comme étant issu d'un phénomène de recristallisation. En comparant les deux résultats, on remarque que de nouveaux grains, plus petits (issus de la germination et la croissance) sont apparus pour le pion recuit. La taille des grains a par ailleurs globalement diminué avec leur compression. Il y a moins de désorientation au sein des gros grains restants.

4-3) Comparaison des résultats obtenus à l'EBSD et par la méthode optique:

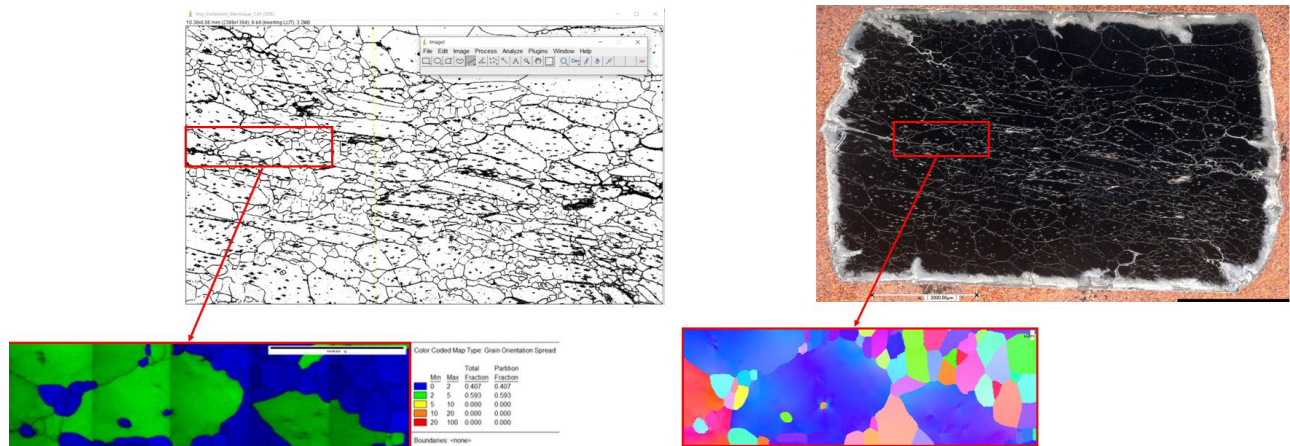


Figure 10 : superposition image EBSD et optique pour l'échantillon recuit : déformation moyenne (à gauche) et orientation des grains (à droite)

Les deux approches se valident et montrent que l'expérience d'écroutissage a permis de fournir une énergie interne à chaque grain du matériau. Une fois le matériau placé dans les bonnes conditions lors du traitement thermique, l'énergie interne permet de développer des nouveaux grains, plus petits. En effet, les germes présents au niveau des joints de grains, vont pouvoir grossir et diminuer leur énergie. Les grains déformés vont s'arranger et diminuer l'énergie globale. L'observation à l'EBSD permet de plus de montrer que les petits grains proviennent d'une recristallisation : les petits grains au niveau des joints ont de très faibles désorientations, et donc une énergie interne faible. Ce n'est pas toujours le cas pour les gros grains. Avec un recuit, les gros grains restants ont pu se réorienter et s'homogénéiser, et diminuer aussi leur énergie interne. Au contraire sans recuit les gros grains ont gardé l'énergie interne fournie par la compression et n'ont pas pu la libérer. Le traitement thermique après compression permet donc au grain de libérer cette énergie interne par un phénomène de recristallisation (écroutissage).

L'orientation des grains selon les axes orthogonaux à l'axe de compression sont équiaxes (l'effet recherché pour améliorer les performances thermomécaniques dans ce contexte). La répartition équiaxe montre également que ce sont de nouveaux grains qui ont germé et qui n'ont donc plus les défauts internes des gros grains. Le procédé de compression à chaud permet donc d'uniformiser les grains.

5) Discussion

La mesure du module de Young donne un résultat de 10 GPa. Cette valeur est trop faible par rapport aux valeurs tabulées, car la machine utilisée induit une erreur systématique non négligeable : on ne mesure pas le module de l'échantillon mais celui de toute la chaîne de compression, des vérins aux capteurs. Pour compenser cette erreur, il faudrait réaliser un essai sur un matériau de module de Young parfaitement connu, et ainsi pouvoir mesurer le module d'élasticité de la machine de compression. On obtiendrait alors le module du Titane grâce à la formule:

$$\frac{1}{E_{\text{titane}}} = \frac{1}{E_{\text{mesure}}} - \frac{1}{E_{\text{chaîne}}}$$

Par ailleurs, le modèle de la simulation n'est pas totalement en adéquation avec la réalité comme on peut l'observer sur la courbe de la figure 4. Pour que cela soit effectivement le cas, il faudrait une meilleure prise en compte des conditions aux limites et de l'influence des grains, un maillage plus fin et affiner les paramètres de simulation. Cependant, ceci nécessiterait un temps de calcul trop élevé pour le temps imparti à notre projet.

6) Conclusion

Nous avons donc appréhendé une technique de réduction des grains qui, si répétée plusieurs fois, peut mener à un taux de recristallisation de 90% avec une taille de grains de l'ordre de 200 μm . Il reste à optimiser le processus en faisant varier le taux et la vitesse de déformation, la température de compression, la température et le temps de traitement thermique, le nombre d'itérations...

D'après Safran, les superalliages à base nickel composent actuellement 50% de la masse d'un moteur. Or, la densité du S12 est environ 2 fois inférieure à celle des superalliages. Ainsi, l'utilisation de cet alliage pour remplacer la totalité des pièces en base nickel permettrait une réduction de 25% de la masse du moteur au maximum, soit environ 500 kg.

La réduction de la taille des grains qui composent l'alliage S12 lui offre de meilleures caractéristiques thermo-mécaniques. Cet alliage apparaît donc comme une alternative sérieuse aux alliages base nickel. Dans le meilleur des cas, la substitution des alliages base nickel par le S12 permettrait de réduire de 25% la masse des moteurs actuels. Mais quel serait l'impact réel sur la consommation d'un aéronef ? Existe-t-il d'autres moyens pour réduire les émissions de CO2 des avions ? Le mini-projet réalisé à SAE évalue l'impact sur la consommation d'une telle substitution et explore d'autres pistes pour optimiser la consommation des avions.

III. Impact de diverses améliorations sur les émissions carbone

Réalisé en collaboration avec Safran Aircraft Engine

1) Introduction et hypothèses

Afin d'atteindre les objectifs ambitieux fixés par l'ATAG, nous avons envisagé plusieurs solutions : agir sur l'avion ou sur la flotte. L'objectif est de quantifier l'impact de l'une et l'autre de ces approches sur l'émission globale de CO2 du secteur aéronautique.

Nous avons à notre disposition les données de deux mois de vol (avril/mai 2015) provenant du site FlightRadar, avec pour chaque vol : l'immatriculation et le modèle de l'appareil, sa compagnie, la distance parcourue, l'aéroport de départ et d'arrivée.

Le logiciel Power BI nous a permis de traiter cette base de données et d'étudier aisément les grandes tendances de l'aviation commerciale (flottes des compagnies et leurs utilisations).

Le logiciel Piano-X permet de faire le lien entre ces données et la consommation de carburant, en simulant pour un appareil, une distance et une charge donnés (nombre de passagers et poids moyens) la consommation des moteurs.

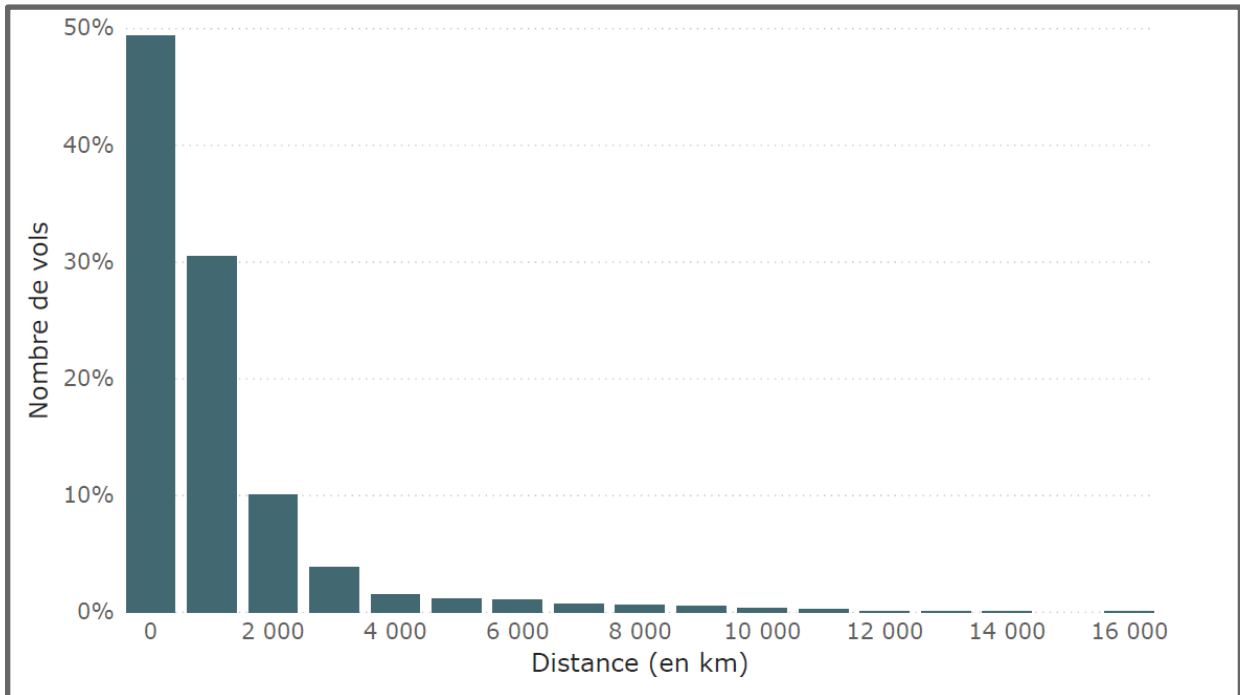
Les hypothèses suivantes sont utilisées :

- La masse moyenne d'un passager (bagages inclus) est de 95,3 kg.
- Le taux de remplissage moyen des avions est de 85%.
- Court courrier : 0-1000 km. Moyen courrier : 1000-4000 km. Long courrier : 4000+ km

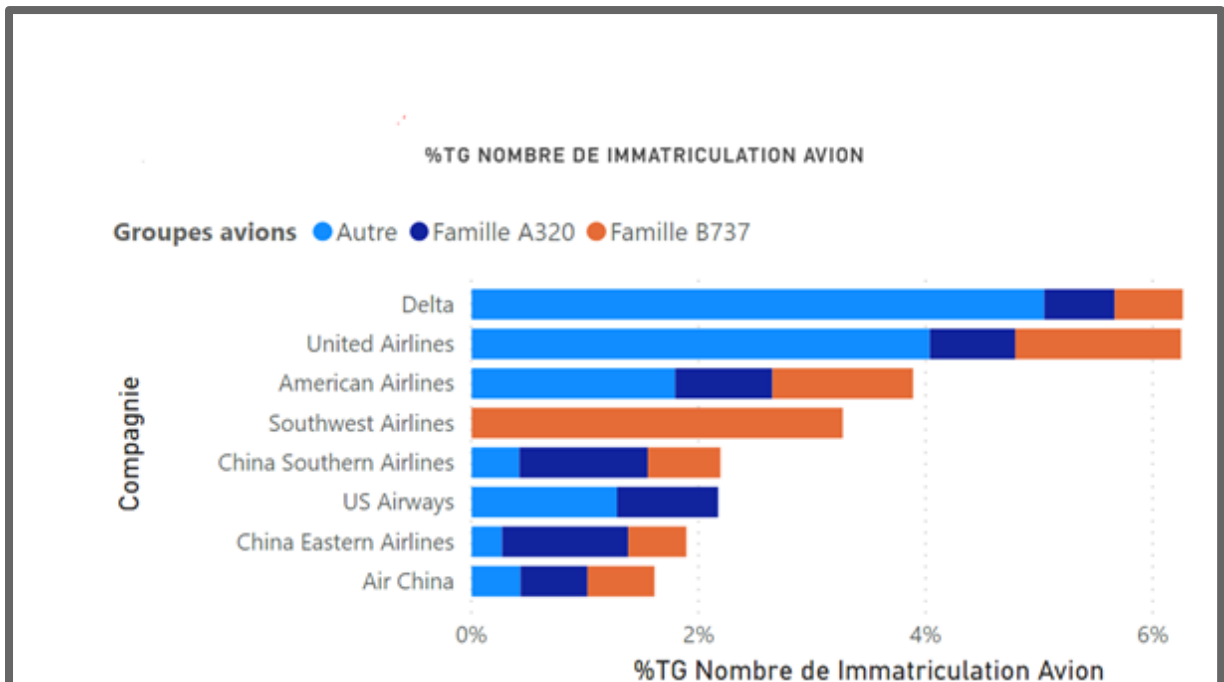
A partir de la masse de carburant utilisée, il nous est possible d'obtenir la masse de CO2 émise (multiplication par un facteur 3,11 propre à la réaction de combustion, voir annexe 1, p.38). Pour quantifier l'impact environnemental, nous nous sommes uniquement intéressés aux émissions de CO2. De plus, comme le CO2 et les autres gaz à effet de serre produits par les moteurs d'avion sont émis en altitude, ils auront potentiellement un plus grand impact sur le climat, d'un facteur 2,7 (Jardine, 2005). Nous n'avons pas pris en compte ce facteur et préférons considérer uniquement la masse de CO2 produite (et non un équivalent en CO2 émis dans l'atmosphère).



Voici la distribution statistique des longueurs des vols au niveau mondial en 2015 (avril-mai).



Une très grande majorité des vols est de moins de 2000 km (graphe ci-dessus) et les avions adaptés à ces faibles distances (A320, B737) sont les plus représentés dans les flottes des compagnies (graphe ci-dessous).

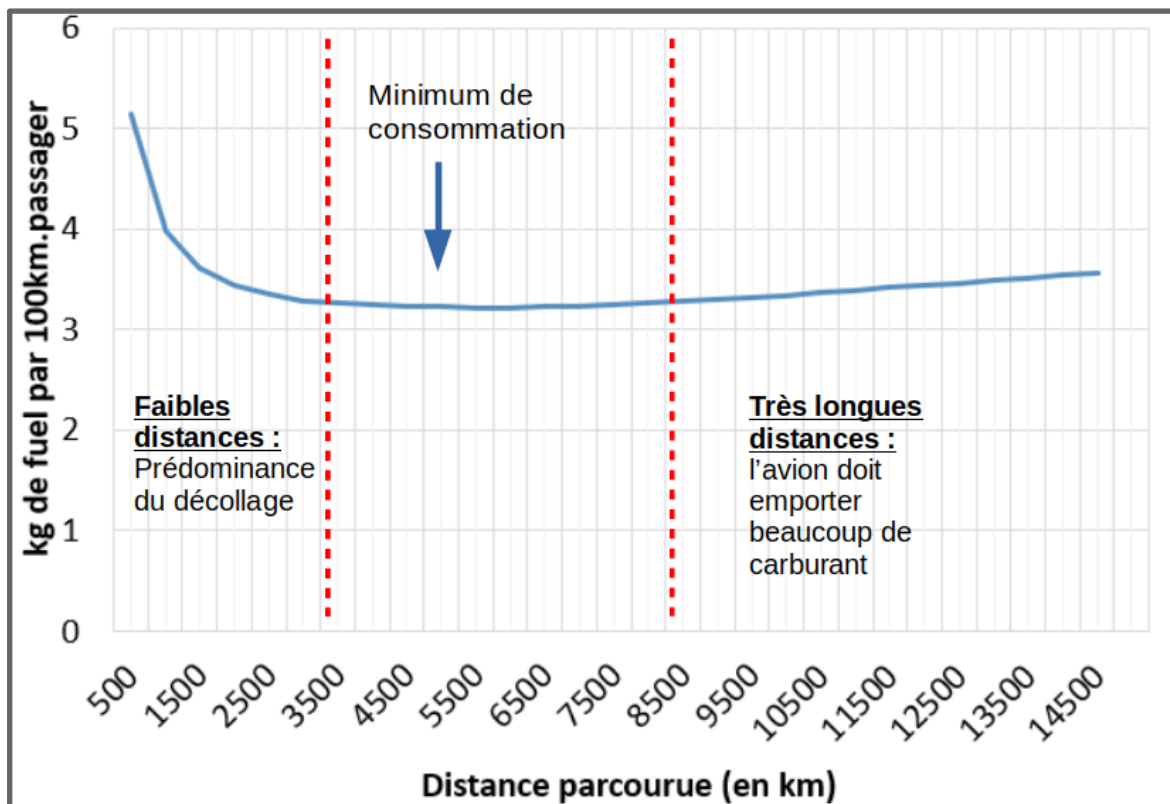


2) Optimisation de l'utilisation de l'appareil

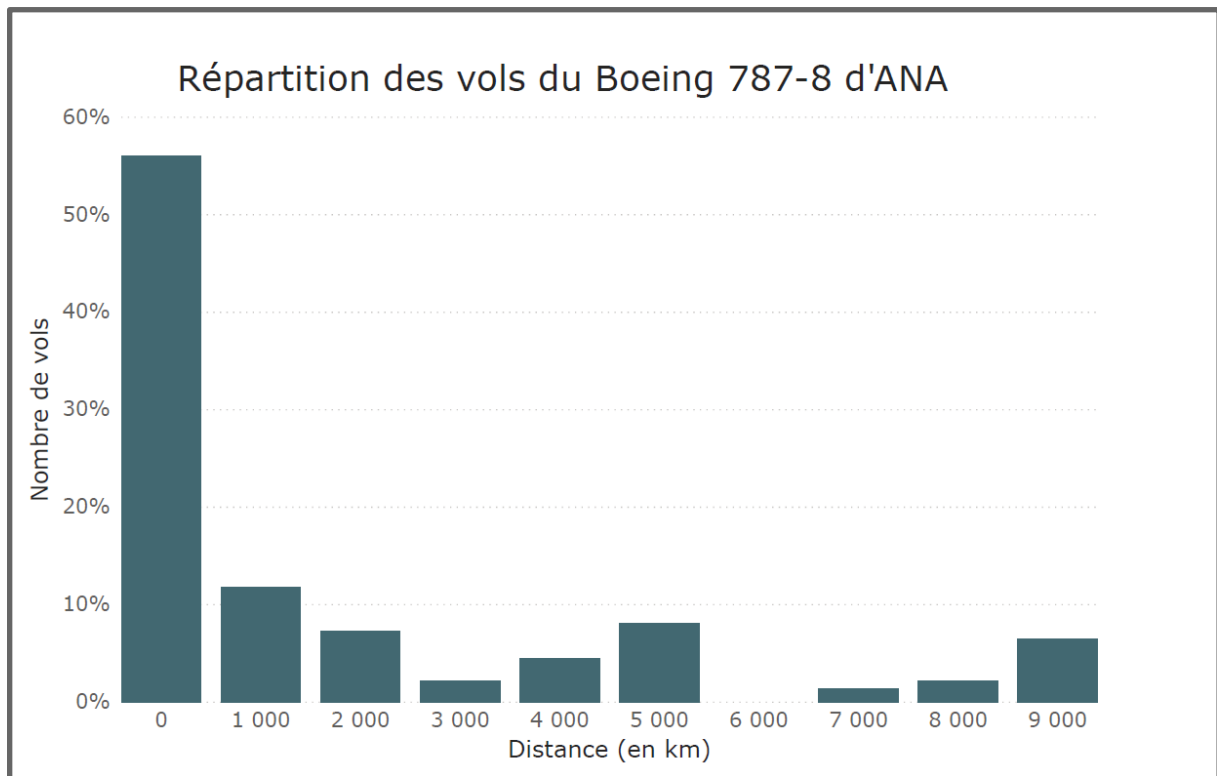
2-1) Distance d'utilisation

Naturellement, les A320 et B737 sont souvent utilisés pour parcourir de petites distances inférieures à 1000 km, mais l'usage d'un avion varie très fortement d'une compagnie à l'autre. Ceci pose problème car tout avion possède une distance de fonctionnement optimale propre à sa conception. Pour un avion donné, il existe un minimum de consommation au km (voir graphique de consommation ci-dessous). Lors d'un vol, les phases de décollage et de montée sont les plus consommatrices au km. Ainsi un vol de courte distance aura une forte consommation au km. Une fois l'altitude de croisière atteinte cette consommation diminue (baisse des frottements et vitesse stable). En augmentant la part de temps de croisière d'un vol on diminue dans une certaine mesure la consommation moyenne sur le vol. Cependant afin de parcourir de très longues distances il faut emporter du carburant supplémentaire uniquement pour porter le carburant nécessaire au trajet (Jardine, 2005). Ceci explique pourquoi le minimum de consommation moyenne a lieu pour une distance medium. Ci-dessous est présenté le graphe de consommation du Boeing 787-8 : un avion long-courrier que l'on étudiera plus en détail.

Consommation du B 787-7 en fonction de la distance parcourue



Cet avion est optimisé pour une distance proche de 4500 km. Voici cependant l'usage que la compagnie ANA en fait :



L'utilisation de cet avion n'est pas du tout optimisée au niveau de la consommation, la plupart des vols étant réalisée pour de courtes distances. Cependant une explication quant au choix de cet avion par ANA (All Nippon Airways), la première compagnie japonaise, serait sa forte capacité d'emport et donc la possibilité de transporter de nombreux passagers. Le nombre de vols au Japon ramené au nombre d'habitants est deux fois supérieur à celui de la France et cela pourrait s'expliquer par la géographie particulière du Japon. La forte demande expliquerait donc l'emploi d'avions à forte capacité même s'ils ne sont pas optimisés pour de courtes distances. Sur ses Boeing 787-8, ANA utilise trois types de cabine que l'on nommera HD-haute densité, MD-moyenne densité et BD-basse densité qui permettent l'emport de respectivement 169, 184 et 240 passagers au maximum. Ces capacités sont bien supérieures aux 146 passagers que peuvent emporter ses A320.

A quel point l'utilisation de Boeing 787-8 (que l'on notera B788) par ANA est-elle mal optimisée en terme d'émissions de CO₂ ?

L'objectif est alors d'évaluer ce que gagnerait la compagnie à remplacer le B788 par un avion de même capacité d'emport et de même consommation minimale C_{min} mais optimisée pour de courtes distances et non plus 4500 km.

On calcule les émissions provenant de tous les vols avec l'avion actuel puis celles de l'avion optimisé (dont on prendra la consommation égale à C_{min} pour toutes les distances).

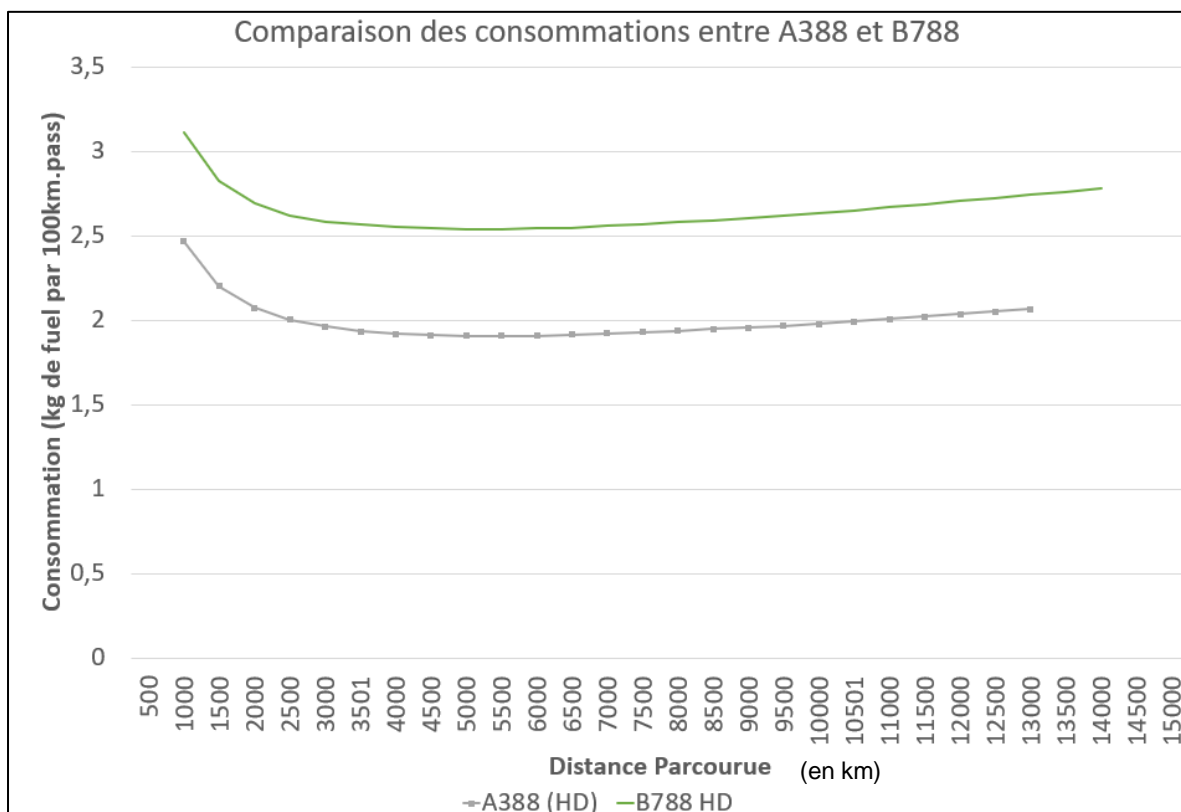
Pour cela, Piano-X fournit les consommations en fonction des configurations cabines des appareils. Avec des fonctions obtenues par régression polynomiale avec Python (voir annexe 2) on déduit les émissions de la compagnie ANA pour l'ensemble des vols effectués par ses B788.

Un gain de 10% pourrait être observé en utilisant l'avion optimisé sur l'ensemble des vols. Cependant l'existence d'un tel avion est impensable, il est impossible d'avoir une consommation C_{min} pour toutes les distances et de plus même pour un avion court-courrier sa consommation minimale est plus élevée à cause de la forte influence de la phase de décollage. Le chiffre des 10% n'est alors qu'un majorant des réductions d'émissions possibles. Afin de réaliser une estimation plus précise il faudrait plutôt considérer une courbe réelle de consommation d'un avion optimisé pour de courtes distances mais ces données n'étaient pas disponibles.

2-2) Remplissage de l'avion et nombre de passagers transportés

Plus un avion transporte de passagers plus celui-ci aura une consommation par passager faible. En effet le taux de remplissage de l'avion ainsi que la densité de la cabine (avec une proportion plus ou moins importante de places en première et business class) influent au premier ordre sur la consommation par passager.

En utilisant des avions plus gros (type A380 qui peut transporter jusqu'à 853 passagers en très haute densité) et avec les même taux de remplissage, les émissions par passager peuvent être réduites de près de 20% (voir annexe 2, p.39). En réduisant le nombre d'avions et en transportant donc le même nombre de passagers au total on peut alors diminuer les émissions de 20% pour les vols réalisés par le B788.



Cependant les hypothèses utilisées pour ce calcul sont très fortes, Il faut que la compagnie réduise le nombre de vols pour avoir le même taux de remplissage et diminue donc la fréquence des vols ce qui peut être critique d'un point de vue commercial (Charfeddine, 2004). De plus de nombreux aéroports ne peuvent pas accueillir d'A380 (seules

30% des routes principales du B788 sont compatibles avec un tel avion). Enfin les moyens nécessaires pour acquérir une telle flotte sont colossaux.

Les gains potentiels de par une meilleure utilisation de la flotte actuelle ainsi que par des investissements dans des appareils plus adaptés peuvent avoir de forts impacts sur les émissions des compagnies mais ne semblent pas suffisants. Les flottes des compagnies sont déjà globalement bien optimisées en terme de consommation et donc d'émissions (le kérosène étant un pilier de dépenses majeur pour une compagnie, environ 10% (Charfeddine, 2004)). Ce sera lors de futures acquisitions que les compagnies devront choisir au mieux leurs avions qui se devront d'être plus spécifiques et donc moins polyvalents. Ce point apporte néanmoins des problématiques en terme de coût de développement et d'entretien : les avionneurs (Airbus, Boeing,...) doivent alors développer de plus nombreux modèles. De plus ces avions seront logistiquement plus difficiles à entretenir, la visite d'Air France Industrie nous ayant prouvé la difficulté actuelle de maintenir les flottes avec un nombre limité d'appareil. Certaines compagnies pour prévenir ce problème et faciliter l'utilisation de leur flotte utilisent uniquement un modèle d'avion comme Ryanair par exemple (voir précédent graphique de répartition des flottes par compagnie).

3) Optimisation de l'appareil

Les futurs avions se devront d'être plus économes en carburant. Pour cela on peut utiliser des moteurs plus efficaces ou avoir un avion plus léger, ces deux caractéristiques sont cependant difficiles à concilier et l'amélioration de l'une se fait le plus souvent au détriment de l'autre. Le moteur Leap, nouveau-né de CFM international (GE-Safran) est plus lourd que son prédécesseur (CFM-56) mais compense par une grande amélioration de son efficacité. On évaluera ici l'influence de ces deux paramètres dans le but d'une diminution des émissions.

L'étude sur Piano-X de la consommation après réduction de la masse ou augmentation de l'efficacité des moteurs nous donne les résultats suivants :

- Diminution de la masse à vide de l'avion de 3% : diminution de 2% de la consommation en moyenne
- Amélioration de 3% de l'efficacité des moteurs à leur optimum de fonctionnement : diminution de 3% de la consommation moyenne

Ainsi, l'introduction de nouveaux alliages, étudiés dans les autres mini-projets, ayant de meilleures caractéristiques (plus légers et pouvant résister à de plus grandes températures) permet d'augmenter l'efficacité et de diminuer la masse des moteurs.

4) Conclusion

L'étude que nous avons menée cherchait à quantifier peu ou prou l'impact de l'optimisation d'une flotte sur la diminution des émissions de gaz à effet de serre. Nous avons fait varier deux facteurs, l'utilisation des avions au sein de la flotte et la conception des avions. Nous sommes parvenus en croisant les données fournies par Piano-X et FlightRadar à

majorer la diminution de consommation que l'on obtiendrait en modifiant l'utilisation d'une flotte dans son état actuel et en changeant ses avions par respectivement 10% et 20%. On peut ainsi espérer réduire au maximum de 30% les émissions de CO2 pour une compagnie comme ANA qui utilise ses avions très loin de leur optimum en consommation par passager. Cependant, ANA représente un cas isolé, globalement les avions sont utilisés dans leur zone d'optimum. Aussi, la réduction des émissions mondiale -en supposant le nombre de passager constant- sera très inférieur à 30% ce qui nous conduit à considérer les améliorations de l'avion en tant que tel.

Nous concluons de l'étude des modifications techniques apportées à l'avion qu'une diminution de la masse de l'avion ou un gain d'efficacité moteur de 3% conduisent respectivement à des gains de 2% et 3%. Or, l'exemple du moteur Leap dont la conception a duré 15 ans et coûté en ordre de grandeur 100 milliards de dollars (G. Aouizerate, 2015) offre un gain d'efficacité par rapport à son prédécesseur de l'ordre de 15% (G. Aouizerate, 2015). Ainsi, on comprend que l'enjeu de réduction des émissions du monde aéronautique est de taille et que si la marge de manoeuvre des industriels et professionnels est aussi réduite, c'est à nous d'agir en consommateurs.

Bibliographie

- Power BI : <https://powerbi.microsoft.com/fr-fr/>
- base de donnée flight-radar : fournie par SAE, non disponible librement
- Piano-X : <http://www.lissys.demon.co.uk/PianoX.html>
- Charfeddine, S. (2004). *Optimization of the supply of an airline in a fuzzy environment* (Thèses, Université Toulouse le Mirail - Toulouse II). Consulté à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00363337>
- Jardine, C. N. (2005). Calculating the environmental impact of aviation emissions. *Environmental Change Institute, Oxford University Centre for Environment*.
- Gilles Aouizerate (2015). *Utilisation rationnelle de l'énergie et environnement : Spécificités des moteurs aéronautiques nouvelle génération*, Consulté le 16/12/19 à l'adresse http://turbo-moteurs.cnam.fr/publications/pdf/conference2_2015.pdf
- Description détaillée flotte de B787-8 d'ANA
<https://fr.flightera.net/airline/All+Nippon+Airways/model/B788>

Le S12 permettrait de réduire la consommation des avions. Cet alliage a donc un potentiel de développement pour l'allègement des pièces de moteurs. Mais en amont de la conception, le choix des matériaux ne relève pas seulement de leurs caractéristiques techniques mais aussi de facteurs extérieurs concernant notamment leurs conditions d'extraction. C'est pourquoi le projet réalisé à SafranTech s'attelle à proposer des critères de notation pour différents matériaux selon des critères géopolitiques, économiques et environnementaux afin d'évaluer la pertinence ou non de leur utilisation.

IV. Elaboration de critères d'éco-conception de différents matériaux

Réalisé en collaboration avec SafranTech

Dans une démarche d'éco-conception de thermopropulseur, il est nécessaire d'avoir une vision globale de l'impact environnemental de l'aviation pour pouvoir déterminer des objectifs en terme de critères. Ces derniers sont nécessaires pour pouvoir répondre de façon optimale aux demandes du client. Il faut pouvoir allier la performance du matériau à son coût, mais également à son empreinte environnementale. Ces critères, d'un premier point de vue, sont purement techniques (résistance des matériaux, allègement du poids...). Mais pour une démarche complète, il est nécessaire d'élargir notre vision pour définir de nouveaux critères propres à l'éco-conception. C'est ce que nous avons essayé de faire dans le cadre d'un processus de choix des alliages pour le thermopropulseur.

De ce fait, de nombreuses problématiques ont vu le jour. Premièrement, le choix des critères bien entendu. Puis, de quelle manière classer nos alliages pour chaque critère, il s'agit ici de sous critères dépendant du critère global. Alors nous serons capable de pouvoir optimiser le choix de de l'alliage en fonction des nouveaux enjeux de l'aéronautique.

1) Critère économique

Du point de vue économique, le marché des métaux est assez complexe en fonction du nombre de fournisseurs et de la multitude des métaux sur le marché. Le critère est évidemment très important dans n'importe quelle démarche de conception. Choisir un alliage avec un coût trop élevé empêche Safran de pouvoir vendre le moteur à des prix compétitifs. Il convient donc de réfléchir à l'optimisation à la fois économiquement fiable et alliant d'autres critères d'éco-conception.

Métaux :

La première démarche a été de construire une base de données complète pour effectuer une étude rigoureuse. Ainsi, avec l'aide de nombreuses sources comme les fiches de criticité de mineralinfo (mineralinfo.fr, consulté le 25 Novembre) ou encore le cours des métaux sur le London Metal Exchange (lme.com, consultée le 25 Novembre), nous avons relevé les prix de 25 métaux différents. Ces métaux sont à la fois les plus classiques comme le Fer, l'Aluminium mais également des minerais apparaissant classiquement dans les alliages (Cobalt, Molybdène) et des métaux rares utilisés dans les super-alliages (Rhénium, Hafnium). Ceci définit le premier critère économique : le coût instantané du métal. De plus, lors de l'achat des matières premières pour la conception d'un alliage un point important pour

prévoir l'industrialisation à long terme de l'alliage est la stabilité du coût des métaux. Ainsi le deuxième critère économique défini est un résumé des fluctuations du coût du matériau prenant en compte l'écart-type du coût sur ma dernière année, la variation du coût sur un an et sur 10 ans.

Les critères étant définis, il convient désormais de construire un "classement" économique de chacun des métaux. Pour ce faire, nous avons choisi d'attribuer une note à la fois sur le coût du matériau et sur la fluctuation globale. Ci-dessous la définition de ces notes:

$$Note_{cout} = Log(coût) \times 0,85 \quad \text{sur } 4$$

Le logarithme permet de réduire la variation des prix car certains sont extrêmement élevés par rapport à d'autres.

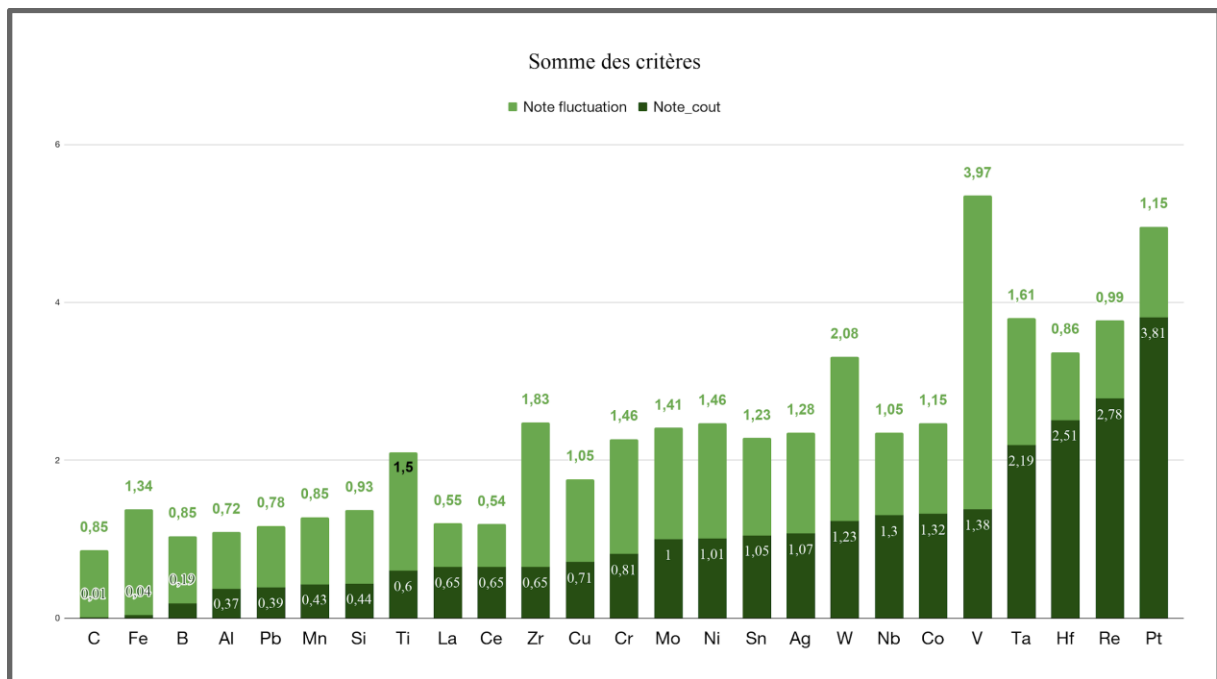
$$Note_{fluctuation} = Note_{\text{écart type}} + Note_{\text{variation 1 an}} + Note_{\text{variation 10 ans}} \quad \text{sur } 4$$

Pour $Note_{\text{écart type}}(\text{sur } 2) = \frac{\text{écart type}(\%)}{50} \times 2$, l'écart type étant en pourcentage nos valeurs sont comprises entre 0 et 20 environ d'où la division seulement par 50.

Pour $Note_{\text{variation 1 an}}(\text{sur } 1) = \frac{\text{Variation}(\%)}{100} + 0,5$, la variation pouvant être négative, nous répartissons les notes entre 0 et 0,5 pour une variation négative et entre 0,5 et 1 pour les variations positives.

Pour $Note_{\text{variation 10 ans}}(\text{sur } 1) = \frac{\text{Variation}(\%)}{200} + 0,5$, on tient le même raisonnement mais des variations plus élevés d'où la division par 200.

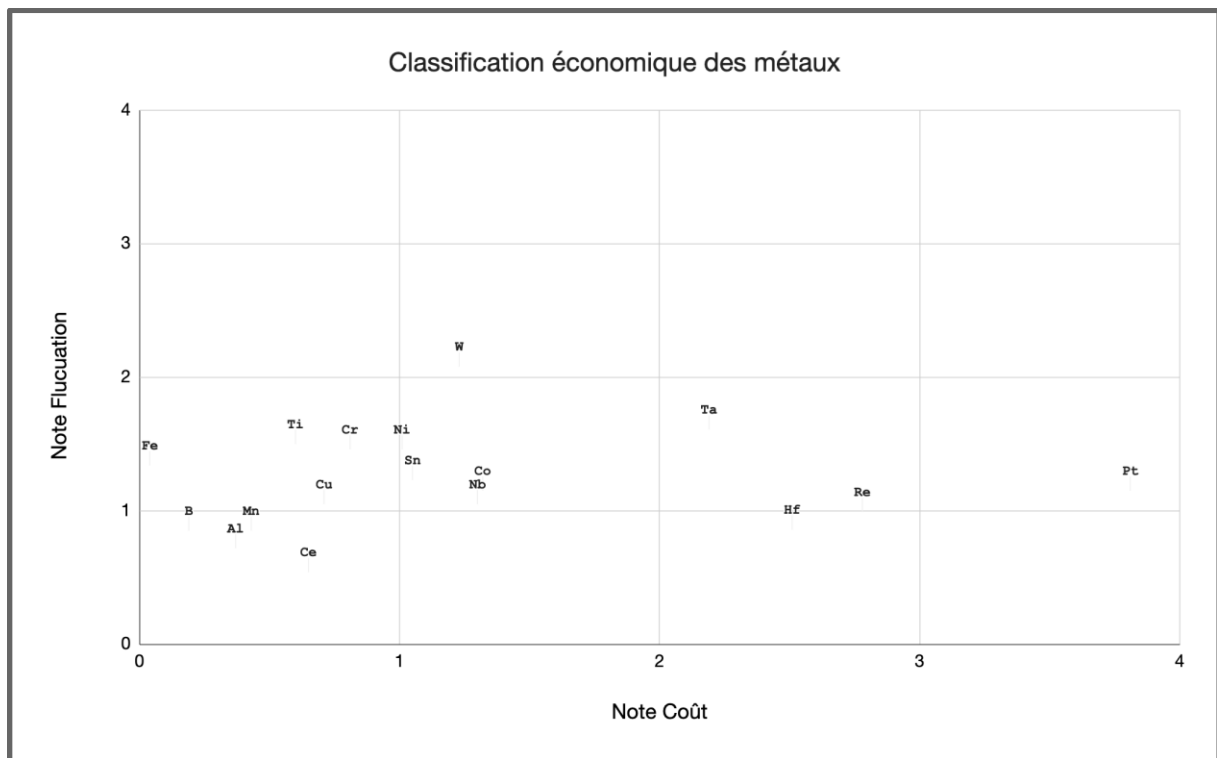
Nous obtenons ainsi deux notes pour chaque métal. Ci-dessous l'histogramme de ces notes:



Nous voyons ici en vert foncé l'évolution des notes sur le prix, et en vert clair les notes sur la fluctuation. Finalement, plus la somme des deux notes, donc, la hauteur du bâton est

haute, plus le matériau est critique. Cela fournit donc un classement de criticité économique des matériaux.

De plus nous nous sommes appuyés sur le modèle des graphes de criticité pour faire un graphe de criticité "économique" ci-dessous :



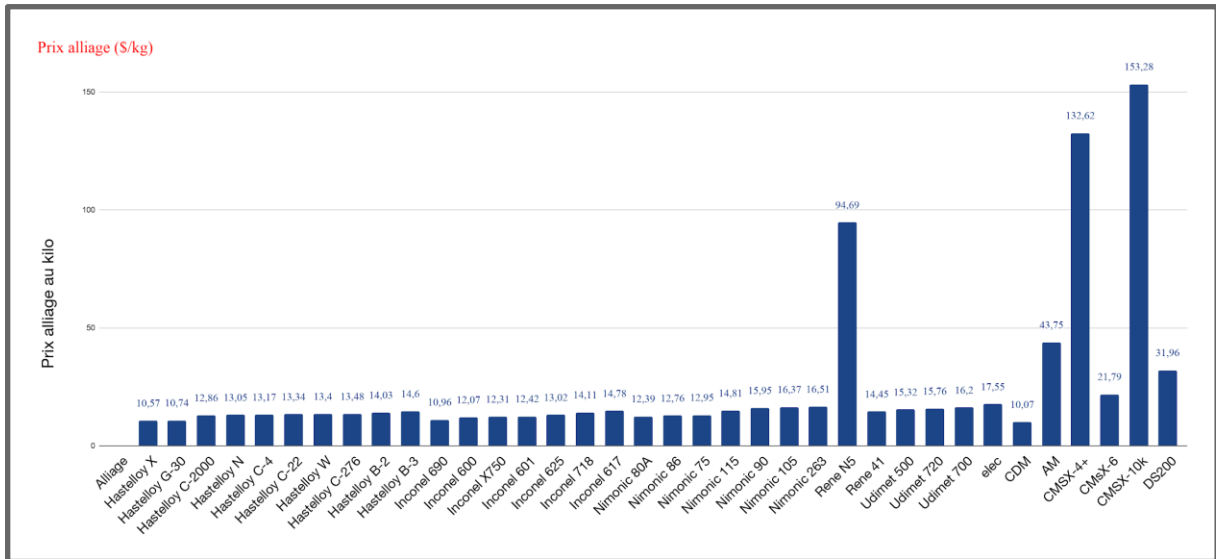
Ainsi plus le matériau est proche de l'origine, plus il est intéressant économiquement.

A travers ces deux graphes, nous sommes maintenant capables de comprendre quels métaux seront intéressants économiquement et lesquels seraient éventuellement critiques.

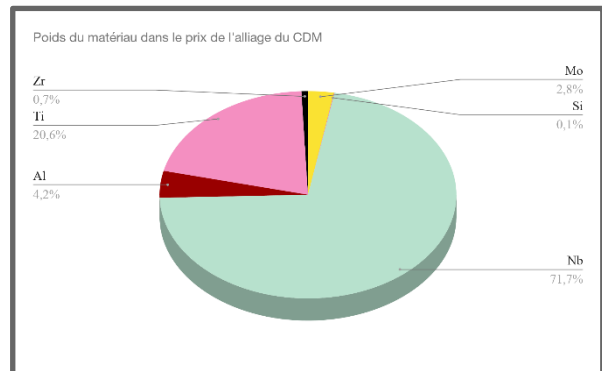
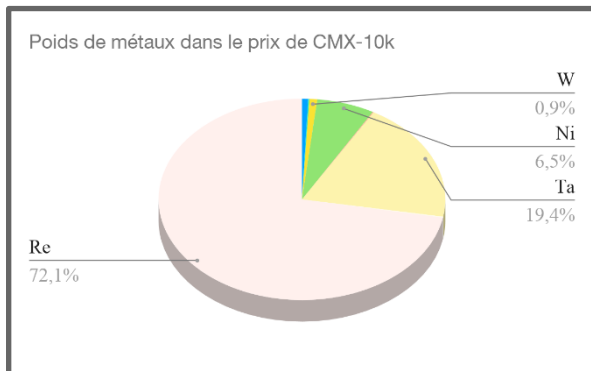
Mais dans le cas de l'aviation l'utilisation de métaux brutes dans le thermopropulseur est quasi-nulle. L'étude doit alors s'étendre sur les alliages.

Alliages :

Pour ce faire, nous avons répertorié pour 36 alliages différents et en relevant leur composition en fonction de tous les métaux relevés précédemment. Par rapport à ces pourcentages nous pouvons calculer le prix moyen, la note du coût et la note de la fluctuation de l'alliage en pondérant par chacun des métaux de la composition. Ainsi nous pouvons tracer les mêmes graphes que nous avons tracés précédemment pour les métaux. Une chose à noter est que les notes sur les fluctuations sont quasi identiques pour tous les alliages car ceux-ci ne comportent pas ou très peu de métaux à forte criticité en terme de fluctuation. Nous n'allons donc pas travailler sur ce critère pour les alliages. Voici les résultats sur le prix ci-dessous :



Les alliages dont le prix explose comme Rene N5, CMsX-4+ et CMsX-10k comporte des métaux très chers comme du Hafnium ou du Rhénium. On peut voir ci-dessous le poids de chaque métal sur le prix de CMSX-10k et en comparaison l'alliage du centre des matériaux:



On voit bien que la criticité économique est très dépendante de la présence ou non de certains métaux. Dans le cas du CMSX-10k c'est le Rhénium qui fait exploser le prix et pour l'alliage du Centre Des Matériaux il s'agit du Niobium. Cela dégage des axes de développements pour baisser le prix de ces alliages, il faudrait pouvoir remplacer ces deux métaux par d'autres aussi performants mais moins chers.

De plus, le prix des alliages classiques sont dans la même gamme, mais de petits écarts pour 1 kg se traduiront par des écarts bien plus importants à l'échelle industrielle. Ce classement est donc très important lors de la conception. Reste désormais à comparer avec les autres critères que nous avons définis pour choisir un compromis entre les différents alliages.

2) Critère socio-écologique

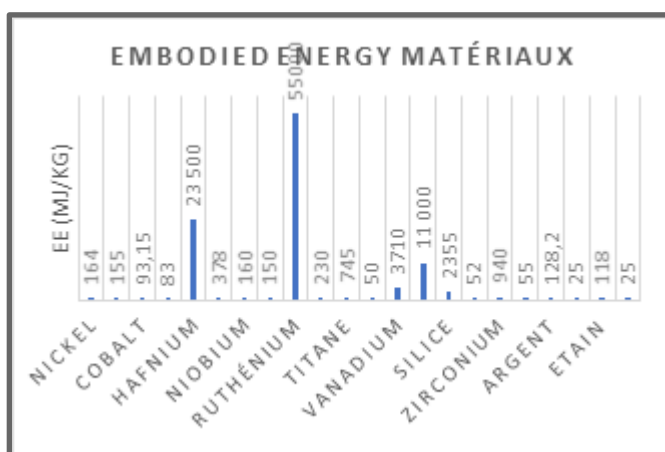
Méthodes de conception

Nous avons recherché des critères pertinents pour pouvoir classer les matériaux en fonction de leur impact écologique et éthique. Pour cela nous avons relevé 3 critères. L'énergie grise ou *Embodied Energy (EE)* qui correspond à l'énergie associée à la production d'un matériau. Cela prend en compte l'extraction et la mise en forme des matériaux (passage du minerai au métal), le transport et la distribution, et la maintenance et le recyclage. Nous avons d'abord fait cela pour les matériaux bruts puis pour les alliages. Nous avons décidé de négliger la partie de refonte et mélange des métaux pour l'alliage en coût énergétique. Ainsi l'EE d'un alliage correspond aux EE des métaux pondérées par la proportion du métal dans l'alliage. Pour déterminer l'EE des métaux, nous nous sommes servis de « *Inventory of Carbon & Energy* » (Hammond, Geoffrey, 2011) de l'Université de Bath qui recense les EE de différents matériaux. Le coût est calculé pour le Royaume-Uni mais on peut assumer que ce coût énergétique est semblable à celui en France, nous utiliserons donc ces chiffres. Certains métaux n'apparaissent pas dans ce document, nous avons dû faire des approximations sur le calcul des EE en rapprochant les techniques d'extraction et de fabrication de ces métaux avec celles d'autres métaux dont on connaissait l'EE. Par exemple, le Niobium et le Ruthénium ont des notes proches car leurs techniques de production sont similaires ; le Ruthénium a une note 5 fois plus élevée que le Platine car pour 5g de Platine trouvé, on n'a qu'1g de Ruthénium. Ce critère nous permet d'avoir une idée précise de l'impact environnemental de la production d'un métal

Le second critère est la recyclabilité du matériau. Pour cela, nous avons utilisé les fiches de criticité du site MinerallInfo qui donnaient explicitement la recyclabilité de différents matériaux.

Le 3^e critère est le travail des enfants qui prend en compte l'origine des matériaux grâce à MinerallInfo ainsi que la part d'enfant travaillant entre 2009 et 2015 en pourcentage selon l'UNICEF dans chaque pays d'origine des matériaux.

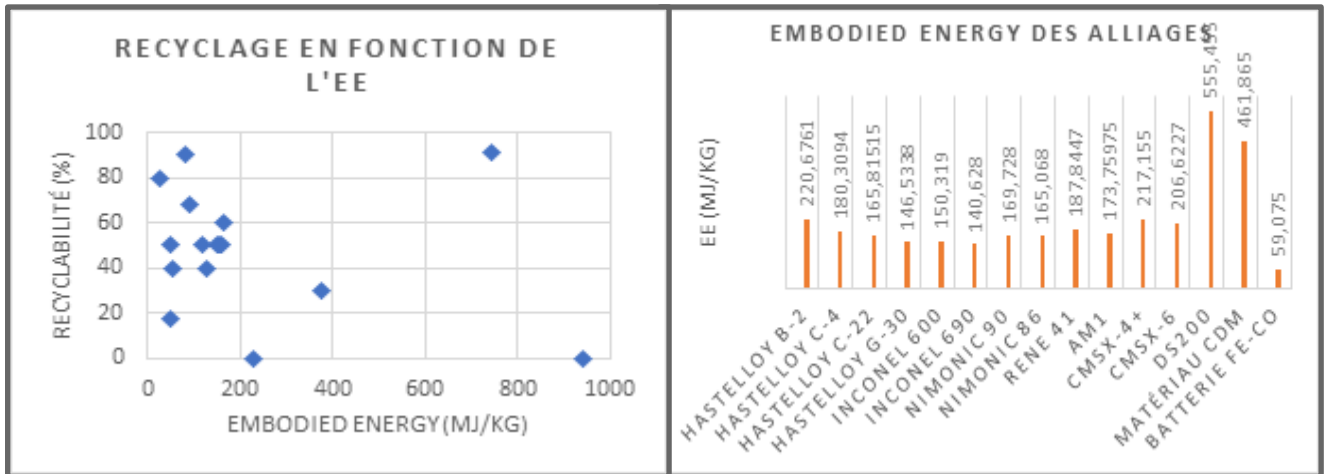
Résultats



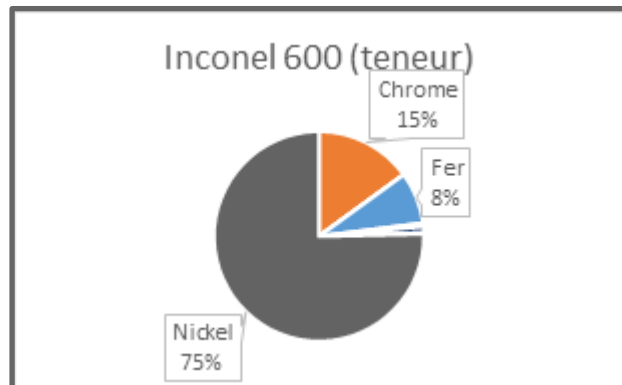
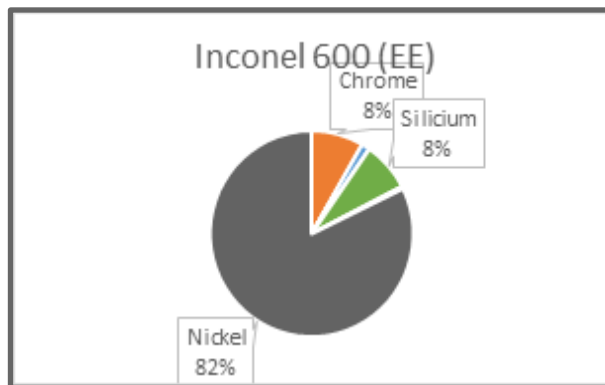
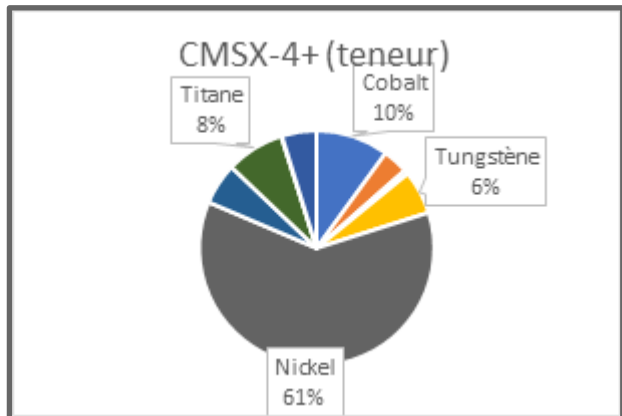
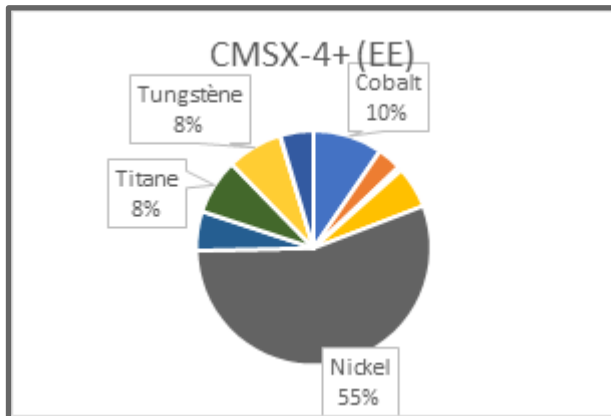
Après avoir terminé la base de données, on obtient différents résultats.

On remarque que ce sont surtout les terres rares (Hafnium, Ruthénium) ainsi que le Platine qui coûtent chères énergétiquement car il faut extraire beaucoup de roche pour en trouver. Les autres matériaux avec des EE élevées sont des matériaux qui nécessitent des traitements chimiques du minerai avec des produits peu réutilisables et très polluants. On remarque ici qu'il n'y a aucune corrélation entre l'EE et la recyclabilité. Autrement dit, le gain d'énergie

pour le recyclage d'un matériau (comparé à son extraction) compense le coût énergétique du recyclage. On a maintenant une idée pour les métaux, on peut alors appliquer notre critère aux alliages.

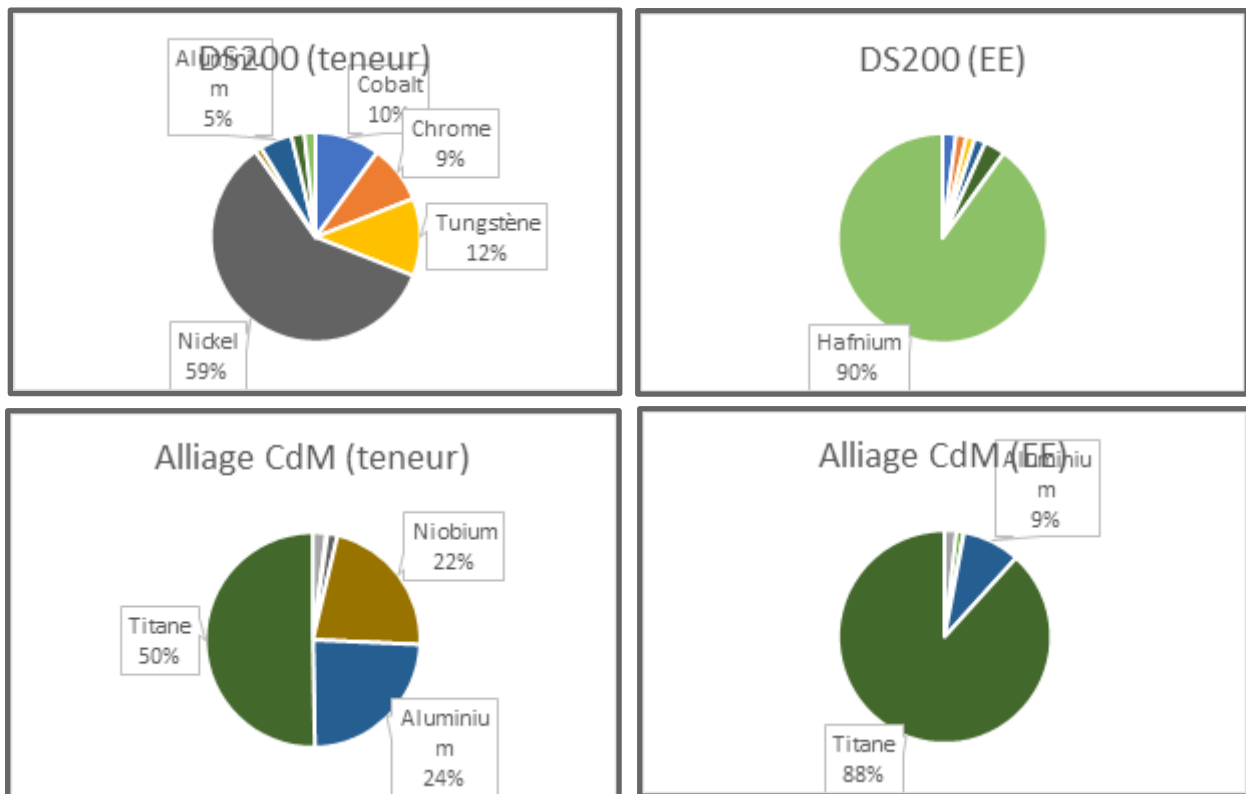


On remarque que les matériaux ont des EE similaires car ce sont tous des bases nickel avec une teneur en nickel proche. Seul deux alliages se démarquent, le DS200 et le base Titane étudié au centre des matériaux.



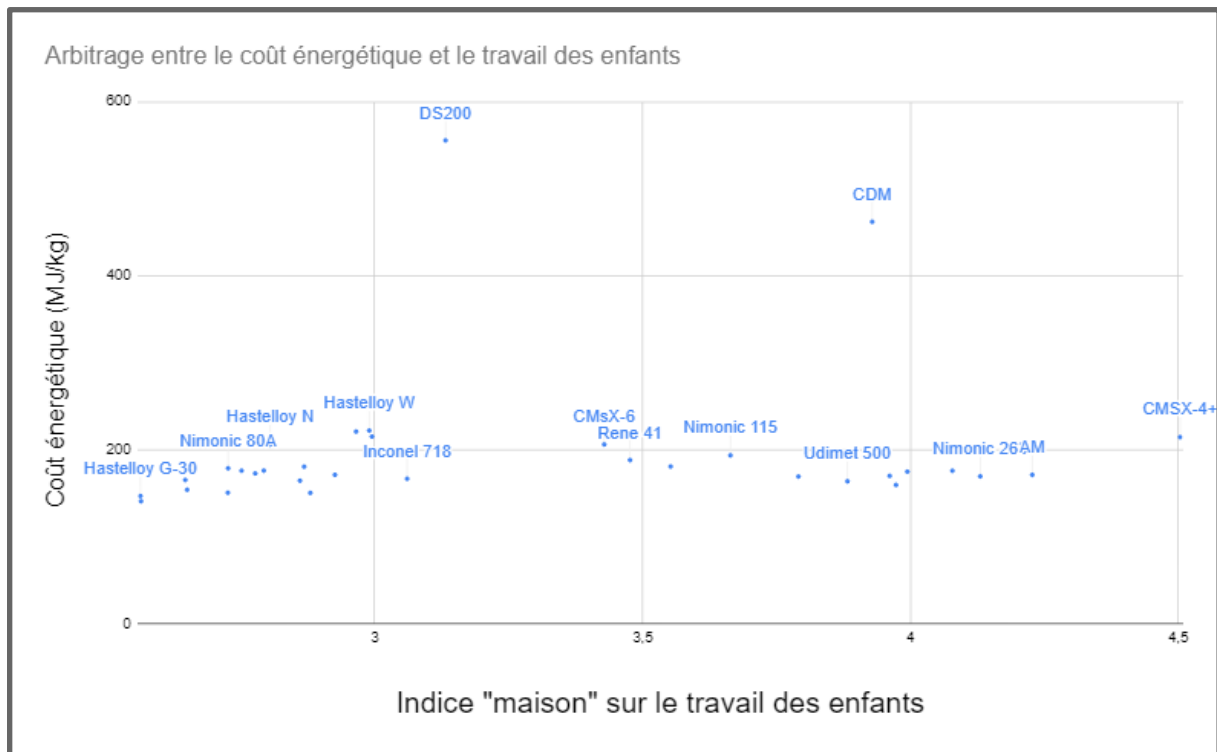
On peut alors s'intéresser au coût de chaque métal dans l'alliage. Pour cela nous allons en prendre 4 (Inconel 600, DS200, CMSX-4+, et le base Titane du CdM) qui sont les 4 alliages stratégiques de Safran actuellement.

Le CMSX-4+ et L'Inconel 600 ont des EE dans la moyenne. On remarque que la part du nickel est sensiblement identique en teneur et en EE. Pour l'Inconel 600, on voit que l'impact énergétique du silicium est important par rapport à sa teneur (>1%). On peut alors s'intéresser aux deux matériaux plus gourmands énergétiquement.



On voit ici que certains matériaux sont très coûteux énergétiquement : l'Hafnium (2% de teneur pour 90% de l'EE) et le Titane (50% de teneur pour 88% de l'EE). On peut alors avec l'étude d'une base de données d'alliages identifier les métaux critiques et définir une teneur limite pour garder un alliage écologiquement viable.

Pour ce qui est du caractère éthique, on peut le placer en parallèle avec son Embodied Energy pour montrer quels alliages sont respectueux de l'humain d'aujourd'hui (éthique) et de l'humain de demain (EE).



Discussions et limites

Ce qu'on peut remarquer avec le critère socio-écologique, c'est qu'en terme de cycle de vie (sans l'utilisation), certains matériaux ne sont pas très économes. On peut donc sur cette base-là essayer de limiter leur utilisation dans les alliages pour essayer de limiter l'impact des nouvelles pièces. Cependant il faut également nuancer ce critère avec toute la vie de l'avion. L'usage d'alliages tels que le DS200 peut peut-être s'avérer plus économe sur la vie de l'avion avec un gain de masse et/ou de performances du moteur qui permet de compenser le coût énergétique de mise en service par des économies de carburant. Nous n'avons pas pu pousser notre réflexion jusque-là par manque de temps. On peut également discuter la précision de notre méthode, en effet les chiffres de l'énergie grise pourraient être précisés en détaillant avec des calculs les coûts réels d'extraction et de production, notre première approche n'a pas pu nous permettre de reprendre cela.

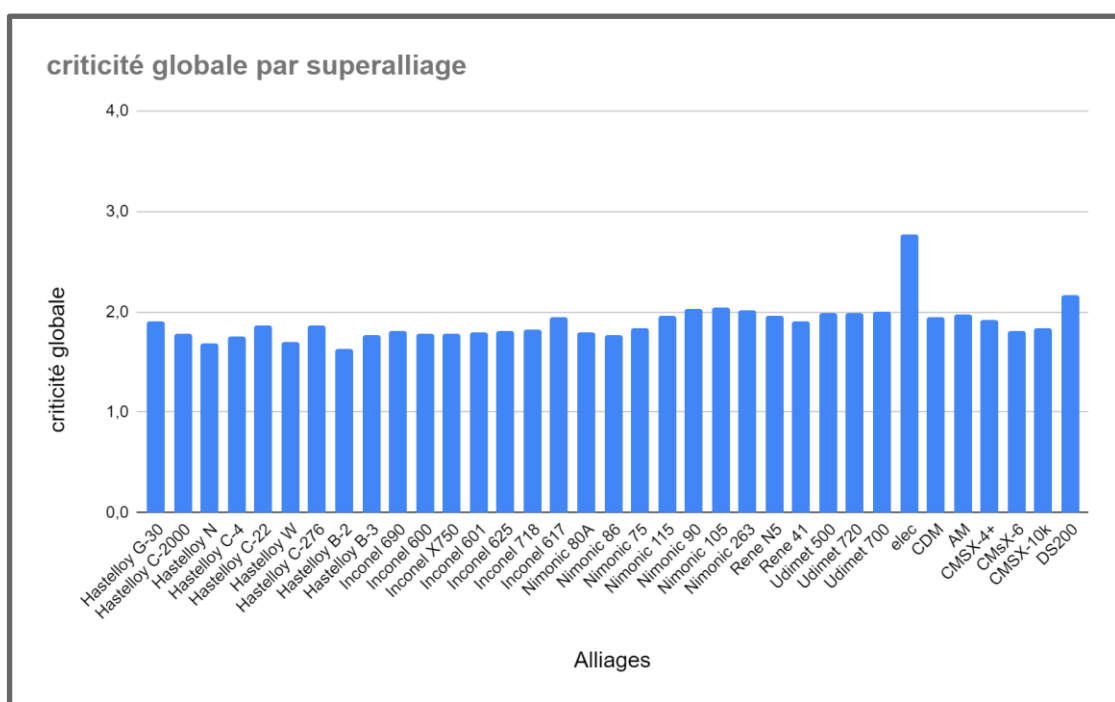
En ce qui concerne le caractère éthique, il faut bien comprendre que le parti pris de ne prendre en compte que le chiffre sur le travail des enfants est très critiquable en terme de représentativité pour les conditions de travail en général dans les mines. Il ne rend pas compte de la diversité des situations au sein des pays et au niveau des différents métiers des mines.

3) Critère géopolitique :

La France ne possédant et n'exploitant que peu d'éléments parmi ceux nécessaires à la production de superalliage, Safran se voit dans l'obligation de se confronter au marché international. Ce dernier peut être instable pour certains produits. Le but de cette partie est de définir et de donner des critères sur la possibilité de se procurer des matériaux primaires facilement.

La première étape a été de trouver des données à propos des différents éléments et de les assembler dans un tableur. Pour ce faire, nous nous sommes fortement appuyés sur les fiches de criticité du COMES (Comité pour les Métaux Stratégiques) en collaboration avec le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), ainsi que du rapport de la

commission européenne de 2017 sur les métaux critiques (commission européenne, 2017). La seconde étape du travail a été de prendre les données les plus pertinentes et de réfléchir à des critères. Nous avons décidé d'un commun accord de normaliser tous les critères sur 4. Une fois que les critères et les notes de chaque élément ont été établis, il a fallu transférer ces notes aux alliages. La première idée a été de pondérer par la composition les critères des différents éléments. Il s'est alors posé le problème de manque de données, ou le cas d'un métal important dans le superalliage, mais non critique, ce qui fausse entièrement le critère : en effet, un superalliage peut être critique à cause seulement d'un élément, même si celui-ci n'est présent qu'en très faible quantité ; la méthode précédente ne permet pas de voir cet alliage comme étant critique. Notre deuxième approche a donc été de ne pas prendre en compte, dans ces cas, l'élément de base indispensable au superalliage ; le nickel, pour ne considérer seulement la criticité des éléments sur lesquels on peut jouer pour modifier la composition et les propriétés, puis de pondérer par la composition en ces éléments pour obtenir une note.

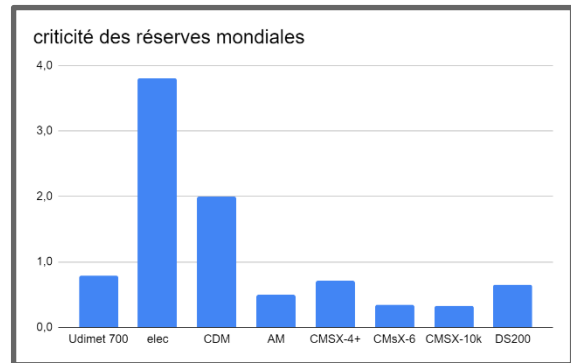


Le résultat obtenu montre que la criticité géopolitique globale des alliages varie peu selon les alliages. Il faut regarder dans le détail les six critères qui ont permis d'obtenir ce résultat pour voir dans quel domaine un alliage est plus critique. Cela permet alors de faire un choix selon le type de fiabilité sur l'approvisionnement que l'on cherche (grandes réserves, pays producteurs en bonne entente économique, etc). Pour plus de clarté nous ne traiterons que 8 superalliages, dont l'alliage "CDM" étudié par le Centre des Matériaux des Mines, l'alliage "elec" utilisé pour les batteries fer-cobalt et l'Udimet 700 qui est représentatif des criticités de tous les superalliages Hastelloy, Inconel, Nicomic, Rene et Udimet. Nous avons de plus pallié au manque de données par analogie et comparaison aux autres données fournies.

Criticité des réserves

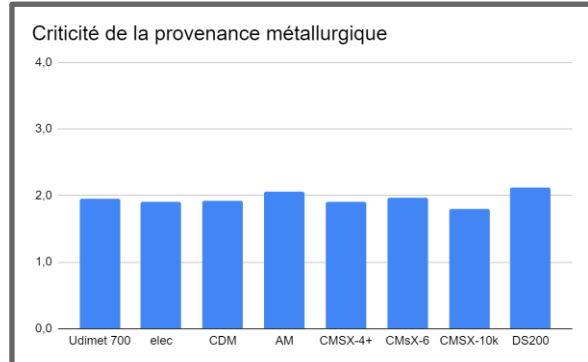
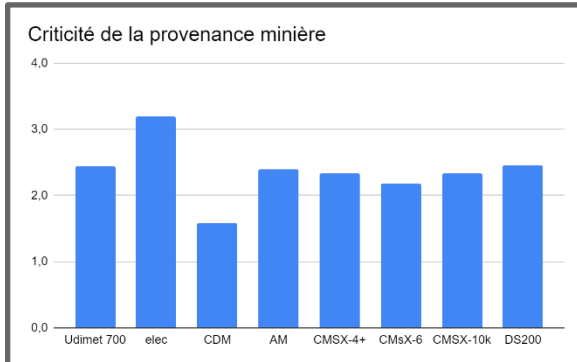
La criticité des réserves est calculée en fonction du nombre d'années restantes de possibilité d'extraction estimé avec le TCAM (taux de croissance annuel moyen) actuel (BRGM, 2017). La criticité est ensuite ramenée entre 0 et 4 de la manière suivante :

$$c = \frac{19,4}{\sqrt{\text{années de réserves}}}$$



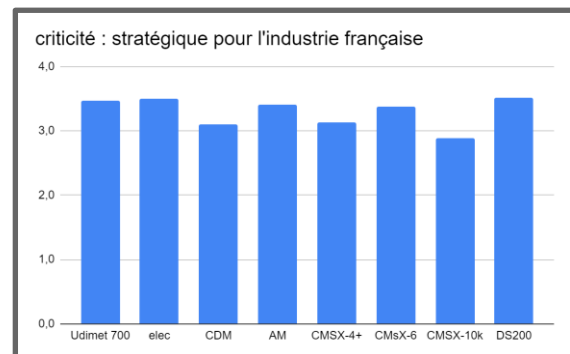
Criticité de la provenance minière et de la provenance métallurgique

Ces deux criticités permettent de voir en détail d'où vient la criticité sur l'approvisionnement, en différenciant le lieu d'extraction du minerai et le lieu de sa transformation qui sont souvent différent (on notera qu'une grande partie des métaux extraits en Afrique sont ensuite transformés en Chine). Une criticité a été attribuée à chaque pays en ramenant l'IMG (indicateurs Mondiaux de la Gouvernance) du pays entre 0 et 4. Cet indice est basé sur six indicateurs, fournissant une estimation du contrôle de la corruption, de l'efficacité du gouvernement, de la stabilité politique et de l'absence de violence/ terrorisme, de la qualité de la régulation, de l'État de droit, de l'écoute des pouvoirs publics et de la responsabilité.



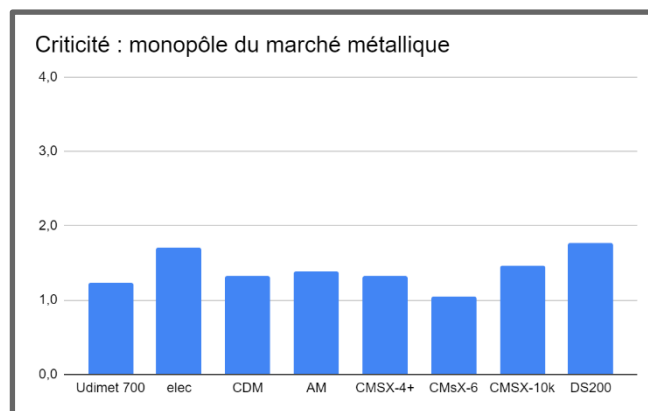
Criticité pour l'industrie française

Ce critère a été établi par le BRGM et quantifie l'importance stratégique d'un métal pour l'industrie française qui pourrait mettre en concurrence des domaines de l'industrie (notamment avec le militaire) et créer des tensions autour de l'approvisionnement d'un métal (BRGM, 2017).



Criticité de monopole de marché

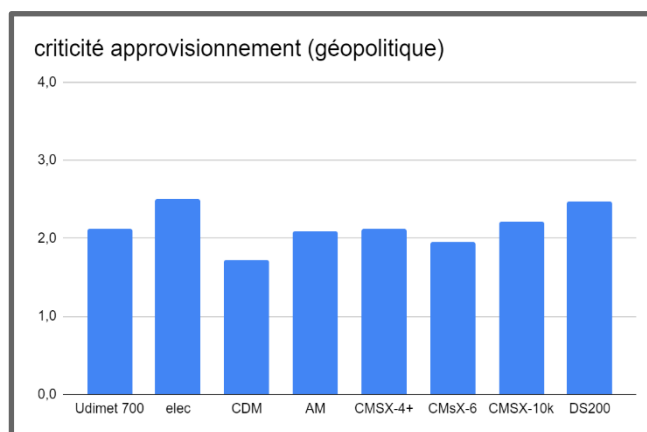
Ce critère indique si un alliage est en position de monopole de marché, ce qui donne une information sur la fiabilité de l'approvisionnement, en cas d'arrêt de l'exportation d'un métal en provenance d'un pays. Nous avons utilisé l'IHH (Indice de Herfindahl-Hirschmann) des métaux, qui mesure la concentration du marché d'un métal (BRGM, 2017).



Criticité de l'approvisionnement (directement importé)

Ce critère, comme ceux que nous avons essayé de développer, traduit la non fiabilité des pays exportateurs des métaux de l'alliage. Il a été établi sur les métaux

par le BRGM et est utilisé ici pour calculer la criticité des alliages. Ce critère est géopolitique et traduit notamment la stabilité économique et politique du pays producteur et exportation.



On remarque que les notes relatives des alliages par rapport aux autres varient d'un critère à l'autre. Il convient ainsi de faire des compromis, en ciblant les critères jugés prépondérants. Par rapport au projet global, on remarque que les notes de l'alliage étudié au centre des matériaux présente de bonnes notes.

Il faut enfin nuancer la pertinence de ces critères : certaines données manquantes ont dû être approximées et nous n'avons pas pu prendre en compte de nombreuses choses, par exemple l'évolution des lois par rapport à l'exploitation. Ces graphiques sont donc naturellement appelés à évoluer dans les années à venir.

La mise en place des trois grands critères (coût, socio-écologique et géopolitique), permet dès lors d'être au courant de la viabilité et de l'impact global d'un superalliage. Le choix des prochains superalliages utilisés pourra être fait en s'appuyant sur ces critères, en donnant une importance plus ou moins grande à chacun des critères. C'est pour cette raison que nous n'avons pas établi de critère global englobant le tout, pour laisser la liberté de se fier à un critère plutôt qu'un autre selon les priorités établies : performance économique, pérennité du marché, ou encore protection de l'environnement et des travailleurs.

Bibliographie

- Hammond, Geoffrey, et al. *Embodied Carbon: The Inventory of Carbon and Energy (ICE)*. BSRIA, 2011.
- *Fiches de criticité du BRGM | Minéralinfo*. <http://www.mineralinfo.fr/page/fiches-criticite>
- *Métaux critiques pour l'Europe - mise à jour 2017 | Minéralinfo*. <http://www.mineralinfo.fr/actualites/metaux-critiques-leurope-mise-jour-2017>
- *London Metal Exchange: Metals*. <https://www.lme.com/Metals>. Consulté le 25 novembre 2019.

V. Conclusion générale

Ces trois mini-projets nous ont permis d'avoir une vue globale sur le cycle de vie de l'alliage S12 et de son impact environnemental. Tout d'abord, les matériaux utilisés permettent à cet alliage d'avoir une densité deux fois moindre que les alliages base nickel actuellement utilisés pour concevoir les pièces chaudes des moteurs. Cet allègement pourrait diminuer de 25% la masse totale des moteurs et donc réduire d'environ 0,3% la consommation des aéronefs long-courriers actuels (à comparer à la réduction des émissions de 15% permise par le nouveau moteur LEAP, SAE 2017). Néanmoins, le processus industriel pour réduire la taille des grains n'est pas encore élaboré (objet de la thèse de R. MALLICK) ainsi cet alliage n'a pas encore les caractéristiques thermo-mécaniques nécessaires aux pièces situées en sortie de la chambre de combustion. En outre, nous avons vu que les conditions d'extractions des matériaux composant cet alliage sont médiocres d'un point de vue environnemental, économique et stratégique. A ce jour, bien qu'il permette une réduction des émissions de CO₂, cet alliage nous semble peu pertinent pour la conception des moteurs. Il représente tout de même une voie de recherche prometteuse qu'il ne faut pas négliger. Afin d'atteindre les objectifs ambitieux fixés par l'ATAG, d'autres pistes sont à explorer comme une rupture technologique (moteur décarrainé, nouvelle géométrie d'avions, ...), l'amélioration de la gestion du trafic aérien, l'utilisation d'un moteur électrique pour le déplacement sur le tarmac ou l'optimisation des flottes en assignant aux avions les routes sur lesquelles ils sont les plus performants.

VI. Annexes

1) Annexe Partie II

Annexe 1 : Outils mis à disposition pour l'étude



Figure : 11 Microscope électronique à balayage



Figure 12 : Machine de compression à chaud

Le Centre des Matériaux a mis à notre disposition de nombreux outils. La machine de compression à chaud permet de réaliser des essais de compression (figure 12), des machines d'usinage telles que des tronçonneuses et des polisseuses permettent de révéler la microstructure du matériau, en complétant avec un traitement chimique à l'acide. L'étude de la recristallisation peut se faire en utilisant des fours à pression ambiante à 1050°C. Pour observer la microstructure, différents appareils peuvent être utilisés: le microscope optique permet de voir avec précision les grains et le microscope électronique à balayage (MEB) équipé d'une caméra EBSD (Figure 11) permet de déterminer l'orientation des grains dans l'espace. Le logiciel ImageJ permet d'analyser les images obtenues pour en tirer notamment la taille de grains. En complément, le logiciel de simulation Z-set rend possible, grâce à la méthode des éléments finis mais pour des temps de calcul variables, la détermination des grandeurs mécaniques du matériau en s'approchant au plus de l'expérience et la prédiction du comportement de celui-ci sur une grande gamme de sollicitations.

L'EBS (Electron BackScatter Diffraction) est une méthode d'observation pour le microscope électronique. Il permet de donner l'orientation de la maille d'un réseau cristallin grâce à la figure de diffraction des électrons. La figure est analysée par un algorithme qui donne une image de l'orientation des grains dans la surface étudiée. On peut obtenir l'orientation complète des grains en analysant selon plusieurs axes. L'orientation des grains informe sur l'état du matériau (taille des grains, caractère recristallisé ou non), ce qui détermine une très grande partie des propriétés mécaniques de la pièce, d'où l'importance de cette information pour Robin Mallick.

Annexe 2 : Taille des grains et pourcentage de recristallisation par analyse d'image

On cherche à déterminer le pourcentage de recristallisation et la taille moyenne en hauteur et largeur des grains par analyse d'image.

Pour pouvoir analyser l'image, il faut d'abord la convertir en noir et blanc et régler les seuils de façon à mettre en valeur les joints de grains. On évalue ensuite le pourcentage de recristallisation en mesurant l'aire des grains recristallisés (ces grains sont moins étirés et de taille plus faible que autres grains). On mesure également la taille moyenne des grains en utilisant la méthode des intercepts.

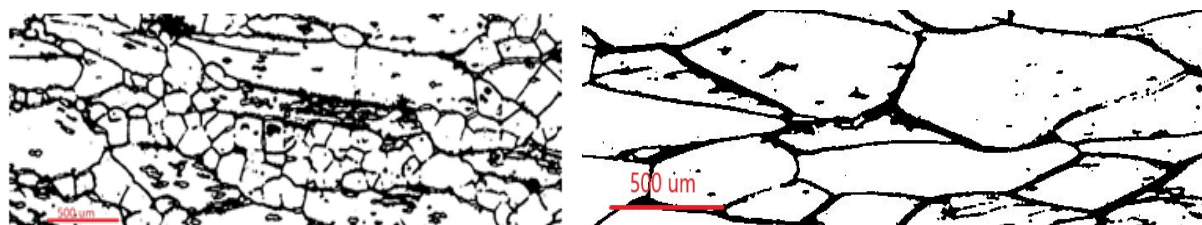


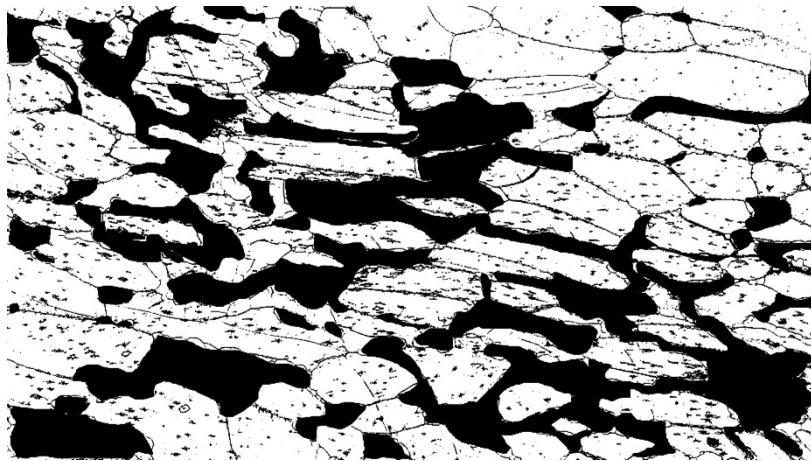
Figure 13 : Traitement des images obtenues par microscope optique : échantillon recuit (à gauche) et non recuit (à droite)

Voici les résultats des mesures par analyse d'images :

Echantillon recuit : hauteur des grains			Echantillon recuit : largeur des grains		
Longueur ligne (µm)	Nombre de grains interceptés	Taille moyenne des grains interceptés (µm)	Longueur ligne (µm)	Nombre de grains interceptés	Taille moyenne des grains interceptés (µm)
4115	24	171,5	9700	25	388
4285	24	178,5	9745	18	541,4
4500	26	173,1	9723	19	511,7
4298	24	179,1	9829	32	307,2
4320	23	187,8	9798	19	515,7
3935	27	146	8845	29	305
4200	21	200	9750	41	238,1
MOYENNE		176,6	MOYENNE		401
Ecart type		16,6	EC		122,4

Tableau 1 : Mesures de hauteur et largeur moyenne des grains

L'écart-type de la mesure de la largeur est très élevé. En effet, la hauteur de mesure a une grande influence sur le nombre de grains interceptés.



Fraction recristallisée de l'aire	
39%	
29%	
26%	
35%	
Moyenne	32%
Ecart type	6%

Figure 14 : Analyse de l'image optique avec ImageJ, calcul de la fraction de recristallisation

Le pourcentage de grains recristallisés est encore faible pour garantir de bonnes propriétés mécaniques, mais en réitérant l'opération on pourrait obtenir 90% de recristallisation.

Echantillon non recuit : hauteur des grains			Echantillon non recuit : largeur des grains		
Longueur ligne (µm)	Nombre de grains interceptés	Taille moyenne des grains interceptés (µm)	Longueur ligne (µm)	Nombre de grains interceptés	Taille moyenne des grains interceptés (µm)
5000	20	248	11000	23	480
4789	18	266	10800	22	490
MOYENNE		257	MOYENNE		485
Ecart type		12,7	EC		14,1

Tableau 2 Taille des grains de l'échantillon non recuit

La taille moyenne des grains de l'échantillon non recuit est en moyenne plus élevée.

Pour s'assurer que l'on observe bien des grains recristallisés, et non des sous-grains, on observe l'échantillon avec un Microscope Électronique à Balayage (MEB) et on utilise aussi la diffraction d'électrons rétrodiffusés (ou EBSD).

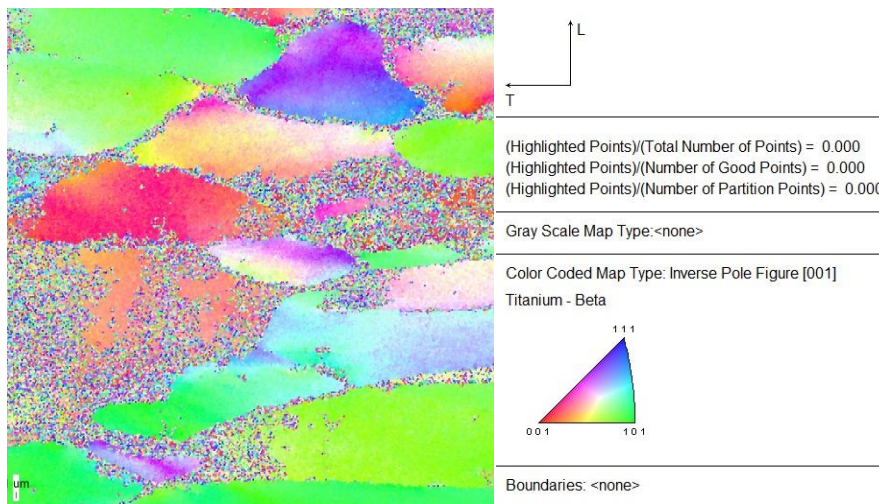


Figure : 15 Orientation moyenne de chaque grain selon un axe orthogonal à la compression (échantillon non recuit)

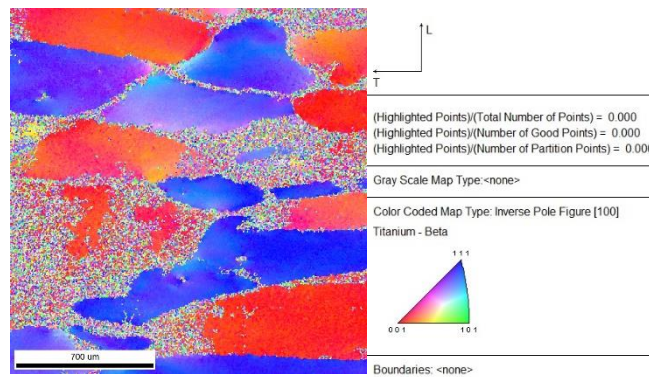


Figure : 16 Orientation moyenne de chaque grain selon l'axe de compression (échantillon non recuit)



Figure : 17 Orientation moyenne de chaque grain selon un axe orthogonal à la compression (échantillon recuit)

2) Annexes Partie III

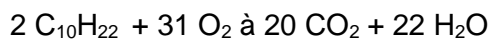
Annexe 1 : Explication du coefficient 3,11 entre la masse de CO₂ émise et la masse de kérosène consommé

Le kérosène est composé d'alcane (C_nH_{2n+2}) de formule chimique allant de C₁₀H₂₂ à C₁₄H₃₀.

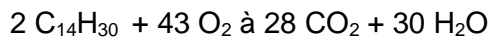
Connaissant les masses molaires des atomes de carbone, d'hydrogène et d'oxygène on obtient les masses molaires :

- C₁₀H₂₂ : 142,28 g/mol
- C₁₄H₃₀ : 198,39 g/mol
- CO₂ : 44,1 g/mol

Équations de combustion dans l'oxygène de ces 2 variétés d'alcane :



Soit en rapport des masses molaires pondérées : $20 \text{M}(\text{CO}_2) / 2 \text{M}(\text{C}_{10}\text{H}_{22}) = \mathbf{3,10}$



Soit en rapport des masses molaires pondérées : $28 \text{M}(\text{CO}_2) / 2 \text{M}(\text{C}_{14}\text{H}_{30}) = \mathbf{3,11}$

Ainsi, il est possible de lier masse de CO₂ émis et masse de kérosène consommé via un facteur qui vaut en moyenne environ 3,11.

Annexe 2 : Calcul de la consommation des B787-8 d'ANA

Le but est de calculer les émissions totales des B787-8 utilisés par la compagnie ANA, d'après les données de vol flight-radar à l'aide de simulation sur PianoX

Pour obtenir ces émissions, il faut sommer les émissions individuelles de chaque vol, en effectuant un tri pour ne garder que les vols de B787 affrétés par ANA.

Pour calculer la consommation d'un vol donné, il faut avoir la fonction F qui à une distance en km associe les émissions de CO2 (ou la consommation en kérosène du vol, on pourra ensuite remonter aux émissions). Cette fonction dépend de la charge de l'avion (nombre de passagers). La compagnie ANA utilise trois types de cabines sur ses B787-8, on doit donc calculer trois fonctions. Le programme Python ci-dessous calcule ces fonctions puis les émissions totales des B787-8 d'ANA, voici son fonctionnement.

Le logiciel pianoX permet de simuler pour certaines distances (10 distances maximum), et pour une charge donnée la consommation d'un vol.

Nous avons choisi les distances

{150,300,500,1000,1500,2000,2500,3000,4000,4500,5000,5500,6000} (en nautiques). Il fallait des valeurs allant de 150 à 6000 nautiques. Nous avons calculé plus de point pour les courtes distances où la courbe de F est moins régulière.

On exporte les résultats des simulations dans Python sous forme de liste. Pour obtenir une fonction F (pour un type de cabine) on effectue une régression polynomiale en utilisant ces dix points. On obtient alors trois fonctions (une pour chaque configuration cabine).

Il reste alors à identifier la configuration des B787-8 pour chaque vol de la base de donnée, pour savoir quelle fonction F utiliser. Une description détaillée de la flotte de la compagnie ANA (voir lien dans la bibliographie) nous permet de relier l'immatriculation de l'avion à son type de cabine.

On obtient alors les émissions totales des B787-8 d'ANA. On fait ensuite les mêmes calculs avec le B787-8 modifié qui est optimisé pour de courtes distances et on obtient le gain de 10% environ.

De même on suppose que tous les vols sont effectués par un A380 et on compare les émissions. On obtient un gain de 20% environ.

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

with open("L:\MIG\Extract_FLOSI_pour_MIG.csv", newline='\n') as csvfile:
    data = csvfile.read()
    data=data.split("\n")

n=len(data)

donnee=dict() #Dictionnaire pour stocker les données
donnee["avion"]=np.zeros((n),dtype='U10')
donnee["distance"]=np.zeros((n),dtype=float)
donnee["compagnie"]=np.zeros((n),dtype="U10")
donnee["immatriculation"]=np.zeros((n),dtype="U10")

for i,elt in enumerate(data):
    tmp=elt.split(";")

    if len(tmp)>28:

        donnee["avion"][i]=tmp[1][1:-2]
        donnee["distance"][i]=float(tmp[27])
        donnee["compagnie"][i]=tmp[2]
        donnee["immatriculation"][i]=tmp[0]

dist_NM=[150,300,500,1000,1500,2000,2500,3000,4000,4500,5000,5500,6000] #Liste des
distances entrées dans pianoX
dist_km=np.array(dist_NM)*1.852 #Conversion en km

donnee_fuel=dict() #Résultats des simulations de pianoX pour les distances de
dist_NM (en kg de kérosène)
donnee_fuel["B788_143"]=np.array([2886,4226.,5864.,10008.,14261.,18636.,23206.,2784
7.,37463.,42518.,47695.,53004.,58469.])
donnee_fuel["B788_156"]=np.array([2892.,4250.,5889.,10067.,14353.,18774.,23378.,280
52.,37738.,42833.,48052.,53408.,58915.])
donnee_fuel["B788_204"]=np.array([2911.,4317.,5977.,10194.,14546.,19087.,23699.,284
07.,38227.,43350.,48613.,54005.,59609.])
donnee_fuel["B788_247"]=np.array([2938.,4382.,6083.,10420.,14948.,19547.,24248.,290
51.,39156.,44404.,49782.,55368.,61082.])

#Retourne une fonction qui prend en argument la distance du vol en km et le modèle
d'avion,
#qui retourne les émissions par passager km du vol
def calcul_regression(modele_avion,nb_passager):
    deg=6

    fuel=donnee_fuel[modele_avion+"_"+str(nb_passager)]
    gCO2parpassparkm=1000*3.11*fuel/(nb_passager*dist_km)

    p=np.polyfit(dist_km,gCO2parpassparkm,deg)

    def poly(x):
        S=0
        for j in range(deg+1):
            S+=p[j]*x**(deg-j)
        return S

    poly=np.vectorize(poly)

    X=np.linspace(0,12000,100) # Vérifier que la regression polynomiale fonctionne
correctement , entre 0 et 12000 km
    plt.plot(X,poly(X))
    plt.plot(dist_km,gCO2parpassparkm,'*')

```



```

plt.show()
return poly
def calculer_les_regression():
    F=dict()
    F["B788_143"]=calcul_regression("B788",143)
    F["B788_156"]=calcul_regression("B788",156)
    F["B788_204"]=calcul_regression("B788",204)
    F["B788_247"]=calcul_regression("B788",247)
    return F

def determiner_nb_passager(immatriculation): #Determiner le nombre de passagers
    permet d'identifier le modèle de l'avion, pour chaque vols
    if immatriculation in
["JA805A","JA806A","JA813A","JA814A","JA820A","JA822A","JA823A","JA827A","JA828A"]:
        return 143
    elif immatriculation in
["JA801A","JA802A","JA803A","JA804A","JA807A","JA808A","JA815A","JA829A","JA831A","
JA832A","JA834A","JA835A","JA838A"]:
        return 156
    elif immatriculation in
["JA809A","JA810A","JA811A","JA812A","JA816A","JA817A","JA818A","JA819A","JA821A","
JA824A","JA825A"]:
        return 204
    else:
        print("err_det"+immatriculation)

def conso_ANA(modele_avion,donneeF): #calcule les emissions de CO2 totales liée à
l'usage du B787 par la compagnie ANA
    S=0
    for i in range(n):

        if donnee["avion"][i]==modele_avion and donnee["compagnie"][i]=="ANA":
            nb_passager=determiner_nb_passager(donnee["immatriculation"][i])

S+=donnee["distance"][i]*nb_passager*donneeF[modele_avion+"_"+str(nb_passager)] (don
nee["distance"][i])
    return S

def variation(a,b):
    return 100*(b-a)/a

def conso_ANA_opti(): #calcule les émissions de CO2 totales liée à l'usage du B787
par la compagnie ANA si toutes les distances de vols étaient optimales pour les
avions utilisés
    S=0
    for i in range(n):
        if donnee["avion"][i]=="B788" and donnee["compagnie"][i]=="ANA":
            nb_passager=determiner_nb_passager(donnee["immatriculation"][i])
            if nb_passager==143:
                S+=donnee["distance"][i]*108*143
            elif nb_passager==156:
                S+=donnee["distance"][i]*99.2*156
            elif nb_passager==204:
                S+=donnee["distance"][i]*78.9*204
            else:
                print("erreur")
                break
    return S

Fconso=calculer_les_regression()

print(variation(conso_ANA("B788",Fconso),conso_ANA_opti()))

```

