



HAL
open science

Tensions sur les ressources minérales : pourraient-elles impacter les trajectoires de décarbonation du transport aérien mondial ?

Vincent Marcadon

► **To cite this version:**

Vincent Marcadon. Tensions sur les ressources minérales : pourraient-elles impacter les trajectoires de décarbonation du transport aérien mondial?. Sciences de l'environnement. 2022. dumas-04749050

HAL Id: dumas-04749050

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04749050v1>

Submitted on 22 Oct 2024

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Cycle 2021-2022

Tensions sur les ressources minérales :
pourraient-elles impacter les trajectoires de
décarbonation du transport aérien mondial ?

Vincent MARCADON

Thèse professionnelle du Mastère Spécialisé Exécutive en Management
Global de la Responsabilité Sociétale des Entreprises et du Développement Durable

Sous la Direction de :

VANCASSEL, Xavier, Ingénieur Prospective ONERA (tuteur entreprise)

PIERRAT, Patrice, Directeur Prospective ONERA (tuteur entreprise)

ADNOT, Jérôme, Professeur Mines Paris – PSL (tuteur académique)

Remerciements

Au moment d'achever ce manuscrit, fruit de six mois de travail sur la question des besoins en ressources pour la décarbonation du transport aérien, mes premiers remerciements s'adressent bien évidemment à Xavier et Patrice, du Centre de Prospective et de Veille Aérospatiale de l'ONERA, ainsi qu'à Jérôme, des Mines Paris - PSL. Tout au long de cette mission, vous m'avez fait confiance pour mener à bien cette réflexion, et vous m'avez laissé une très grande autonomie, ce que j'ai pleinement apprécié. Mais en même temps, vous avez toujours répondu présents quand je vous sollicitais en apportant un regard critique et expert, bienveillant et constructif sur l'orientation et l'avancement de mes travaux. Cette mission a donc été pour moi l'occasion d'une expérience très enrichissante sur le plan professionnel comme sur le plan humain.

Je souhaite aussi remercier grandement mes collègues de l'ONERA, Stefan Drawin, Didier Locq et Bernard Paluch du Département Matériaux et Structures (DMAS), Julie Gauvrit-Ledogar et Sébastien Defoort du Département Traitement de l'Information et Systèmes, Michael Meheut du Département Aérodynamique, Aéroélasticité, Acoustique, et Philippe Novelli et Peter Schmollgrüber à la Direction des Programmes Aéronautique, ainsi que S. Rolland et M. Mazurek de chez Airbus, et G. Ramière de chez Thalès. Les échanges que nous avons pu avoir lors de ma mission m'ont permis de profiter de vos connaissances dans vos domaines d'expertise respectifs et de conforter certaines de mes hypothèses.

J'ai bien évidemment une pensée pour tous mes collègues du DMAS et du Département Multiphysique pour l'Energétique avec lesquels je travaille habituellement sur divers projets de recherche, ainsi que mes collègues des Instances Représentatives du Personnel de l'ONERA. Depuis un an et demi, vous avez dû faire avec mes indisponibilités les jours de cours et mon désengagement progressif de mes anciennes activités au profit de ma mission. Même si j'espère avoir fait en sorte de prévenir au mieux ce manque de disponibilité et cette transition, j'ai bien conscience qu'il s'agit d'une situation subie à laquelle vous avez dû vous adapter. Quant à mes collègues les plus proches et avec lesquels j'ai le plus échangé sur l'avancement et les résultats de mes travaux ... je vous aurais en plus régulièrement miné le moral lors de nos discussions à propos de la transition énergétique, de la biodiversité, du réchauffement climatique, de l'exploitation minière. Mais merci à toutes et tous pour cette convivialité au quotidien, et ce depuis bientôt 17 ans pour certains !

Au travers de ces quelques lignes, je souhaite aussi adresser mes remerciements à S. Andrieux et R. Haidar, ancien et actuel Directeurs Scientifiques Généraux de l'ONERA, ainsi que M.-C. Perron-Gitton, Responsable de la Formation, et M. Cauchard, Directrice Hygiène Sécurité Environnement. Si, lorsque j'ai évoqué mon projet d'évolution professionnelle il y a bientôt deux ans et demi et en pleine accélération de la pandémie de la Covid 19, l'ONERA est resté observateur de ma démarche dans un premier temps, il m'a ensuite grandement accompagné lorsque mon projet s'est concrétisé. Les échanges que nous avons pu avoir m'ont permis d'affiner les contours de mon projet et le sujet de ma mission, jusqu'à ce qu'avec Xavier et Patrice nous en arrêtions son contenu.

Merci aussi à Jasha Oosterbaan et Florence Gillet-Goinard, Responsables du Mastère RSEDD de l'ISIGE, ainsi qu'à toute la promotion 14 du Mastère. Ce retour sur les bancs de l'école aura été une expérience très intense,

tant sur le plan humain que sur le plan du travail personnel ! Tous nos échanges lors des séances de cours, des travaux de groupes, des études de terrain, et de moments festifs aussi, auront été riches du partage de nos parcours personnels et professionnels si divers.

Pour finir, j'ai forcément une pensée pour les amis, tout particulièrement Nicolas J qui a aussi apporté sa compétence professionnelle à ce travail. Et une pensée surtout pour mes proches ... qui commencent à avoir l'habitude de mes périodes récurrentes de rédaction intense ! Merci à vous pour votre soutien et votre amour. Marie, Olivia, Lauriane, merci tout particulièrement pour votre amour du quotidien ... et pour avoir supporté des soirées et des week-ends bien studieux ces derniers temps. Olivia, Lauriane, c'est aussi pour vous que j'ai mis tant d'énergie dans ce travail, pour que votre avenir ne devienne pas invivable.

à Marie,

à Olivia et Lauriane.

Résumé

Afin de diminuer ses émissions de CO₂, le secteur aérien imagine différentes trajectoires de décarbonation de son trafic. Il compte ainsi sur le déploiement de nouvelles flottes d'avions plus sobres en termes de consommation de carburants, mais aussi sur l'introduction de carburants alternatifs tels les électrocarburants, et de l'hydrogène. En tant qu'organisme de recherche dédié à l'aéronautique et au spatial, l'ONERA est partie prenante dans la construction de ces scénarios. Cependant, à l'échelle de l'avion et de la production de ses carburants, leur mise en œuvre nécessitera d'importants besoins en ressources minérales. Ces ressources pourront être spécifiques au secteur aéronautique ou associées à la production d'énergie, les scénarios envisagés reposant directement ou indirectement sur l'utilisation importante d'électricité décarbonée. Grâce à l'estimation des empreintes matières des aéronefs et des différentes filières pour la production des carburants décarbonés, nous nous attachons à cartographier les ressources qui pourraient être critiques dans la perspective de la mise en œuvre de ces scénarios. Il s'agit d'analyser les besoins en termes de disponibilité vis-à-vis de la demande mondiale. De façon prospective, il s'agit aussi d'évaluer la robustesse des scénarios de décarbonation et d'identifier des pistes possibles pour pallier d'éventuelles tensions d'approvisionnement sur certaines de ces ressources.

Abstract

In order to reduce its CO₂ emissions, the air transportation sector has imagined different trajectories for decarbonizing its traffic. It thus relies on the deployment of new aircraft fleets that will be more fuel efficient, but also on the introduction of alternative fuels, such as e-fuels, and hydrogen. As a research organization dedicated to aeronautics and space, ONERA is involved in the construction of these scenarios. However, at the aircraft and fuel production level, their implementation will involve significant mineral resource requirements. These resources may be specific to the aeronautical sector or associated with energy production, the scenarios envisaged being based directly or indirectly on the significant use of low-carbon electricity. By estimating the material footprints of the aircraft and the various sources of low-carbon fuels involved, we focus on mapping resources that could be critical for the implementation of these scenarios. It is a question of analyzing the needs in terms of availability with regard to world demand. Prospectively, it is also a matter of assessing the robustness of the aforementioned scenarios and identifying possible avenues to address potential supply pressures on some of these resources.

Mots clefs

Transport aérien, décarbonation, ressources minérales, ressources critiques, empreinte matières, recyclabilité, transition énergétique.

Sommaire

1.	Introduction.....	1
2.	Scénarios de décarbonation du transport aérien : de la théorie à leur mise en œuvre	5
2.1.	Etat des lieux des trajectoires de décarbonation	5
2.1.1.	Leviers technologiques et opérationnels	5
2.1.2.	Vers un net-zéro carbone théorique à l’horizon 2050	9
2.1.3.	Efficacité des scénarios de décarbonation.....	11
2.2.	L’ONERA et le projet ENERGIA.....	12
2.2.1.	Rôle de l’ONERA	12
2.2.2.	Projet ENERGIA	12
2.3.	Choix d’un système d’étude	16
2.4.	Matérialisation des trajectoires de décarbonation	18
2.4.1.	Segmentation de la flotte d’avions mondiale	18
2.4.2.	Choix d’un mix de capacités de production électrique à déployer.....	18
2.4.3.	Chiffres clés des trajectoires de décarbonation.....	20
2.5.	Premières observations concernant la mise en œuvre des trajectoires de décarbonation	21
3.	Ressources minérales nécessaires aux scénarios de décarbonation	23
3.1.	Empreinte matières unitaire des d’aéronefs.....	23
3.2.	Quelles empreintes matières pour l’énergie électrique ?.....	25
3.2.1.	Empreintes matières unitaires des énergies de décarbonation du trafic aérien	25
3.2.2.	Empreintes matières pour le transport et le stockage de l’électricité	27
3.3.	Empreinte matières des électrolyseurs.....	29
3.4.	Besoins en ressources minérales pour la mise en œuvre des trajectoires de décarbonation du trafic aérien	31
3.4.1.	Hypothèses de quantification des besoins en ressources	31
3.4.2.	Besoins spécifiques vs. besoins en commun.....	33
3.5.	Décarbonation du trafic aérien : 36 ressources minérales concernées	37

4.	Tensions sur les ressources : nécessité d'une analyse multicritère	38
4.1.	Criticité des ressources minérales nécessaires aux scénarios de décarbonation	38
4.1.1.	Décarbonation du trafic aérien : 21 ressources identifiées comme critiques par l'UE	38
4.1.2.	Ressources critiques et enjeux géopolitiques	41
4.1.3.	Productions des ressources et enjeux géopolitiques : quelles perspectives ?	43
4.2.	Substitution et recyclabilité des ressources	44
4.2.1.	Possibilités de substitution	44
4.2.2.	Quel impact du recyclage ?	46
4.3.	Besoins en ressources minérales vs. capacités de la production minière.....	49
4.3.1.	Risques de tensions induits par les scénarios de décarbonation de l'aérien	49
4.3.2.	Mise en perspective avec les risques de tensions induits par la transition énergétique ..	54
4.4.	Limites économiques et physiques de l'exploitation minière	56
4.4.1.	Mécanismes d'évolution des marchés des ressources minérales	56
4.4.2.	Vers un épuisement qualitatif des ressources minières ?	59
4.5.	Forte croissance de la demande et tensions à venir sur les ressources.....	60
5.	Retard de pénétration des technologies et impacts sur les trajectoires de décarbonation	63
5.1.	Empreinte carbone du mix électrique mondial : le point faible des scénarios	63
5.2.	Leviers pour des scénarios plus sobres en ressources minérales	65
5.2.1.	Effet d'un allongement de la durée de vie en service des avions.....	66
5.2.2.	Le levier de la croissance du trafic aérien.....	67
5.2.3.	Importance du développement du démantèlement et du recyclage des avions.....	69
5.3.	Risque d'indisponibilité des ressources : la difficile concrétisation des trajectoires de décarbonation du trafic aérien à l'horizon 2050.....	70
6.	Conclusions et perspectives.....	71
6.1.	Evolution des flottes d'appareils : le fort potentiel du recyclage pour faire face aux risques de tensions sur les ressources.....	72
6.2.	Production des carburants du futur : le risque d'une transition énergétique impactée par des tensions à prévoir pour certaines ressources critiques.....	73
6.3.	Déploiement spatial et temporel des carburants du futur : un enjeu de transition.....	74
6.4.	Décarbonation du trafic aérien : perspectives à explorer concernant les ressources minérales et les matériaux.....	76

Références.....	78
Annexe A : Construction des scénarios de décarbonation du trafic aérien établis par le CORAC.....	82
Annexe B : Tableau périodique des éléments.....	86
Annexe C : Alliages aéronautiques et méthodologie de définition de compositions modèles.....	88
Alliages d'aluminium	88
Aciers pour l'aéronautique.....	90
Alliages de titane	91
Superalliages.....	92
Empreintes matières des alliages aéronautiques.....	93
Annexe D : Méthodologie de détermination de l'empreinte matières d'un aéronef	95
Bilan de masses d'un aéronef.....	95
Cas particulier des composites à matrice polymère	97
Annexe E : Empreintes matières des infrastructures de production, d'acheminement et de stockage d'électricité décarbonée.....	99
Electricité nucléaire	100
Electricité éolienne.....	101
Electricité photovoltaïque	102
Réseaux électriques.....	104
Stockage stationnaire	106
Annexe F : Synthèse des besoins en ressources minérales nécessaires à la mise en œuvre des scénarios de décarbonation du trafic aérien mondial.....	107
Annexe G : Notions fondamentales de l'exploitation minière des ressources minérales	111
De la roche au minerai	111
Ressources, réserves et flux miniers	113
Annexe H : Ressources critiques et dépendance de l'UE	114
Quantification de la criticité d'une ressource	114
UE et dépendance aux CRM	116
Annexe I : Données de production, consommation, criticité, substituabilité et recyclabilité des ressources nécessaires à la décarbonation du trafic aérien.....	120

Liste des figures

Figure 1 : Configuration d'aéronef en aile delta à l'étude à l'ONERA (© J. Gauvrit-Ledogar et M. Meheut)....	8
Figure 2 : Scénarios de décarbonation proposés par le CORAC. S1 figure du haut et S2 figure du bas [1].	10
Figure 3 : Comparaison des scénarios du CORAC avec le scénario SSP1-2.6 du GIEC à l'horizon 2050, en conservant la part de l'aérien dans les émissions de GES mondiales comme actuellement (2,5%) [1].	11
Figure 4 : Energie nécessaire à la production d'1 MJ de combustible (LH2 dans la légende désigne l'hydrogène liquéfié) [23].	14
Figure 5 : Schématisation du système avion retenu pour cette étude.	16
Figure 6 : Evolution du cumul des besoins en ressources communes au cours des scénarios (Al, Cu, Mo et Ni).	35
Figure 7 : Evolution du cumul des besoins en ressources spécifiques au cours des scénarios (Dy, graphite, Pt et Re).	36
Figure 8 : Principaux lieux d'extraction des CRM [49].	39
Figure 9 : Principaux pays producteurs de CRM [49].	40
Figure 10 : Taux de présence des pays mentionnés parmi les quatre premiers producteurs mondiaux établis sur un panel de 45 métaux [60].	43
Figure 11 : Evolutions de la production et de la consommation mondiales de cuivre (https://www.mineralinfo.fr).	48
Figure 12 : EOL-RIR calculés à l'échelle de l'UE pour différentes ressources [61].	49
Figure 13 : Comparaison entre les réserves minières et les besoins nécessaires à l'électrification des mobilités (hors avions) pour cinq ressources indispensables aux technologies de batteries [75].	55
Figure 14 : Evolutions du prix du nickel depuis 20 ans (https://www.mineralinfo.fr). Pour comparaison, actuellement la tonne de nickel se vend autour de 23600 US\$ (https://www.lme.com/).	57
Figure 15 : Cycle traduisant le risque d'épuisement qualitatif de l'exploitation des ressources minières [60].	60
Figure 16 : Schémas de substitution du kérosène par les carburants alternatifs décarbonés, bio-carburants, électro-carburants (PtL) et hydrogène. Schéma de gauche dans le cas du scénario S1 et schéma de droite dans le cas du scénario S2 [1].	85
Figure 17 : Classification périodique des éléments.	86
Figure 18 : Vue éclatée d'un aéronef tube and wings classique, ici un Airbus A320 [42].	95
Figure 19 : Grands ensembles structuraux des aéronefs et leurs sous-ensembles, ici un Airbus A320 [43].	96

Figure 20 : Répartition des composites à fibres de carbone dans le Boeing 787 Dreamliner [40].	98
Figure 21 : Métaux (minerais) de base et leurs sous-produits [72].	112
Figure 22 : Liste des ressources suivies par l'UE, dont en rouge celles considérées comme critiques (CRM, Critical Raw Materials) [49].	117
Figure 23 : CRM produites en UE (entre parenthèses, part de cette production par rapport à la production mondiale sur la période 2012-2016) [49].	118
Figure 24 : Principaux pays d'approvisionnement des CRM pour l'UE [49].	119
Figure 25 : Principaux pays fournisseurs de CRM à l'UE [49].	119

Liste des tableaux

Tableau 1 : Vecteurs d'énergie, filières de fabrication et ressources primaires des carburants étudiés pour remplacer le kérosène (CSD signifie Carburants de Synthèse Durables) [22].	6
Tableau 2 : Projection des scénarios S1 et S2 en termes de consommations de carburants et d'émissions de CO ₂ annuelles à l'horizon 2050 [1].	11
Tableau 3 : Chiffres clés des trajectoires de décarbonation en termes de nombre d'avions à construire et de capacités de production d'électricité et d'hydrogène décarbonés à installer.	20
Tableau 4 : Empreintes matières des aéronefs en kg par avion.	24
Tableau 5 : Empreinte matières de l'électricité nucléaire en kg.MW ⁻¹ .	25
Tableau 6 : Empreinte matières de l'électricité éolienne, terrestre et off-shore, en kg.MW ⁻¹ .	26
Tableau 7 : Empreinte matières de l'électricité photovoltaïque en kg.MW ⁻¹ .	26
Tableau 8 : Empreintes matières des infrastructures de transport et de stockage de l'électricité, exprimées en kg par MW d'EnR intermittentes installées.	28
Tableau 9 : Empreintes matières des modules de base des différentes technologies d'électrolyseurs [47].	29
Tableau 10 : Performances des modules de base des différentes technologies d'électrolyseurs [47].	30
Tableau 11 : Empreintes matières des technologies d'électrolyseurs AEC et PEMEC, en kg par tonne d'H ₂ .	30
Tableau 12 : Tableau récapitulatif des ressources minérales nécessaires à la décarbonation de l'aérien d'ici 2050.	34
Tableau 13 : Liste des CRM identifiés par l'UE [49]. HREEs désigne les terres rares de masse molaire élevée, LREEs celles de faible masse molaire, et PGMs désigne le groupe des platinoïdes (cf. Annexe H).	39
Tableau 14 : Gains de consommation d'énergie entre productions primaires et secondaires des métaux [63].	47
Tableau 15 : Quantification des risques de tensions de la production minière sur les ressources nécessaires à la mise en œuvre des scénarios de décarbonation du trafic aérien.	52
Tableau 16 : Listes des principales ressources nécessaires à la décarbonation du trafic aérien qui sont exposées à un risque de tension selon les critères retenus.	61
Tableau 17 : Estimation des émissions résiduelles du trafic aérien à l'horizon 2050 en fonction de la mise en œuvre plus ou moins totale des scénarios S1 et S2. Les valeurs en italique illustrent l'effet de la substitution du kérosène par les e-fuels et l'H ₂ dans un mix électrique mondial insuffisamment décarboné.	65
Tableau 18 : Chiffres clés des trajectoires de décarbonation du trafic aérien dans l'hypothèse d'un allongement de la durée de vie des aéronefs à 30 ans au lieu de 20 ans.	67

Tableau 19 : Chiffres clés des trajectoires de décarbonation du trafic aérien dans l’hypothèse d’une croissance du trafic de 1,6% par an au lieu de 3,1% par an. Durée de vie en service des avions de 20 ans en partie haute du tableau, et de 30 ans en partie basse.	68
Tableau 20: Hypothèses retenues par le CORAC pour les scénarios de décarbonation du trafic aérien [1]...	85
Tableau 21 : Compositions des différents alliages d’aluminium utilisés dans l’aéronautique [40].....	89
Tableau 22 : Composition de l’alliage d’aluminium modèle.	89
Tableau 23 : Compositions des différents aciers utilisés dans l’aéronautique [40].....	90
Tableau 24 : Composition de l’acier modèle.	90
Tableau 25 : Compositions des différents alliages de titane utilisés dans l’aéronautique [40].....	91
Tableau 26 : Composition de l’alliage de titane modèle.	91
Tableau 27 : Compositions des différents superalliages utilisés dans l’aéronautique [40].	92
Tableau 28 : Composition du superalliage CMSX-4 Plus.	92
Tableau 29 : Composition du superalliage modèle.	93
Tableau 30 : Compositions retenues pour les alliages aéronautiques modèles utilisés dans la suite de cette étude. Les teneurs sont exprimées en kg pour 1 kg d’alliage.	93
Tableau 31 : Grandes masses des différents matériaux utilisés dans un avion, ici un Airbus A320 [21].....	97
Tableau 32 : Compositions modèles des aciers de construction utilisés dans le projet SURFER [44].	99
Tableau 33 : Empreinte matières (ou intensité matières, IM) de la production d’énergie nucléaire en tonnes par MW de puissance installée [44].	100
Tableau 34 : Empreinte matières (ou intensité matières, IM) de la production d’énergie éolienne on-shore en tonnes (ou kg pour les terres rares) par MW de puissance installée [44].	101
Tableau 35 : Empreinte matières (ou intensité matières, IM) de la production d’énergie éolienne off-shore en tonnes (ou kg pour les terres rares) par MW de puissance installée [44].	102
Tableau 36 : Empreinte matières (en g.Wc ⁻¹) des différentes technologies de cellules photovoltaïques [44].	103
Tableau 37 : Empreinte matières (en g.Wc ⁻¹) des pièces communes à l’ensemble des panneaux photovoltaïques, indépendamment de la technologie des cellules [44].	104
Tableau 38 : Empreinte matières des onduleurs en fonction de leur puissance (en g par onduleur) [44]....	104
Tableau 39 : Empreinte matières des réseaux de transport d’électricité et des transformateurs [44].	105
Tableau 40 : Empreinte matières d’une batterie de stockage Li-ion basée sur la technologie oxyde de manganèse [44].	106
Tableau 41 : Besoins en ressources minérales nécessaires à la décarbonation du trafic aérien.....	107

Tableau 42 : Liste des ressources stratégiques surveillées par l'UE [49].	116
Tableau 43 : Synthèse des données des productions minière et métallurgique des différentes ressources considérées dans cette étude, ainsi que leurs utilisations principales, leur caractère plus ou moins substituable et leur recyclabilité.	121

Liste des abréviations

ACV : Analyse de Cycle de Vie

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, ou Agence de la Transition Ecologique

AEC : Alkaline Electolysis Cell

ATAG : Air Transport Action Group

BECCS : Bio-Energy Carbon Capture and Storage

BGR : Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Allemagne)

BGS : British Geological Survey

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

CAD : Carburants d'Aviation Durables (regroupent les bio- et électro-carburants)

CESE : Conseil Economique, Social et Environnemental

COMES : Comité pour les Métaux Stratégiques

CO₂ : Dioxyde de carbone

CORAC : Conseil pour la Recherche Aéronautique Civile

CPVA : Centre de Prospective et de Veille Aérospatiale (ONERA)

CRM : Critical Raw Materials

DACCS : Direct Air Carbon Capture and Storage

DGAC : Direction Générale de l'Aviation Civile

DMAS : Département Matériaux et Structures (ONERA)

EJ : ExaJoule (1 EJ = 10¹⁸ J = 277,77 TWh)

EnR : Energie Renouvelable

EOL-RIR : End-Of-Life Recycling Input Rate

EOL-RR : End-Of-Life Recycling Rate

gCO₂eq : Gramme CO₂ équivalent

GES : Gaz à Effet de Serre

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)

GTK : Geologian Tutkimuskeskus (Geological Survey of Finland)

GtL : Gas-to-Liquid

H₂ : Dihydrogène (ou hydrogène par abus de langage)

HHI : Herfindahl-Hirschman Index

IATA : International Air Transport Association

IEA : International Energy Agency

IFRI : Institut Français des Relations Internationales

ILUC : Induced Land Use Change, ou Indirect Land Use Change

INEC : Institut National de l'Economie Circulaire

IRENA : International Renewable Energy Agency

IRSEM : Institut de Recherche Stratégique de l'Ecole Militaire

OACI : Organisation de l'Aviation Civile Internationale (International Civil Aviation Organization, ICAO)

OECD : Organisation for Economic Co-operation and Development (Organisation de coopération et de développement économiques, OCDE)

ONERA : Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales

PEMEC : Polymer Electrolyte Membrane Electrolysis Cell

PGM : Platinum Group Metals

PIPAME : Pôle Interministériel de Prospective et d'Anticipation des Mutations Economiques

PRG : Pouvoir de Réchauffement Global

PtL : Power-to-Liquid

REE : Rare-Earth Elements

RTE : Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité en France

SMR : Short Medium Range (définit le rayon d'action d'un aéronef)

LR : Long Range

TRL : Technology Readiness Level

UE : Union Européenne

UNEP : United Nations Environment Programme

USGS : United States Geological Survey

WGI : Worldwide Governance Indicators

3AF : Association Aéronautique et Astronautique de France

1. Introduction

Le secteur du transport aérien, comme tout secteur d'activité humaine, contribue aux émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) et au réchauffement climatique, et ce à hauteur de 2,5 % environ des émissions mondiales [1], [2]. Si ce chiffre peut sembler relativement faible rapporté au total des émissions de GES de l'ensemble des secteurs du transport, qui s'élève à environ 25% des émissions mondiales [3], il n'en demeure pas moins que le secteur du transport aérien est aussi pleinement concerné par l'enjeu de réduction de ses émissions.

L'une des principales raisons est que, comme le mentionnait déjà le GIEC en 1999 [4], les avions n'émettent pas que du dioxyde de carbone (CO₂) lors de la combustion des carburants. Ils émettent aussi des oxydes d'azote (NO_x) et surtout de la vapeur d'eau dans les traînées de condensation, responsables de la formation de certains nuages d'altitude comme les cirrus. Même si l'impact exact de ces émissions est encore débattu car c'est un sujet d'étude en plein développement, la part du réchauffement climatique imputable au transport aérien au travers du forçage radiatif pourrait finalement être de l'ordre de 3,5-6% [1], [2], [5] en considérant l'ensemble des substances émises.

La deuxième raison que l'on peut mentionner est d'ordre réglementaire. En effet, la Directive européenne 2008/101/CE, entrée en vigueur le 2 février 2009, a modifié la Directive 2003/87/CE afin d'intégrer les activités aériennes dans le système communautaire d'échange de quotas d'émissions de GES. Cette directive a eu pour effet de faire entrer les émissions de CO₂ du trafic aérien dans la comptabilité carbone en général et, par conséquent, d'inciter de façon plus ou moins indirecte les constructeurs d'avions à aller vers toujours plus de sobriété énergétique des appareils. Si on prend le cas de la France par exemple, que cela entre dans le scope 1 de leur bilan GES dans le cas des compagnies aériennes, ou plus généralement dans leur scope 3 pour la très grande majorité des entreprises (missions des collaborateurs et éventuel fret aérien), depuis la publication du Décret n° 2017-639 du 26 avril 2017 relatif à l'information sur la quantité de GES émis à l'occasion d'une prestation de transport, tous les acteurs économiques sont au courant des émissions de GES associées à chaque moyen de transport, et donc à l'avion en particulier. Celui-ci, avec son empreinte moyenne de l'ordre de 100-150 gCO₂eq émis par passager et par kilomètre parcouru (<https://eco-calculateur.dta.aviation-civile.gouv.fr/>), se révèle ainsi être l'un des modes de transport les plus polluants ou presque sur la phase d'usage du cycle de vie. C'est pour cette raison que, dans le cadre de la loi Climat et Résilience du 22 août 2021, il est prévu d'interdire les vols domestiques à l'horizon 2024 en cas d'alternative en train d'une durée de moins de 2h30 (<https://www.ecologie.gouv.fr/loi-climat-resilience>). Après la fiabilité des appareils, leur sobriété en termes de consommation de carburant est un critère concurrentiel central entre constructeurs, d'autant plus que cela permet de réduire les coûts d'exploitation liés à l'achat du kérosène. A l'échelle mondiale, l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale, OACI, a ainsi émis des normes en termes d'émissions de CO₂ pour la certification des aéronefs (<https://www.icao.int/Newsroom/Pages/FR/ICAO-CO2-Standards-used-for-latest-EASA-aircraft-certification.aspx>).

La dernière raison est davantage sociétale et découle de façon concomitante de la survenue de la pandémie de la Covid 19 et du phénomène du *flygskam* (honte de prendre l'avion) qui émerge. En effet, même si l'efficacité énergétique des avions a été grandement accrue grâce à l'amélioration technologique des appareils (allègement des structures, aérodynamisme et amélioration des performances des turbomachines), les émissions de CO₂ du trafic aérien ont augmenté de l'ordre de 40% entre 2005 et 2019 en raison de son accroissement [2], [5]. En outre, cette démocratisation du transport aérien peut être relativisée car, dans les faits, seuls 10% de la population mondiale prennent l'avion chaque année et c'est seulement 1% de la population mondiale qui est responsable de

50% des émissions de GES du trafic aérien [6]. A l'échelle de la France par exemple, les CSP+ (Catégories Socio-Professionnelles supérieures) voyagent 17 fois plus que les ouvriers alors que leur part dans la population est 30% plus faible [7]. L'avion reste donc un moyen de transport majoritairement réservé aux catégories socio-professionnelles les plus favorisées, et utilisé pour des loisirs ; les trajets professionnels ne constituent que 28% des trajets en France [7]. Les trajets en avion ne présentent donc pas la même sociologie ni la même finalité que les autres modes de transport (routier, ferroviaire ou maritime). La pandémie de la Covid 19 a ainsi fait émerger un nouveau regard sur le fait de prendre l'avion, y compris au sein des étudiants en écoles d'aéronautique ou des salariés du secteur [8]. La réduction de l'impact environnemental de l'aérien est donc devenue un enjeu d'acceptabilité sociétale fort pour les acteurs du secteur.

Ces prises de conscience successives des enjeux environnementaux et sociaux associés au transport aérien ont ainsi eu pour conséquence un renforcement très significatif des réflexions et des initiatives ayant pour objectif la décarbonation du trafic aérien (*Clean Aviation*, <https://www.clean-aviation.eu/>, ou *ReFuelUE Aviation Initiative*, [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI\(2022\)698900](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2022)698900), à l'échelle de l'UE). Ainsi, les différents industriels, organismes de recherche et institutions du transport aérien travaillent à l'élaboration de scénarios de décarbonation du trafic [1], [9], [10].

Ces scénarios de décarbonation ont pour objectif, de façon prospective, d'envisager les différentes technologies, telles que les bio- et électro-carburants, l'hydrogène, l'électrification des manœuvres aéroportuaires ou encore l'optimisation du contrôle aérien en approche, qui permettront de minimiser les émissions de CO₂ associées à la phase d'usage des aéronefs. Le but est de tendre vers un objectif net-zéro émissions de CO₂ à l'horizon 2050. Ces scénarios seront abordés plus en détail dans la suite de ce manuscrit. Néanmoins, on peut déjà préciser qu'ils reposent sur l'utilisation sous-jacente d'une grande quantité d'électricité décarbonée, soit directement, soit comme énergie secondaire pour la production d'électro-carburants et d'hydrogène décarbonés. Ils présentent donc un lien direct avec les scénarios proposés dans le cadre de la transition énergétique [3], [11]–[14], pour lesquels on sait qu'ils vont aboutir à une très forte demande en ressources, notamment minérales, dans les décennies à venir. Or, tous ces scénarios évoquent finalement très peu la question des tensions qui pourraient apparaître sur certaines de ces ressources en regard des réserves disponibles (au sens minier du terme il s'agit des stocks de minerais identifiés et quantifiés exploitables aux coûts d'exploitation actuels), et surtout des capacités d'extraction et de transformation de ces minerais en regard de la demande [15]–[19]. En effet, dans l'optique des transitions envisagées (énergétique, mobilités, etc.), le principal facteur limitant concernant les vitesses de déploiement et de pénétration des technologies dans nos sociétés pourraient être une incapacité des flux de production à répondre à la demande [20]. Cela pourrait entraîner un retard dans la décarbonation de nombreux secteurs d'activité, y compris l'aérien.

Afin de discuter de l'existence d'un tel risque, et dans la continuité de ses travaux sur les scénarios de décarbonation du trafic aérien, le Centre de Prospective et de Veille Aérospatiale (CPVA) de l'ONERA m'a confié la mission d'évaluer les besoins en ressources minérales associés à ces scénarios. Il s'agissait de quantifier ces besoins et d'identifier les ressources les plus critiques sur lesquelles il pourrait y avoir des tensions, notamment en regard de la demande mondiale tous secteurs confondus. Il s'agissait aussi d'estimer dans quelle mesure de telles tensions pourraient impacter la mise en œuvre des scénarios.

Le présent rapport a vocation en rendre compte des résultats qui découlent de cette mission. Afin de proposer une appropriation synthétique des enjeux de ce travail et de ses conclusions, le parti a été pris de mettre l'accent dans

le corps principal du document sur la spécification des grandes questions auxquelles cette mission devait apporter des réponses, sur la méthodologie utilisée et les hypothèses formulées, ainsi que sur les résultats obtenus. Chaque chapitre fait par ailleurs l'objet d'une section finale de synthèse. L'ensemble des données qui ont été utilisées pour parvenir aux conclusions découlant de ce travail fait l'objet de plusieurs annexes techniques fournies à la fin de ce rapport. L'obtention de ces données est le fruit d'un important travail de collecte, de croisement, d'analyse et de reconstruction de données sur la base de nombreux travaux de la littérature.

La première étape de la mission a consisté en un travail d'analyse des scénarios de décarbonation du trafic aérien afin de pouvoir répondre à la question suivante : parmi les leviers de décarbonation envisagés, quels sont ceux pour lesquels la question de la disponibilité des ressources minérales est centrale ? Le Chapitre 2 est ainsi consacré à la présentation des scénarios de décarbonation, tout particulièrement ceux du CORAC (Conseil pour la Recherche Aéronautique Civile) [1], retenus pour cette étude et auxquels l'ONERA et le CPVA ont très fortement contribué. A partir de cette première analyse, le « système avion » dans sa globalité (*i.e.* la flotte d'appareils en elle-même mais aussi les besoins en énergie associés à la production des carburants) a été défini comme système d'étude. Différentes données d'entrée ont ainsi été quantifiées, comme le dimensionnement et la composition des futures flottes d'appareils ou les besoins énergétiques associés en fonction des différents types de carburants qui seront utilisés.

La deuxième question à laquelle il a fallu répondre a concerné la façon d'établir un lien entre avions et infrastructures de production d'énergie d'un côté, et ressources minérales de l'autre. Le Chapitre 3 est ainsi consacré au volet le plus technique de la mission, à savoir l'établissement de l'empreinte matières des différents sous-ensembles constitutifs du système étudié. La méthodologie utilisée et les hypothèses formulées pour estimer ces empreintes matières sont ainsi abordées, avec pour résultat la quantification des besoins en ressources minérales associés aux scénarios de décarbonation du trafic aérien.

Sous un angle plus prospectif, le Chapitre 4 a vocation à identifier, parmi les ressources minérales susmentionnées, celles qui pourraient être particulièrement critiques au sens de leur disponibilité. Si elles devaient advenir, de telles tensions en termes d'approvisionnement pourraient potentiellement ralentir le déploiement des scénarios de décarbonation du trafic aérien. Les besoins en ressources sont donc analysés en regard des prévisions de demande mondiale tous secteurs confondus et des capacités de production (réserves et flux), ainsi que des enjeux géopolitiques et économiques de cette production. On s'intéresse aussi dans ce chapitre au rôle que pourrait jouer le recyclage dans cette problématique : peut-il apporter une réponse pérenne à des problèmes de tensions sur les ressources ou, face à la croissance de la demande, son apport restera-t-il limité de toute façon ? De même, certaines ressources en tension pourraient-elles être substituées par d'autres moins critiques ?

Le Chapitre 5 a quant à lui pour objectif de discuter la robustesse des scénarios de décarbonation du trafic aérien, du point de vue de la disponibilité des ressources minérales qui leur seront nécessaires, mais aussi du point de vue plus général de la disponibilité d'un mix électrique mondial suffisamment décarboné. Nous nous intéressons donc aux paramètres de ces scénarios sur lesquels il serait possible de jouer afin de les rendre moins consommateurs de ressources.

Pour conclure, le dernier chapitre présente une synthèse des résultats de cette mission concernant la quantification des besoins en ressources minérales associés aux trajectoires de décarbonation du trafic aérien, ainsi que l'évaluation de la robustesse de ces trajectoires vis-à-vis de la disponibilité de ces ressources et des enjeux de la

transition énergétique. Sur la base de ces conclusions, sont abordés les enjeux que pourraient revêtir la mise en place d'une filière de type REP (Responsabilité Elargie des Producteur) « Aéronautique » dans une optique d'économie circulaire à l'échelle de l'ensemble des acteurs de la filière. La nécessité de développer une démarche d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) prospective allant au-delà des besoins en ressources et de leur criticité (empreintes carbone, énergie, eau) est aussi évoquée. De même, il y a un besoin de quantifier l'empreinte matières des technologies de capture et de séquestration du CO₂ en raison de leur importance pour une partie des scénarios de décarbonation du trafic aérien, ainsi que d'explorer le potentiel d'autres voies que la seule voie minière classique pour l'extraction des ressources. Certaines des conclusions de ces travaux soulèvent aussi des questionnements concernant le déploiement de certaines des technologies de décarbonation envisagées. Indépendamment de la disponibilité des technologies, pour certaines d'entre elles leur efficacité dépendra très fortement des stratégies de leur déploiement d'un point de vue temporel et spatial.

2. Scénarios de décarbonation du transport aérien : de la théorie à leur mise en œuvre

Dans ce chapitre, la question à laquelle il s'agit de répondre concerne la matérialisation des scénarios de décarbonation du transport aérien. Il s'agit là d'une étape préliminaire indispensable dans l'optique de quantifier les besoins en ressources minérales associés à ces scénarios. La première partie de ce chapitre présente les enjeux des scénarios de décarbonation du transport aérien sur la base de ceux élaborés par le CORAC et auxquels l'ONERA a très fortement contribué [1] ; des scénarios similaires ont été établis par les USA (*US 2021 Aviation Climate Action Plan* [9]) ou par l'*Air Transport Action Group* (scénarios *Waypoint 2050* [10]). L'objectif est d'identifier les leviers évoqués dans ces scénarios qui pourraient mobiliser d'importants besoins en ressources minérales. A partir de là, il est possible de définir un système d'étude incluant l'avion et sa production d'énergie. C'est sur la base de ce système que, ensuite, est projetée la traduction de ces scénarios en termes de nombres d'avions à construire et de capacités de production d'énergie à déployer. Ce chapitre s'appuie sur d'importants travaux réalisés en amont, à l'ONERA notamment, autour de la décarbonation du transport aérien [21]–[24].

2.1. Etat des lieux des trajectoires de décarbonation

2.1.1. Leviers technologiques et opérationnels

Dans le but de diminuer l'empreinte carbone du trafic aérien, les acteurs du secteur ont l'habitude de jouer sur deux leviers principaux, à savoir les leviers technologique et opérationnel [1], [25].

Concernant le levier technologique, une baisse considérable de la consommation unitaire (par passager et par km) a été obtenue avec l'arrivée des moteurs à double flux à la fin des années 1960. Pour une même consommation de carburant, ces moteurs permettent de fournir une poussée bien plus grande que celle des moteurs simple flux, la poussée étant produite par le flux de gaz chauds en sortie de turboréacteur, dit flux primaire, mais aussi par un flux d'air froid prélevé en entrée de turbomachine, dit flux secondaire. La consommation unitaire des turbomachines a ainsi été divisée par cinq depuis les années 1960. Au-delà des seules performances des moteurs, les équipementiers aéronautiques travaillent à toujours plus de frugalité des appareils en améliorant les technologies existantes ou en innovant. Cela passe par de nouvelles motorisations impliquant un taux de dilution plus élevé (rapport entre les masses des flux secondaire et primaire), par des modifications importantes de la voilure permettant d'accroître la portance et de diminuer la traînée, ainsi que par l'allègement des structures *via* l'utilisation d'alliages d'aluminium toujours plus performants et plus récemment de composites à renforts fibreux. Ces innovations technologiques reposent aussi pour partie sur des matériaux à très forte valeur ajoutée [26].

Concernant le levier opérationnel, il s'agit en premier lieu de minimiser les temps de vol ou de roulage (déplacement des avions au sol) inutiles. Cela concerne l'optimisation globale du trafic, en évitant par exemple les trajectoires d'attente et en cherchant à avoir des phases de montée continues et des descentes au ralenti. D'autres options de

réduction de la consommation, comme l'optimisation du couple vitesse / altitude ou le vol en formation¹, peuvent également être envisagées. Au sol, des opérations dites de *green taxiing* sont envisagées, visant à déployer des solutions de roulage et de parking peu émettrices : moteurs électriques montés dans les trains d'atterrissage, utilisation d'un réacteur sur deux en phase de roulage, tractage par des véhicules électriques. Un potentiel de réduction de la consommation unitaire de l'ordre de 10 à 15 % d'ici 2050 est escompté selon l'OACI [27].

Néanmoins, toutes ces solutions se heurtent au fait que les carburants aéronautiques actuellement utilisés sont des carburants « fossiles » issus des hydrocarbures et leur combustion est donc fortement émettrice de CO₂². Afin de décarboner le trafic aérien à son maximum, des efforts importants sont fournis pour la mise au point de vecteurs d'énergie alternatifs décarbonés pour la propulsion des aéronefs, pouvant être produits par différentes voies et à partir de différentes ressources (cf. Tableau 1). A l'heure actuelle, les bio- et électro-carburants ainsi que l'hydrogène sont principalement étudiés en vue de la production de carburants aéronautiques décarbonés [1], [9], [10], [22]–[25], [27]. Le méthane est aussi étudié mais, pour des raisons de compétitions d'usage à prévoir avec d'autres secteurs d'activité, son utilisation pour l'aéronautique est beaucoup plus incertaine (cf. Section 2.2.2).

Vecteur d'énergie	Filière	Sous-filière	Sources primaires		
H ₂	Reformage	CSC	Gaz naturel		
	Electrolyse		H ₂ O	Electricité renouvelable	
				Electricité nucléaire	
	Bio-H ₂	Reformage biogaz	Biomasse		
Fermentation					
Gaséification					
CH ₄	Biogaz	Fermentation	Biomasse		
	« Electro-gaz »	Méthanisation	H ₂ O	CO ₂	Electricité renouvelable Electricité nucléaire
CSD	Biocarburant	Fischer-Tropsch	Biomasse		
		HEFA			
		SIP			
		ATJ			
				
	« Electro-carburant »	H ₂ + CO + Fischer-Tropsch	H ₂ O	CO ₂	Electricité renouvelable
Méthanol		Electricité nucléaire			

Tableau 1 : Vecteurs d'énergie, filières de fabrication et ressources primaires des carburants étudiés pour remplacer le kérosène (CSD signifie Carburants de Synthèse Durables) [22].

¹ Le vol en formation des aéronefs s'inspire de façon biomimétique du vol des oiseaux migrateurs, l'avion suivre « s'appuyant » sur les turbulences générées par l'avion qui le précède pour augmenter sa portance. Son efficacité a fait l'objet de tests récents, <https://www.techno-science.net/actualite/test-vol-formation-long-courriers-a350-demonstre-economie-carburant-N21419.html>.

² 1 litre de kérosène brûlé émet environ 3 kg de CO₂, 2,5 kg pour la seule combustion auxquels il faut ajouter environ 0,5 kg de CO₂ émis pour l'extraction, le raffinage et le transport du kérosène, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Kérosène>.

La voie la plus mature est celle des bio-carburants, ou carburants issus de la biomasse. Il s'agit d'utiliser une matière première dont le développement s'est fait par des processus biochimiques impliquant la captation du CO₂ présent dans la biosphère (croissance de végétaux, d'algues). Trois grandes catégories de matières premières peuvent être utilisées avec différents procédés de transformation chimique : (i) la biomasse glucidique provenant de cultures riches en sucres et en amidon, (ii) les oléagineux riches en lipides (colza, soja, etc.) ou la biomasse lipidique, produite par exemple à partir de microalgues, et (iii) la biomasse cellulosique présente dans les structures fibreuses des plantes (arbres, herbes, résidus agricoles ou forestiers) ainsi que les déchets solides issus de la collecte des ordures ménagères. Ces bio-carburants, sous réserve de certification (https://www.ecologie.gouv.fr/biocarburants#scroll-nav_7), peuvent déjà être utilisés pour des vols commerciaux mélangés avec le kérosène à des taux d'incorporation pouvant aller jusqu'à 50% actuellement. Des travaux sont en cours pour porter ces taux à 100%. Les performances environnementales de ces différents bio-carburants, en particulier les émissions de GES sur le cycle de vie, dépendent des procédés de conversion, des types de biomasse utilisés et de leurs conditions de production. Il convient en particulier de veiller aux impacts liés aux changements d'usage des sols, directs ou indirects, induits par la production de la biomasse, ceux-ci pouvant engendrer des émissions de CO₂ très importantes du fait de la libération du carbone contenu dans la biomasse préexistante ou séquestré dans les sols. Ceci conduit actuellement à promouvoir les bio-carburants issus des déchets et résidus.

La voie des électro-carburants, ou *Power-to-Liquid (PtL)*, ou *e-fuels*, présente en revanche une moins grande maturité qui en est plutôt à un stade de pré-industrialisation. Cette voie nécessite d'utiliser de l'électricité, du CO₂ et de l'eau pour produire des hydrocarbures de synthèse de composition semblable à celle des bio-carburants. L'eau et le CO₂ (capté dans l'atmosphère ou en sortie des processus industriels) sont dissociés en hydrogène et monoxyde de carbone, puis des hydrocarbures sont synthétisés à partir de ce mélange (selon le procédé Fischer-Tropsch classique, par exemple). Ces procédés présentent des avantages en termes de durabilité en regard de certaines problématiques de disponibilité de la biomasse. Leurs émissions de GES peuvent être considérées comme nulles sur le cycle de vie si les procédés de fabrication de l'hydrogène et de traitement ultérieur utilisent des sources d'énergie 100% décarbonées, aux émissions liées à la création des infrastructures près. Avec la captation du CO₂, la disponibilité d'électricité 100% décarbonée est l'autre verrou principal au développement de ces technologies. L'utilisation d'électricité carbonée aurait en effet un impact très négatif sur le bilan carbone des *e-fuels*. On voit aussi que l'élaboration de ces carburants alternatifs nécessite souvent des étapes de transformation supplémentaires par rapport aux carburants classiques ou même aux bio-carburants. Cela entraîne des baisses de rendement de la chaîne énergétique de production, d'où une augmentation des coûts de production [22]–[24], [28]. Autre point important à noter, pour produire des électro-carburants décarbonés il faut déjà disposer d'hydrogène décarboné ; il faut 0,448 kg d'H₂ pour produire 1 kg d'électro-carburant [22]. Le transport aérien aura donc besoin d'hydrogène décarboné avant même d'avoir des avions volant à l'hydrogène.

La dernière voie, celle de l'hydrogène, est de loin la moins mature. L'hydrogène présente un certain potentiel car sa combustion n'émet que de la vapeur d'eau ou presque, ce qui n'est pas sans soulever quelques interrogations cependant en termes d'impact sur le forçage radiatif dû aux traînées de condensation des avions, comme évoqué en introduction de ce rapport. Le pouvoir calorifique de l'hydrogène est environ trois fois plus élevé que celui du kérosène (120 MJ.kg⁻¹ contre 43 MJ.kg⁻¹). En revanche, l'hydrogène est bien moins dense que le kérosène (0,083 kg.m⁻³ contre 800 kg.m⁻³) car il est gazeux sous des conditions normales de température et de pression [29]. Afin de pouvoir utiliser l'hydrogène comme carburant pour les avions, il est alors indispensable de trouver le moyen

de l'emporter dans des réservoirs dans lesquels il serait stocké sous forme très dense, soit en augmentant la pression (hydrogène sous forme gazeuse comprimé), soit en diminuant la température de stockage (hydrogène sous forme liquide). En effet, l'hydrogène comprimé atteint une densité de 42 kg.m^{-3} à température ambiante et sous une pression de 700 Bar. Néanmoins, la meilleure solution serait de le liquéfier, sa densité étant alors de 71 kg.m^{-3} à pression ambiante mais, pour cela, il faut descendre à des températures inférieures à 20°K ($-253,15^\circ\text{C}$). On comprend donc aisément que l'utilisation de l'hydrogène liquéfié comme carburant nécessite de lever de nombreux verrous technologiques pour la conception des moteurs, avec d'éventuelles problématiques de fragilisation des matériaux par l'hydrogène, et pour le stockage avec un besoin de réservoirs plus volumineux d'un facteur 4 environ et très bien isolés thermiquement. De plus, comme pour les *e-fuels*, la production d'hydrogène liquéfié nécessite de nombreuses étapes dans le processus de production, ainsi que de l'électricité décarbonée³ en quantités importantes. L'utilisation d'hydrogène comme carburant pour les avions présente donc une problématique de rendements de production (même s'il n'y a pas l'étape de transformation en électro-carburant il faut le liquéfier), avec en plus des verrous technologiques pouvant nécessiter des modifications de configuration des aéronefs [30], [31]. La Figure 1 illustre une de ces nouvelles configurations, évaluée aussi bien pour l'avion à hydrogène que pour les avions avec bio- ou électro-carburants.



Figure 1 : Configuration d'aéronef en aile delta à l'étude à l'ONERA (© J. Gauvrit-Ledogar et M. Meheut).

³ On parle d'hydrogène vert quand il est produit par électrolyse de l'eau avec de l'électricité issue de sources d'Energies Renouvelables (EnR), d'hydrogène jaune lorsque que l'électricité utilisée est d'origine nucléaire (donc décarbonée mais non renouvelable) et d'hydrogène bleu lorsqu'il est issu de procédés de vapo-reformage des hydrocarbures à partir de CO_2 capturé et d'électricité décarbonée. A l'heure actuelle, 96% de l'hydrogène produit est dit gris car issu du vapo-reformage des hydrocarbures. En fonction du type de matière fossile utilisé (pétrole, gaz, charbon), on peut trouver des échelles de classification de l'hydrogène allant jusqu'à sept couleurs.

Certaines mesures économiques basées notamment sur des dispositifs de compensation des émissions de CO₂ sont aussi envisagées, comme le dispositif CORSIA⁴ adopté en 2016 par l'Assemblée de l'OACI. Néanmoins, ces mesures ne sont pas prises en compte lors de la construction des scénarios de décarbonation ; elles ne sont donc pas abordées ici.

2.1.2. Vers un net-zéro carbone théorique à l'horizon 2050

A partir de l'identification des grands leviers de décarbonation du trafic aérien évoqués précédemment, les acteurs du secteur aéronautique (industriels, organismes de recherche et étatiques, instances internationales) ont défini ce que l'on appelle des trajectoires ou scénarios de décarbonation. L'objectif est, de façon prospective, d'évaluer la pertinence des technologies de décarbonation envisagées, ainsi que la contribution respective des différents leviers évoqués pour la réduction des émissions de CO₂ du trafic aérien calculées à l'échelle mondiale.

On se focalise ici sur les scénarios de décarbonation proposés par le CORAC et les acteurs de la filière aéronautique française [1], dont l'ONERA. Par ailleurs, il ne s'agit pas d'entrer dans le détail de la construction de ces scénarios, même si des précisions sont fournies dans l'Annexe A. On retiendra cependant que ces scénarios sont au nombre de deux et qu'ils se projettent jusqu'à l'horizon 2050, comme illustré sur la Figure 2 qui montre l'évolution des émissions de CO₂ du trafic aérien mondial au cours du temps en tenant compte de l'apport progressif des différents leviers de décarbonation envisagés. Concernant les principales hypothèses ayant permis de construire ces scénarios, il a été supposé un retour du trafic au niveau de 2019 vers 2024-2025, suivi d'une croissance annuelle du trafic de 3,5% jusqu'en 2050 (soit une croissance annuelle moyenne de 3% lissée sur 2018-2050). La durée de vie moyenne des avions a été supposée égale à 20 ans ; c'est un paramètre important car il gouverne le taux de renouvellement des flottes d'appareils et la vitesse de pénétration des futures générations d'appareils et donc des technologies de décarbonation. La principale différence entre ces deux scénarios est la vitesse de pénétration de l'avion à hydrogène dans la flotte mondiale (2045 pour le scénario S1 mais dès 2035 pour le scénario S2). Cette technologie ne concernerait que les avions régionaux et courts-moyens courriers (SMR, *Short Medium Range*) pour des questions de dimensionnement des réservoirs.

Si on analyse ces scénarios, on constate qu'ils convergent tous les deux vers une diminution des émissions de CO₂ du trafic aérien de l'ordre de 92-94% par rapport à un scénario de référence dans lequel le trafic continuerait de croître mais sans aucune évolution ni des technologies ni des fonctionnements opérationnels par rapport à ce qu'ils sont actuellement (« Renouvellement avec technologie 2018 »). En ce qui concerne la contribution de l'amélioration de l'efficacité énergétique des appareils, elle est estimée à 20-21% de la diminution totale des émissions. Elle est plutôt équitablement répartie sur l'ensemble des segments de la flotte, même si on espère un gain de performances un peu supérieur pour les SMR dont les vols représentent environ la moitié des émissions du trafic mondial. Ce gain de performances s'inscrit dans la continuité des améliorations des avions engagées depuis des décennies en termes d'efficacité énergétique. La contribution de l'optimisation des opérations aéroportuaires est quant à elle estimée à 10%. Pour la part restante en revanche, les deux scénarios diffèrent fortement avec une prédominance du rôle des bio- et électro-carburants dans la décarbonation des carburants aéronautiques dans le

⁴ Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx>.

cas du scénario S1 (CAD, Carburants d'Aviation Durables), avec une introduction progressive et relativement tardive de l'hydrogène. Au contraire, le scénario S2 repose pour sa part sur un usage plus massif de l'hydrogène comme carburant alternatif au kérosène, aboutissant à un rééquilibrage de la contribution des technologies H₂ par rapport à celles basées sur l'utilisation des bio- et électro-carburants. Pour les deux scénarios, il y a peu d'effets attendus sur la décarbonation du trafic aérien avant 2030 en raison de l'introduction progressive des bio- et électro-carburants. De même, l'effet de la plus grande sobriété des futures générations d'appareils ne se fera sentir qu'à partir de 2035, date à laquelle elles entreront massivement en service pour remplacer les générations d'aéronefs actuelles.

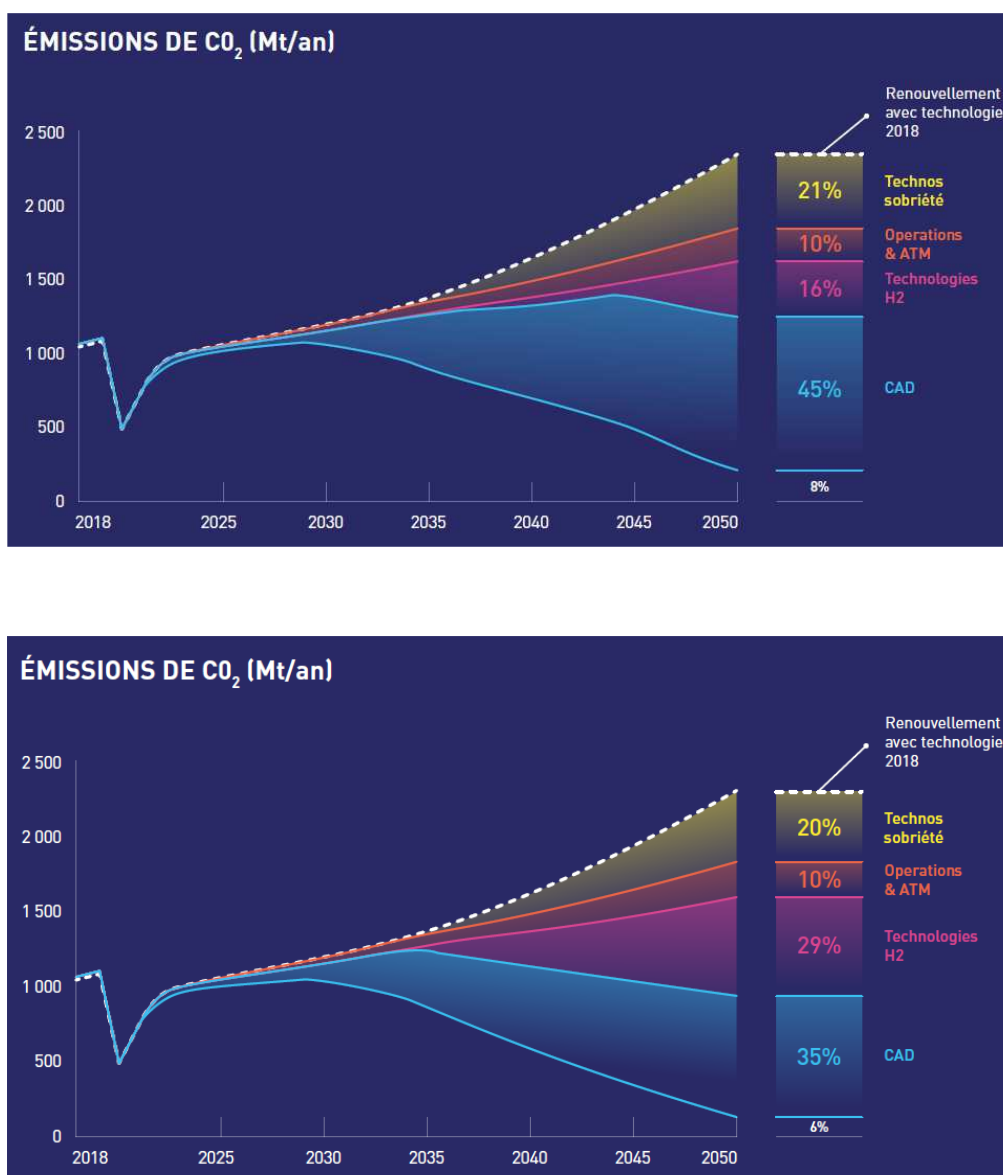


Figure 2 : Scénarios de décarbonation proposés par le CORAC. S1 figure du haut et S2 figure du bas [1].

Sur la base des hypothèses formulées (cf. Annexe A), ces scénarios permettent d'aboutir aux besoins en termes de capacités de production de carburants affichés dans le Tableau 2. Concernant les émissions résiduelles, il est prévu de les compenser par différents mécanismes de compensation carbone afin d'atteindre l'objectif net-zéro carbone en 2050.

	Technologie 2018 (référence)	Scénario S1	Scénario S2
Besoins en carburants en 2050 (Mt.an ⁻¹)	Kérosène : 612	Bio-carburants : 198 Electro-carburants : 121 Hydrogène : 35	Bio-carburants : 100 Electro-carburants : 141 Hydrogène : 66
Emissions de CO ₂ en 2050 (Mt.an ⁻¹)	2400	190	135

Tableau 2 : Projection des scénarios S1 et S2 en termes de consommations de carburants et d'émissions de CO₂ annuelles à l'horizon 2050 [1].

2.1.3. Efficacité des scénarios de décarbonation

Dans son rapport, le CORAC propose une analyse détaillée des résultats de ces deux scénarios [1]. Il étudie notamment la sensibilité à différents paramètres des projections en termes de réduction des émissions de CO₂ du trafic aérien à l'horizon 2050, comme le taux de croissance du trafic ou celui d'incorporation des carburants alternatifs. Il explore aussi l'effet d'une pénétration un peu moins importante que prévue de l'avion à hydrogène ; la technologie serait opérationnelle suivant les délais prévus mais les SMR à hydrogène représenteraient finalement une part moindre que prévue de ce segment. Si le fait de jouer sur ces curseurs change un peu les quantités respectives des différents carburants prévues d'être utilisées à l'horizon 2050, ainsi que la quantité des émissions de CO₂ résiduelles, cela ne bouleverse par les grandes conclusions de cette étude.

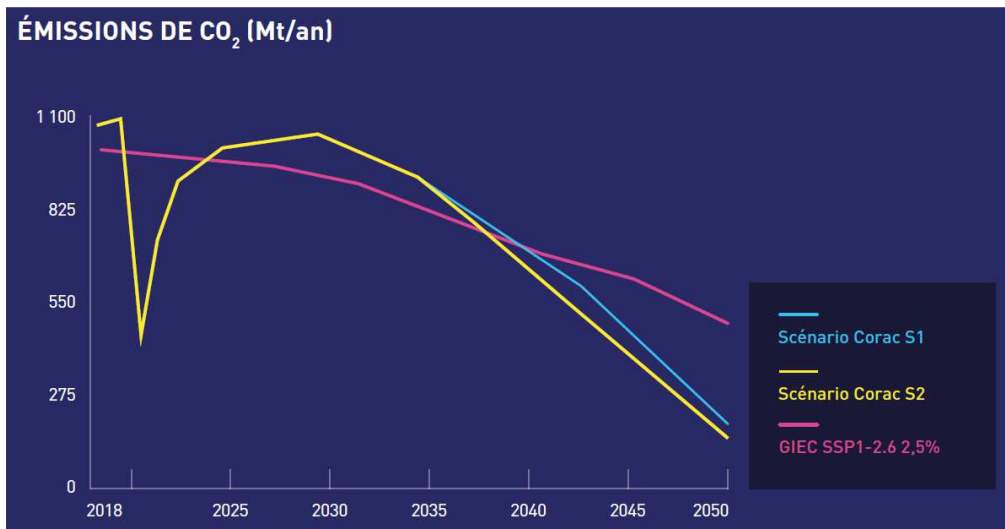


Figure 3 : Comparaison des scénarios du CORAC avec le scénario SSP1-2.6 du GIEC à l'horizon 2050, en conservant la part de l'aérien dans les émissions de GES mondiales comme actuellement (2,5%) [1].

En effet, les deux scénarios proposés permettent d'atteindre des quantités de CO₂ émis résiduelles représentant de l'ordre de 15% des émissions actuelles (environ 1100 MtCO₂.an⁻¹ en 2019 en considérant tout le cycle de vie des carburants [2]). De tels scénarios seraient même compatibles avec le scénario SSP1-2.6 du GIEC en termes de cumul des émissions de CO₂ du trafic aérien d'ici 2050 (prévoyant de rester sous les 2°C d'augmentation des températures d'ici 2100, <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>), tout en positionnant le secteur sur des trajectoires de réduction des émissions plus rapides à terme (cf. Figure 3). En termes de comparaison avec d'autres scénarios de

décarbonation du transport aérien disponibles dans la littérature [2], [9], [10], les scénarios du CORAC aboutissent à des tendances similaires [1].

2.2. L'ONERA et le projet ENERGIA

2.2.1. Rôle de l'ONERA

L'ONERA (Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales) est un organisme de recherche ayant le statut d'EPIC (Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial). Il est composé de 1800 salariés environ, dont les deux tiers de personnels scientifiques et techniques. Il accueille aussi de l'ordre de 250 doctorants au sein de ses équipes.

L'ONERA a en particulier pour missions de développer et d'orienter les recherches dans les domaines aérospace et de défense, d'où son rôle majeur dans l'établissement des scénarios de décarbonation évoqués précédemment. L'ONERA est aussi très impliqué dans l'exécution de ces recherches par le biais des nombreuses études qu'il réalise au sein des sept Départements de recherche qui le composent : Aérodynamique, Aéroélasticité, Acoustique (DAAA), Electromagnétisme et Radar (DEMUR), Matériaux et Structures (DMAS), Multiphysique pour l'Energétique (DMPE), Optique et Techniques Associées (DOTA), Physique, Instrumentation, Environnement, Espace (DPHY), et Traitement de l'Information et Systèmes (DTIS). Ces Départements sont regroupés au sein de la Direction Technique et des Programmes (DTP).

En parallèle de la DTP, l'ONERA dispose d'une Direction Scientifique et de la Prospective (DSP). La DSP se subdivise elle-même en une Direction Scientifique Générale (DSG), en charge de préparer la politique scientifique à long terme de l'ONERA et d'assurer l'insertion des programmes annuels et pluriannuels dans le cadre de cette politique, et le Centre de Prospective et de Veille Aéronautique (CPVA). Ce centre a pour vocation de réaliser des missions, en amont des études menées dans les départements scientifiques, afin d'imaginer et d'évaluer les concepts futurs et innovants, tant pour les avions eux-mêmes que pour l'insertion de l'avion dans son environnement aéroportuaire. Le CPVA réalise ses missions *via* des études prospectives et de veille pluridisciplinaire en organisant le travail de groupes d'ingénieurs sur les thématiques nouvelles à explorer.

2.2.2. Projet ENERGIA

Comme cela a été évoqué en introduction de ce chapitre, l'ONERA a joué un rôle moteur dans la définition des scénarios de décarbonation du trafic aérien établis par le CORAC [1]. En parallèle, le CPVA a piloté le projet ENERGIA « Evaluation des Nouvelles Energies Décarbonées pour l'Aéronautique » [22]–[24], réalisé en partenariat avec Airbus, Dassault Aviation et Safran. Ce projet avait pour ambition d'évaluer les nouvelles énergies décarbonées pour l'aéronautique en termes de maturité des chaînes d'approvisionnement (disponibilité des technologies de production et des ressources), de capacités et de coûts de production. Dans cette optique, différentes énergies possibles ont été considérées telles que les bio- et électro-carburants, le méthane et l'hydrogène comprimés (gazeux) ou liquéfiés.

Parmi les bio-carburants, différentes sources de biomasse ont été évaluées mais celles qui s'avèrent les plus performantes en termes de diminution des émissions de CO₂ associées à leur production sont les résidus lignocellulosiques (*i.e.* issus des déchets du bois) ainsi que les déchets municipaux. Seuls ces déchets permettent d'obtenir des diminutions des émissions de CO₂ de 90% voire plus, tout en minimisant d'éventuels changements

d'usage des sols qui sont souvent le point faible des bio-carburants en termes d'impacts environnementaux. En ce qui concerne les ordres de grandeur, les chiffres de 198 Mt.an⁻¹ et 100 Mt.an⁻¹ avancés précédemment pour les scénarios S1 et S2 (cf. Tableau 2) sont à mettre en perspective des disponibilités escomptées de bio-carburants, estimées pour les transports entre 230 Mt.an⁻¹ et 680 Mt.an⁻¹ selon les études [22]. On perçoit donc que certains conflits d'usage pourraient avoir lieu autour des bio-carburants entre secteurs des transports, surtout que le secteur de l'énergie risque d'être lui aussi très demandeur de biomasse pour la production de chaleur *via* les biogaz obtenus par méthanisation ou pyro-gazéification. Même si les scénarios de décarbonation du trafic aérien ont plutôt été construits sur des hypothèses raisonnables en termes de disponibilité des bio-carburants pour l'aérien, on voit que dans le cas du scénario S1 la disponibilité des bio-carburants pourrait devenir problématique si on se base sur les prédictions de disponibilité de la biomasse les plus pessimistes.

Concernant les électro-carburants, cette voie apparaît aussi comme prometteuse car, sur l'ensemble de leur cycle de vie, ces carburants de synthèse peuvent laisser espérer un gain en termes de diminution des émissions de CO₂ de l'ordre de 90% en fonction du mix électrique [23]. De plus, comme cela a déjà été évoqué, ces carburants ne nécessitent aucune adaptation technologique des moteurs d'avion et les technologies sont matures. La question de leur utilisation massive serait donc davantage une question réglementaire et surtout économique. En effet, les électro-carburants sont synthétisés à partir d'eau, d'électricité et de CO₂. Pour pouvoir atteindre les gains mentionnés ci-dessus en termes de réduction des émissions de CO₂, il faut donc disposer d'électricité décarbonée et de CO₂ capturé sur des sources concentrées (directement en sortie d'infrastructures industrielles), ce qui entraîne des surcoûts par rapport au kérosène classique. Concernant le mix électrique considéré pour estimer l'empreinte carbone à terme de ce procédé il s'agit du scénario net-zéro de l'IEA, soit 40% d'électricité éolienne, 40% de photovoltaïque, 10% de nucléaire et 10% d'hydroélectricité [3], [23]. Ce scénario suppose donc que l'on arrive à décarboner complètement ou presque la production d'électricité mondiale ; il s'agit là d'un point faible pour ces carburants. A titre de comparaison, en 2019 le mix électrique mondial était d'origine carbonée à 63% [11].

Le cas de l'hydrogène présente des similarités avec celui des électro-carburants dans la mesure où il est une ressource intermédiaire nécessaire pour les synthétiser. Sous l'hypothèse du même mix électrique net-zéro de l'IEA, des gains en termes de réduction des émissions de CO₂ de l'ordre de 90% peuvent être espérés là encore. De plus, contrairement aux électro-carburants, la production d'hydrogène ne nécessite très majoritairement que de l'eau et de l'électricité ; il est aussi possible d'en faire par craquage du biométhane notamment. L'hydrogène pourrait donc être meilleur marché que les électro-carburants. En revanche, comme évoqué précédemment, des inconnues persistent concernant les capacités de production à terme et les rendements des électrolyseurs. Même si des rendements de 90% sont espérés pour certaines technologies d'électrolyseurs, à l'heure actuelle l'électrolyse alcaline (la seule technologie présentant un TRL de 9, *Technology Readiness Level*, et reposant sur le principe oxydo-réductif des piles chimiques classiques) présente des rendements de l'ordre de 70% [22], [23]. Dans l'optique de produire de l'hydrogène liquide il faudrait en plus une étape de liquéfaction très énergivore venant fortement impacter le rendement de chaîne globale de production de l'H₂ liquéfié. En outre, la production actuelle d'hydrogène s'élève à seulement 120 Mt.an⁻¹ et repose à 96% sur des ressources fossiles. Produire 66 Mt par an d'hydrogène décarboné comme le suggère le scénario S2 (cf. Tableau 2) nécessiterait donc d'augmenter la production annuelle d'hydrogène de près de 55% et pourrait poser la question sous-jacente de pourquoi ne pas d'abord utiliser cet hydrogène décarboné pour ses usages actuels dans l'industrie chimique (80% pour la production d'ammoniac) [32]. En outre, ce chiffre ne tient pas compte du besoin intermédiaire de production d'H₂ décarboné pour la synthèse

des électro-carburants ; ce risque de conflits d'usage pourrait donc être accru et apparaître dès l'introduction des électro-carburants.

Une voie complémentaire, celle du méthane soit issu de la biomasse par méthanisation ou pyro-gazéification, soit de synthèse *via* des processus *Power-to-Gas* équivalents à ceux *Power-to-Liquid* utilisés dans le cas des électro-carburants, a été envisagée [22], [23] (cf. Tableau 1). L'intérêt du méthane par rapport à l'hydrogène est que sa densité énergétique (produit de son pouvoir calorifique massique par sa masse volumique) est beaucoup plus proche de celle du kérosène, et sa température de liquéfaction est beaucoup moins basse⁵. Le dimensionnement de réservoirs à méthane sur les avions serait donc moins contraignant que celui de réservoirs à hydrogène. De plus, les réseaux de transport et de stockage existent déjà. Du point de vue technologique, la production de méthane de synthèse « décarboné » (c'est-à-dire, neutre en carbone sur l'ensemble de son cycle de vie) présente les mêmes problématiques que dans le cas de la production d'électro-carburants, à savoir la nécessité d'avoir de l'électricité décarbonée et de recourir à la capture du CO₂. Un point de vigilance concernant le méthane réside dans les éventuelles fuites des systèmes de stockage et de transport. Le Pouvoir de Réchauffement Global (PRG) du méthane sur 100 ans est en effet 25 fois supérieur à celui du CO₂ sur la même période (https://fr.wikipedia.org/wiki/Potentiel_de_r%C3%A9chauffement_global) ; cela signifie que, sur une durée de 100 ans, 1 kg de méthane dans l'atmosphère contribuera autant au forçage radiatif que 25 kg de CO₂. En outre, l'utilisation du méthane pour faire voler les avions risquerait d'entraîner d'importants conflits d'usage avec le secteur de l'énergie et cette voie n'est donc pas envisagée pour l'instant.

MJ d'énergie investie par MJ de produit final

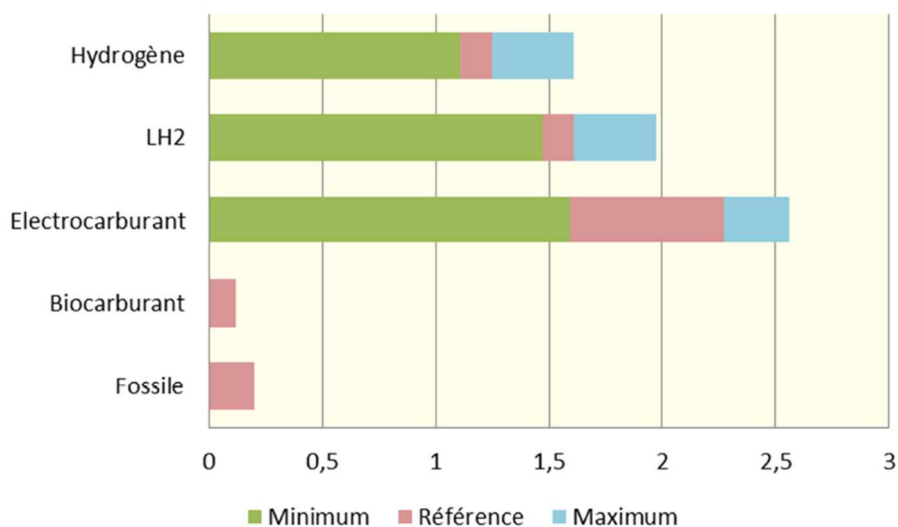


Figure 4 : Energie nécessaire à la production d'1 MJ de combustible (LH2 dans la légende désigne l'hydrogène liquéfié) [23].

⁵ Sous forme gazeuse à 700 Bar la densité énergétique du méthane est de 23 GJ.m⁻³ et elle est de 33,6 GJ.m⁻³ environ sous forme liquéfiée (soit en dessous de -162,15°C). En comparaison la densité énergétique du kérosène est de 34,4 GJ.m⁻³. Par comparaison, sous forme gazeuse à 700 Bar la densité énergétique de l'hydrogène n'est que de 5 GJ.m⁻³. Elle n'est que de 8,5 GJ.m⁻³ dans le cas de l'hydrogène liquide, soit pour des températures inférieures à -253,15°C.

Sur la base des estimations des rendements de chaîne des productions énergétiques, les travaux réalisés dans le cadre du projet ENERGIA [22]–[24] ont permis d’aboutir aux résultats présentés dans la Figure 4. Ces résultats illustrent un des principaux points faibles des électro-carburants et de l’hydrogène liquéfié qui a rapidement été mentionné en introduction. Ces carburants nécessitent en effet d’importantes quantités d’électricité décarbonée et, contrairement aux bio-carburants, leur production nécessite davantage d’énergie qu’elle n’en apporte. Dans le cas des électro-carburants, ce ratio serait même d’un facteur deux environ. Envisager leur utilisation massive dans l’optique de décarboner le trafic aérien relie donc les trajectoires de décarbonation de l’aérien à l’évolution du mix électrique mondial et aux scénarios de la transition énergétique [3], [11]–[14]. Comme nous le verrons dans la suite de ce rapport, en termes d’analyse des besoins en ressources associés à la décarbonation du trafic aérien, et de criticité de ces ressources, il est donc indispensable de s’intéresser à la fois aux flottes d’appareils mais aussi à la production des carburants afin de bien appréhender le problème dans sa globalité.

En lien avec ce qui vient d’être évoqué, l’un des intérêts des travaux réalisés dans le projet ENERGIA [22]–[24] a été d’aller jusqu’à quantifier les besoins de production d’électricité décarbonée associés aux trajectoires de décarbonation du trafic aérien par voie de production d’électricité décarbonée, en tenant compte des projections de déploiement des technologies et d’évolution du mix électrique conformément aux prévisions des scénarios de la transition énergétique [3], [11]–[14]. Les filières de production considérées ont été le nucléaire, le photovoltaïque, les éoliens *on-shore* et *off-shore*, et l’hydraulique. Les filières moins matures ou apparaissant comme plus marginales comme la production d’électricité marine (houlomotrice par exemple) ont été négligées. Parmi les filières considérées, on mettra aussi à part le cas de l’hydroélectricité dont les perspectives d’évolution sont très faibles compte tenu du fait que le potentiel électrique de la majeure partie des grands cours d’eau mondiaux est presque en totalité exploité. Dans l’optique de quantifier les besoins en ressources associés au déploiement des technologies de production d’électricité décarbonée, prendre en compte l’hydroélectricité apparaît donc comme faiblement pertinent. Son intérêt réside dans le fait qu’elle contribue à diminuer d’autant les besoins de déploiement des quatre autres filières (nucléaire, photovoltaïque, éoliens terrestre et en mer).

Afin de fixer des ordres de grandeur, pour réduire les émissions de CO₂ du trafic aérien d’environ 90% comme proposé dans les scénarios S1 et S2, la consommation électrique totale indirectement imputable à l’aviation devraient être comprise entre 21,2 et 33,8 EJ.an⁻¹ en fonction de l’introduction ou non de l’hydrogène comme carburant (un scénario sans hydrogène conduisant à un accroissement de cette consommation d’environ 21% à 25% en raison du ratio énergie consommée vs. énergie produite plus élevé des électro-carburants, cf. Figure 4). On notera que ces chiffres supposent que l’efficacité énergétique de l’avion à hydrogène sera équivalente à celle de l’avion utilisant des carburants classiques, décarbonés ou non. Il s’agit là d’une hypothèse à ce jour, l’avion à hydrogène restant à inventer. Mais, même dans ce cas, on voit que cette projection de consommation pour le seul trafic aérien est du même ordre de grandeur que la prévision de croissance de la production d’électricité décarbonée envisagée par l’IEA dans ses scénarios à l’horizon 2050, de l’ordre de 41,4 EJ.an⁻¹ [3] ; à titre de comparaison la production mondiale d’électricité en 2019 a été de 97,0 EJ [3]. Qui plus est, les scénarios de l’IEA ne prennent pas en compte les besoins pour l’aérien qui pourraient donc augmenter le besoin de nouvelle production d’électricité décarbonée de l’ordre de 50% à 80% environ suivant les scénarios.

2.3. Choix d'un système d'étude

Sur la base des précédents travaux menés par le CORAC et le CPVA [1], [22]–[24], comme point de départ de cette étude nous avons choisi de considérer le « système avion » comme système de référence. Par système avion il faut entendre l'ensemble de la flotte d'avions en elle-même mais aussi l'ensemble des infrastructures énergétiques nécessaires pour produire les carburants consommés par cette flotte d'avion, comme illustré Figure 5.

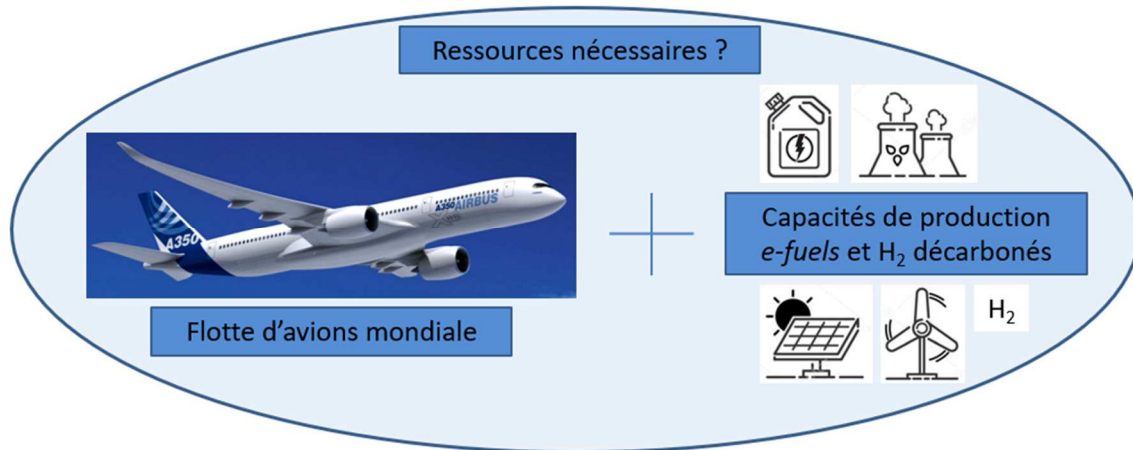


Figure 5 : Schématisation du système avion retenu pour cette étude.

Les scénarios de décarbonation retenus ici vont tout d'abord nécessiter un renouvellement partiel de la flotte d'aéronefs à l'horizon 2035 et un renouvellement complet à l'horizon 2050, renouvellement qui s'accompagnera d'une augmentation du nombre d'appareils en service afin de répondre aux projections d'augmentation du trafic. Les scénarios nécessiteront donc la construction de nombreux appareils.

En outre, l'utilisation de l'électricité comme énergie secondaire pour la production des électro-carburants et de l'hydrogène représente une vraie rupture en termes d'utilisation des ressources pour la production des carburants aéronautiques. En lien direct avec l'ensemble des scénarios de la transition énergétique qui tablent tous sur une très forte augmentation de la part de l'électricité dans le mix énergétique [3], [11]–[14], il est donc apparu indispensable d'inclure ces nouveaux besoins en ressources dans notre étude. Ceci d'autant plus que la question de la disponibilité de certaines ressources comme le cuivre, le lithium, le cobalt^{6,7} ou certaines terres rares est déjà posée par les projets d'électrification de nombreux usages [16]–[20], [33]–[37]. En revanche, du point de vue des besoins en infrastructures industrielles et en électricité décarbonée, les besoins associés au développement des bio-carburants semblent négligeables en regard de ceux associés au développement des électro-carburants et de l'hydrogène. Les enjeux pour les bio-carburants concernent davantage des questions d'usage des sols et de disponibilité de la biomasse ; ces carburants ne sont donc plus considérés dans la suite de cette étude.

⁶ Cela est précisé plus loin dans ce rapport mais, à titre d'information, le cuivre, le lithium et le cobalt entrent dans la composition de différents alliages ou superalliages aéronautiques.

⁷ Pour le confort des lecteurs les moins familiers des symboles chimiques des éléments, régulièrement utilisés tout au long de ce rapport par souci de concision en particulier dans les tableaux et figures, une classification périodique des éléments est fournie en Annexe B.

Afin de définir précisément le périmètre d'étude, différentes hypothèses ont été formulées :

- Toutes les technologies envisagées sont supposées être matures en temps et en heure. Concernant les bio- et électro-carburants, ou encore les différentes voies de production d'électricité décarbonée (solaire, éolien et nucléaire), cette hypothèse est tout à fait réaliste car des unités de production industrielles sont déjà opérationnelles pour chacune de ces énergies. C'est en revanche une hypothèse qui peut être discutée dans le cas de la production et surtout du stockage d'hydrogène liquide décarboné pour lesquels le niveau de TRL en est plutôt aux stades de la faisabilité et du démonstrateur (TRL 4-7). Selon l'IRENA [38], la demande en H₂ vert à l'horizon 2050 serait de 240 Mt.an⁻¹, alors que la production mondiale d'H₂ en 2019 n'a été que de 120 Mt et sous forme d'hydrogène gris à près de 96%. On considèrera que l'incertitude qui pèse sur l'avion à hydrogène est déjà prise en compte dans les scénarios de décarbonation en envisageant seulement 2045 pour le déploiement des SMR à hydrogène dans le scénario S1, contrairement à 2035 pour celui S2 ;
- Du point de vue économique, on suppose qu'il n'y aura aucun problème de financement des développements et des déploiements des technologies concernées, ce qui est une hypothèse très forte. En effet, si la question des politiques d'investissement nécessaires pour mener à bien la transition environnementale n'est pas l'objet de ces travaux, les rapports de l'IRENA font état de 5686 milliards de dollars par an d'investissements nécessaires sur la période 2021-2030, puis 3696 milliards de dollars par an sur la période 2031-2050 [13], [14]. Pour comparaison, en 2019 cet investissement n'a été que de 2106 milliards de dollars. Plus inquiétant, les prévisions d'investissement des politiques gouvernementales des états ne sont que de 3537 milliards de dollars par an sur la période 2021-2030, puis de 3140 milliards de dollars par an sur la période 2031-2050, ce qui devrait induire un retard important dans la transition environnementale ;
- L'augmentation de la flotte d'avions ne nécessitera pas un grossissement significatif des moyens de production des aéronefs. De même, pour la production des électro-carburants on considère qu'ils viendront plutôt en substitution du kérosène dans les raffineries (comme c'est le cas pour les bio-carburants actuellement). Il n'y a donc pas de constructions d'infrastructures industrielles à prévoir dans ce cas. Les consommations d'énergie associées à la fabrication des aéronefs sont elles aussi négligées à ce stade. En revanche, il est important de tenir compte de la nécessaire construction d'infrastructures de production d'électricité et d'hydrogène décarbonés (centrales nucléaires, fermes photovoltaïques, champs d'éoliennes, électrolyseurs ...) selon les scénarios de la transition énergétique [11]–[14] ;
- Même si elles sont évoquées dans les scénarios de décarbonation du trafic aérien et de l'énergie, notamment pour la production d'hydrogène bleu, nous ne nous intéressons pas aux technologies de capture et de séquestration du carbone (*Bio-Energy Carbon Capture and Storage*, BECCS) pour lesquelles les niveaux de TRL sont encore dans l'ensemble assez éloignés de l'industrialisation. De plus, leur efficacité peut être débattue surtout pour la capture du carbone dispersé dans l'atmosphère (*Direct Air Carbon Capture and Storage*, DACCS) et non concentré en sortie d'installations industrielles, voire sujette à controverse lorsque l'on évoque la réaffectation de l'usage des sols (*Induced Land Use Change*, ILUC) pour la capture du carbone [37] ; c'est un verrou supplémentaire qui mériterait d'être abordé spécifiquement.

Une fois le périmètre d'étude défini, la question que l'on doit se poser est celle de la mise en œuvre concrète des scénarios de décarbonation.

2.4. Matérialisation des trajectoires de décarbonation

2.4.1. Segmentation de la flotte d'avions mondiale

Avec l'aide de X. Vancassel, collègue au CPVA, nous nous sommes attachés à matérialiser la mise en œuvre des scénarios de décarbonation en termes de nombres d'avions à produire et de capacités de production d'énergie à déployer à l'horizon 2050. Les travaux menés dans le cadre du projet ENERGIA ayant été réalisés en parallèle de l'établissement des scénarios du CORAC [1], une harmonisation et une actualisation des données ont été nécessaires dans le cadre de cette étude, expliquant les faibles écarts qui peuvent être observés avec certaines des données évoquées dans les sections précédentes. Ainsi, le taux de croissance moyen considéré a été de 3,1% au lieu de 3% sur la période 2018-2050 [10]. De la même façon, sans entrer dans le détail des justifications qui sont fournies dans les travaux d'ENERGIA [22]–[24], différentes hypothèses ont été considérées pour les rendements des infrastructures de production des carburants et leurs taux de charge, *i.e.* le ratio entre leur production annuelle réelle et celle théorique si elles fonctionnaient 100% du temps à pleine capacité.

Concernant la segmentation de la flotte d'appareils, comme cela est évoqué dans l'Annexe A, dans les scénarios de décarbonation elle est supposée se composer de deux avions régionaux, deux SMR, deux longs courriers. Le second long courrier est même parfois considéré être un très gros porteur du type de l'Airbus A380. Cependant, étant donné l'incertitude qui plane autour de la remise en service de ce type d'appareils (retirés du service par manque de rentabilité avant la pandémie de la Covid 19 et réaffrétés tout récemment pour faire face au rebond de reprise du trafic « post-Covid »), et le fait que les prévisions de livraison ne sont que de l'ordre de la dizaine d'unités annuellement, il a été décidé d'assimiler les très gros porteurs à des longs courriers standards. De la même manière, le fait de considérer deux SMR permet de considérer des capacités d'emport de passagers et des rayons d'action légèrement différents en fonction des appareils. Il en est de même pour les avions régionaux, ce qui permet de mieux rendre compte de la composition des flottes d'avions et de la déclinaison des gammes d'appareils. Néanmoins, en termes de quantification des empreintes matières par la suite, nous ferons l'hypothèse que l'avion de type SMR peut représenter une bonne approximation de l'empreinte moyenne d'un aéronef. Nous reviendrons sur ce point dans le Chapitre 3. Par ailleurs, les scénarios de décarbonation ont été construits sur la période 2018-2050 mais nous n'avons pris en compte que les futurs besoins en appareils, soit sur la période 2023-2050, ce qui fait un différentiel de 5531 appareils. En revanche, cela n'a aucun impact sur les besoins en électricité décarbonée et en hydrogène, les *e-fuels* ne devant être utilisés qu'à partir de 2030 et l'hydrogène liquéfié à partir de 2035 au plus tôt. Par ailleurs, on observera que l'évolution de la flotte des appareils est indépendante du scénario de décarbonation considéré, contrairement aux besoins en énergies. Il va ainsi falloir construire 83130 appareils à l'horizon 2050 comme cela est détaillé un peu plus loin dans la Section 2.4.3.

2.4.2. Choix d'un mix de capacités de production électrique à déployer

Etablir un mix de développement des capacités de production d'électricité décarbonée a nécessité davantage d'hypothèses. En effet, si tous les scénarios pour la transition énergétique s'accordent sur le fait que les capacités de production d'hydroélectricité évolueront peu, ou que des solutions telles que l'électricité marine ou obtenue par géothermie resteront marginales, les contributions respectives du nucléaire, de l'éolien et du photovoltaïque sont âprement discutées [3], [11]–[14].

Par exemple, en tenant compte des taux de charge des différentes installations de production et des prévisions de croissance de la demande en électricité décarbonée, le scénario net-zéro de l'IEA prévoit qu'il serait nécessaire d'installer 15 GW de nucléaire, 190 GW d'éolien et 475 GW de photovoltaïque par an jusqu'en 2070 pour espérer limiter le réchauffement climatique à 1,5°C à l'horizon 2100 [3]. Le nucléaire ne représenterait donc que 2% environ des capacités de production à installer dans le futur pour produire de l'électricité décarbonée, contre 28% pour l'éolien et 70 % pour le photovoltaïque. On notera au passage que, en 2019, seulement 5 GW de nucléaire, 60 GW d'éolien et 108 GW de photovoltaïque ont été installés à l'échelle mondiale, soit 3 à 4,4 fois moins que ce qu'il faudrait installer. Ceci semble confirmer le très fort risque de sous-investissement financier, ou de sous-capacité d'installation, qui pèse sur la vitesse de mise en œuvre des scénarios de la transition énergétique.

En parallèle des scénarios internationaux, RTE a proposé six scénarios à l'échelle de la France allant de l'absence complète de nucléaire pour trois d'entre eux à une part plus ou moins importante de celui-ci pour les trois autres [39] ; pour chacun de ces scénarios, RTE propose une version « sobriété » et une version « réindustrialisation profonde » mais qui ne sont pas abordées ici. Si on considère le scénario N1, qui parmi les trois scénarios « nucléaires » proposés est celui qui table sur la diminution la plus significative de la part du nucléaire au profit des énergies renouvelables (essentiellement solaire et éolien), il prévoit un déploiement des capacités de production d'électricité décarbonée à l'horizon 2050 reposant à 6% sur le nucléaire, 20% sur l'éolien terrestre, 22% sur l'éolien en mer et 52% sur le photovoltaïque. D'une puissance électrique actuelle installée en France de 116,1 GW (63,1 GW de nucléaire, 25,5 GW d'hydraulique, 16,5 GW d'éolien terrestre uniquement, 9,4 GW de solaire et 1,6 GW de bioénergies), on passerait en 2050 à une puissance installée de 281,7 GW (28,7 GW de nucléaire dont 13,2 GW de nouveau nucléaire, 30,1 GW d'hydraulique, 58,0 GW d'éolien terrestre, 45,0 GW d'éolien en mer, 118,0 GW de solaire et 1,9 GW de bioénergies).

Si on considère maintenant un dernier scénario, le N3 de RTE, il prévoit quant à lui un déploiement des capacités de production d'électricité décarbonée reposant à 17% sur le nucléaire, 21% sur l'éolien terrestre, 17% sur l'éolien en mer et 45% sur le solaire photovoltaïque. Il s'agit du scénario de RTE dans lequel le nucléaire conserve le rôle le plus important pour un objectif de puissance installée de 218,6 GW en 2050 (51,6 GW de nucléaire dont 27,3 GW de nouveau nucléaire, 30,1 GW d'hydraulique, 43,0 GW d'éolien terrestre, 22,0 GW d'éolien en mer, 70,0 GW de solaire et 1,9 GW de bioénergies).

Pour tenir compte de la variété de ces scénarios, nous avons donc considéré le mix suivant de puissances à installer pour couvrir les besoins de production d'électricité nécessaires à la décarbonation du trafic aérien : 10% nucléaire, 20% éolien terrestre, 18% d'éolien en mer et 52% photovoltaïque. On notera que ce mix n'est pas un mix énergétique qui, lui, doit tenir compte des taux de charge des différentes installations (supposés égaux à 0,7 pour le nucléaire, 0,25 pour l'éolien terrestre, 0,4 pour l'éolien en mer et 0,15 pour le photovoltaïque). Ce mix de puissances à installer doit en outre permettre de produire de l'ordre de 18 à 25 EJ.an⁻¹ de consommation d'énergie électrique selon les scénarios S1 ou S2 à l'horizon 2050. Les chiffres des puissances à installer qui en résultent sont détaillés dans la section suivante.

On observera que, même si tout l'enjeu ici était de définir un mix de capacités de production d'électricité décarbonée pertinent, par la suite qu'il faudra aussi considérer les besoins en infrastructures pour l'acheminement de cette électricité, ainsi que son stockage dans le cas des énergies renouvelables intermittentes que sont l'éolien et le photovoltaïque.

2.4.3. Chiffres clés des trajectoires de décarbonation

Sur la base des hypothèses précédentes, la traduction concrète des trajectoires de décarbonation en nombres d'appareils à construire et en quantités et types d'infrastructures de production d'énergies décarbonées à déployer donne les chiffres fournis dans le Tableau 3. Dans ce tableau, pour les flottes R, SMR et LR désignent respectivement l'avion régional, *small and medium range* et *long range* (long courrier). % renouv. désigne la part du remplacement des appareils en fin de vie, le complément correspondant aux appareils ajoutés pour répondre à l'augmentation prévue du trafic aérien. Pour les énergies, N, ET, EM et P désignent respectivement le nucléaire, l'éolien terrestre, l'éolien en mer et le photovoltaïque.

Si l'on revient sur le chiffre de 83130 avions à construire à l'horizon 2050 et qu'on le met en regard des 33299 avions qui constituent la flotte actuellement (<https://www.atag.org/facts-figures.html>, il n'est pas précisé si ce chiffre n'englobe que la flotte commerciale ou s'il inclut aussi l'aviation d'affaires), il va falloir construire 2,5 fois la flotte actuelle d'avions sur la période 2023-2050. C'est un ratio élevé et difficile à intuituer. Il s'explique par le fait que, en supposant une durée de vie moyenne de 20 ans, sur la période étudiée il va falloir non seulement renouveler l'ensemble de la flotte actuelle, mais tous les avions qui auront été renouvelés avant 2030, de l'ordre de 8500, devront l'être une seconde fois entre 2044 et 2050. Si on ajoute à cela une croissance du trafic aérien de 3,1% par an sur la période, en appliquant ce taux de croissance à la flotte d'avions cela signifie qu'elle va plus que doubler en 28 ans (une croissance annuelle de la demande de 3% implique un doublement tous les 25 ans environ). En outre, tous les avions supplémentaires introduits avant 2031 devront eux aussi être renouvelés sur la période, d'où ce ratio très élevé de 2,5. Il est par ailleurs compatible avec le ratio de 1,7 que l'on peut estimer à partir des prévisions d'Airbus concernant le nombre d'avions à construire d'ici 2041 (hors avions régionaux, segment sur lequel Airbus n'est pas présent), soit avec une décennie de moins de croissance de la flotte et sans avoir besoin de prendre en compte, ni le double renouvellement d'une partie de la flotte actuelle, ni le renouvellement partiel de la flotte supplémentaire (<https://www.ouest-france.fr/economie/transports/avion/le-nombre-d-avions-dans-le-monde-devrait-doubler-en-20-ans-selon-airbus-f78994fa-0145-11ed-9acd-64e50fce31e3>).

	Nombre d'avions à construire sur la période	Capacités de production d'énergie à déployer à terme sur la période	
	S1 et S2	S1	S2
2023 - 2035	30455 R : 8183 SMR : 19699 LR : 2573	N : 46,2 GW ET : 92,4 GW EM : 83,2 GW P : 240,3 GW H ₂ : 18,9 Mt.an ⁻¹	N : 76,0 GW ET : 152,0 GW EM : 136,8 GW P : 395,1 GW H ₂ : 31,5 Mt.an ⁻¹
2036 - 2050	52675 R : 14132 SMR : 34026 LR : 4517	N : 166,3 GW ET : 332,6 GW EM : 299,4 GW P : 864,8 GW H ₂ : 73,5 Mt.an ⁻¹	N : 216,6 GW ET : 433,2 GW EM : 389,9 GW P : 1126,4 GW H ₂ : 98,4 Mt.an ⁻¹
2023 - 2050	83130 R : 22315 SMR : 53725 LR : 7090 % renouv. : 51,7%	N : 212,5 GW ET : 425,0 GW EM : 382,6 GW P : 1105,1 GW H ₂ : 92,4 Mt.an ⁻¹	N : 292,6 GW ET : 585,2 GW EM : 526,7 GW P : 1521,5 GW H ₂ : 129,9 Mt.an ⁻¹

Tableau 3 : Chiffres clés des trajectoires de décarbonation en termes de nombre d'avions à construire et de capacités de production d'électricité et d'hydrogène décarbonés à installer.

Concernant les besoins en infrastructures de production d'électricité décarbonée à déployer à l'horizon 2050, le scénario S2, plus gourmand en électricité décarbonée car utilisant moins de bio-carburants (cf. Tableau 2), nécessitera la construction de 177 réacteurs nucléaires, 195066 éoliennes terrestres, 52670 éoliennes *off-shore* et 1268 fermes photovoltaïques. Les puissances moyennes supposées des installations sont de 1,65 GW pour un réacteur nucléaire, 3 MW pour une éolienne terrestre, 10 MW pour une éolienne en mer et 1,2 GW pour une centrale photovoltaïque [22]–[24]).

En considérant la moyenne des besoins calculée sur les scénarios S1 et S2, les capacités de production d'électricité décarbonée à déployer nécessiteront une mise en production annuelle de nouvelles infrastructures, rien que pour l'usage de l'aérien, représentant de l'ordre de 45% dans le cas du photovoltaïque, à 187% dans le cas du nucléaire des capacités de production installées en 2019. Le besoin de mise en service d'installations annuel sera en outre 2,5 fois supérieur sur la période 2036-2050 que sur celle 2023-2035. En raisonnant à terme sur la période 2019-2050 (en extrapolant les scénarios de l'IEA sur la décennie 2041-2050 à partir de celle 2031-2040), les besoins en capacités de production à installer pour l'aérien représenteront entre 16% et 28% des capacités de production photovoltaïque prévues être installées en fonction du scénario de l'IEA considéré (soutenable ou « politiques des états ») [3]. Dans le cas du nucléaire, ces chiffres varient entre 86% et 247%. Il est important de garder à l'esprit que ces besoins doivent être considérés comme additionnels car non prévus dans les projections de l'IEA.

En ce qui concerne les besoins en hydrogène décarboné, on remarquera que les chiffres fournis dans le Tableau 3 sont bien plus élevés que ceux mentionnés dans le Tableau 2. Cela s'explique par le fait que les chiffres mentionnés ici correspondent au cumul des besoins en hydrogène pour la synthèse des électro-carburants et en hydrogène comme carburant, comme les chiffres de puissances électriques correspondent aux besoins totaux en électricité décarbonée. Les besoins en H₂ décarboné pour la synthèse des e-fuels représenteront ainsi entre 89% et 97% du besoin total en 2035 en fonction du scénario (S2 vs. S1), et entre 51% et 63% en 2050 ; plus on utilise d'hydrogène comme carburant moins on a besoin pour la synthèse des électro-carburants. Par la suite, les besoins en électrolyseurs pour la production d'hydrogène décarboné seront bien sûr à prendre en compte.

2.5. Premières observations concernant la mise en œuvre des trajectoires de décarbonation

A ce stade, on peut déjà retenir que, concernant la question des besoins en ressources minérales pour le transport aérien, le changement majeur qui pourrait résulter de la mise en œuvre des scénarios de décarbonation du trafic aérien concernera les infrastructures de production d'hydrogène décarboné et d'électricité décarbonée. En effet, les scénarios proposés reposent certes sur un renouvellement des flottes d'appareils et sur le développement d'avions toujours plus sobres en termes de consommation de carburants, mais cela s'inscrit dans une tendance de fond de l'évolution des flottes d'appareils. Et, même si les scénarios prédisent une augmentation du nombre d'appareils en service, il n'y a pas d'évolution soudaine à prévoir.

A contrario, si en termes de besoins d'infrastructures de production le remplacement partiel du kérosène par des bio-carburants ne devrait pas non plus entraîner de rupture significative, il en va tout autrement pour l'introduction progressive des électro-carburants, puis de l'hydrogène liquéfié à partir de 2035 ou 2045 selon les hypothèses. Comme les chiffres le montrent, le développement de ces carburants va nécessiter de recourir à un usage indirect massif d'électricité décarbonée ; cela représente une vraie rupture en termes de besoins en infrastructures nécessaires à la production des carburants. Cela va bien au-delà de la simple électrification de certaines opérations

aéroportuaires car cela lie complètement les scénarios de décarbonation du trafic aérien aux scénarios de transition énergétique et d'électrification des usages et, par conséquent, aux questions de tensions sur certaines ressources minérales qui y sont associées. Il en va de même concernant les capacités de production d'hydrogène décarboné à prévoir, qu'il s'agisse d'un usage direct pour l'avion à hydrogène ou d'un usage indirect pour la synthèse des électrocarburants. En outre, les capacités de production envisagées nécessiteront des capacités de mise en production annuelle de nouvelles infrastructures rien que pour l'usage de l'aérien qui, en plus d'être additionnelles, ne sont absolument pas anodines en regard des scénarios de la transition énergétique et des efforts de déploiement envisagés pour ces technologies.

Afin de nous interroger sur la faisabilité matérielle des scénarios de décarbonation du trafic aérien, nous cherchons donc par la suite à identifier les ressources minérales qui seront nécessaires à leur mise en œuvre, et à en quantifier les besoins. La question à laquelle il s'agit de répondre *in fine* est la suivante : faute de disponibilité de certaines ressources, le trafic aérien pourrait-il être amené à se décarboner moins ou moins vite que prévu ?

3. Ressources minérales nécessaires aux scénarios de décarbonation

L'objet de ce chapitre est d'identifier et de quantifier les besoins en ressources minérales qui seront nécessaires dans la perspective d'une mise en œuvre de l'un des deux scénarios S1 ou S2 évoqués précédemment. La question essentielle à laquelle il nous faut répondre à ce stade est : quelles sont les empreintes matières unitaires des différents sous-ensembles qui constituent notre système d'étude ? Il s'agit d'estimer les quantités de ressources utilisées par avion, ainsi que celles utilisées par MW de puissance d'une installation de production, d'acheminement et de stockage d'électricité décarbonée, ou encore celles utilisées par tonne d'H₂ décarboné produite. L'enjeu est en effet d'avoir une vision globale des ressources nécessaires à chacun des deux scénarios de décarbonation à l'échelle du système avion, afin de lister celles qui seront indispensables à la mise en œuvre des scénarios et, surtout, d'en estimer les quantités à partir des chiffres clés fournis précédemment (Section 2.4.3).

3.1. Empreinte matière unitaire des avions

Pour caractériser l'empreinte matière des avions, nous avons travaillé à définir des compositions modèles des différents alliages aéronautiques [40], ainsi que des bilans de masses des appareils [21], [41]–[43]. Les détails concernant l'obtention de ces compositions et de ces bilans sont fournis dans l'Annexe C et l'Annexe D, respectivement. Le bilan de masses fourni dans l'Annexe D est celui d'un A320 ancienne génération, celle qui est entrée en service à la fin des années 90 et qui équipe majoritairement la flotte mondiale actuelle. Comme cela est détaillé dans ces deux annexes, certaines hypothèses ont été formulées afin d'aboutir aux données qui sont présentées ci-dessous. Concernant les alliages aéronautiques, certains alliages ou éléments d'alliage utilisés en trop faibles quantités ont été négligés pour établir les compositions modèles. De même, le carbone présent en faible quantité dans les aciers n'a pas été pris en compte car généralement non souhaité du point de vue métallurgique. Dans le cas des bilans de masses, ce sont la part de l'avionique (l'ensemble des équipements électriques et électroniques) et les composites à matrice organique qui ont été négligés. Pour ces derniers, ils contribuent cependant indirectement dans la mesure où ils tendent à remplacer une part importante des alliages d'aluminium notamment ; ils vont donc impacter les empreintes matières des avions *via* les quantités des différents éléments entrant dans la composition des alliages qu'ils substituent.

Afin de tenir compte des évolutions technologiques qui ont eu lieu entre l'ancienne génération d'appareils et la nouvelle qui entre en service, notamment la forte augmentation de la part des CFRP (*Carbon Fibre Reinforced Composites*), l'empreinte matière d'un A320-néo a aussi été estimée grâce à différentes données obtenues sur internet. Ce qui est intéressant, c'est de constater que l'introduction des composites n'a pas forcément eu pour effet de réduire la masse de l'appareil ; un A320-néo pesant 40,3 t (https://fr.wikipedia.org/wiki/Airbus_A320), contre environ 37,7 t pour un A320 ancienne génération (*cf.* Tableau 31, Annexe D). Plusieurs pistes peuvent expliquer ce phénomène, les gains de masse engendrés par la substitution d'alliages métalliques par des matériaux composites pourraient avoir été compensés par une augmentation de la partie avionique (pour des raisons de sécurité et de confort), nécessitant davantage de batteries pour l'alimentation de ces équipements. On peut aussi imaginer un renforcement du confort acoustique des passagers en rajoutant des isolants phoniques. Une autre raison est liée à la capacité d'emport de passagers. Même si l'A320 et l'A320-néo affichent des gabarits similaires, l'A320-néo peut emporter jusqu'à 20 passagers supplémentaires ce qui, en termes de capacité de transport de passagers, le place finalement à mi-chemin entre l'A320 et l'A321 (dont la masse à vide est de 47,5 t).

Concernant le bilan de masses de l’A320-néo (<https://www.usinenouvelle.com/article/l-a350-xwb-premier-airbus-avec-plus-de-50-de-composites.N1874927>), il est composé de CFRP à 53% (21359 kg), d’alliages d’aluminium à 19% (7657 kg), d’aciers à 6% (2418 kg), d’alliages de titane à 14% (5642 kg), et de superalliages à 8% (3224 kg). L’A320 ancienne génération (cf. Tableau 31, Annexe D) est quant à lui composé de CFRP à 13,1% (4956 kg), d’alliages d’aluminium à 54,9% (20725 kg), d’aciers à 14,3% (5379 kg), d’alliages de titane à 10,1% (3806 kg), et de superalliages à 7,6% (2848 kg). Les CFRP ont donc bien remplacé en priorité les alliages d’aluminium, ainsi que les aciers dans une moindre proportion. En revanche, les parts des alliages de titane et des superalliages ont augmenté. Les empreintes matières unitaires obtenues pour chacun des deux aéronefs sont données dans le Tableau 4. L’analyse de ces empreintes matières confirme que, à l’exception du titane et de certains éléments d’alliage spécifiques aux alliages de titane et aux superalliages, l’introduction massive des CFRP a eu un effet majoritairement bénéfique concernant les besoins en ressources minérales des aéronefs.

On rappellera que les chiffres clés des trajectoires de décarbonation sont basés sur un découpage en trois segments de la flotte d’appareils pour tenir compte de son évolution à l’horizon 2050 : les avions régionaux, les courts et moyens courriers, et ceux longs courriers. Principalement en raison d’un manque de données disponibles concernant les bilans de masses des appareils de ces différents segments, nous avons fait l’hypothèse que le SMR type A320 (ancienne génération et néo) pouvait fournir une bonne estimation de l’empreinte matières moyenne d’un aéronef (ancienne et nouvelle générations). En effet, le segment SMR représente 65% environ de la flotte à construire. De plus, on peut envisager un équilibrage des quantités de matières entre les longs courriers plus gros et les avions régionaux plus petits. La plus grande différence pourrait résulter des motorisations, les avions régionaux étant très majoritairement équipés de turbopropulseurs (moteurs à hélice) et non de turbo réacteurs (moteurs à aubes) comme le sont les avions SMR et longs courriers.

A320	Al	Fe	Ti	Ni	Co	Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Zr
	19053,4	4305,5	3293,4	2076,6	447,9	694,3	367,9	635,3	62,5	939,0	40,1
Evolution	Si	Li	V	W	Mo	Sn	Nb	La	Re	Ta	
	104,2	51,8	145,3	58,4	315,5	19,0	107,8	2,1	11,4	19,0	
A320-néo	Al	Fe	Ti	Ni	Co	Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Zr
	7311,4	2219,1	4836,7	1925,5	292,8	256,5	135,9	239,4	24,8	796,3	47,5
	Si	Li	V	W	Mo	Sn	Nb	La	Re	Ta	
	45,9	19,1	212,5	66,1	310,0	28,2	120,2	2,4	12,9	21,5	

Tableau 4 : Empreintes matières des aéronefs en kg par avion.

On remarquera aussi que, en toute rigueur, la détermination de l’empreinte matières des appareils aurait dû tenir compte des ressources immobilisées dans les infrastructures de production de ces appareils (<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/economie-circulaire/5-empreinte-matieres>). Cependant, dans la mesure où l’on a cherché à quantifier les nouvelles consommations de matières premières liées aux avions à construire uniquement, en faisant l’hypothèse qu’il n’y aurait pas d’augmentation des moyens de production ces derniers ne nécessitent pas l’immobilisation de nouvelles ressources en première approche. Il en résulte cependant une probable sous-estimation de l’empreinte matières à prévoir pour la part

aéronefs des trajectoires de décarbonation, au même titre que le fait de ne pas avoir pris en compte tout ce qui concerne les équipements et habillages intérieurs des appareils, dont l'avionique.

Une autre source de sous-estimation de ces empreintes matières résulte des procédés de fabrication des avions. En effet, les différents procédés d'usinage et d'assemblage des pièces aéronautiques génèrent des pertes de matière sous forme de copeaux ou autres déchets, en quantités variables selon les matériaux et les procédés considérés [40]. Ces quantités ne sont pas prises en compte car seules celles immobilisées dans le produit fini (l'aéronef ici) sont estimées. Cependant, nous évoquerons plus en détail le cas de ces déchets dans la Section 4.2.2 car ils sont souvent utilisés comme ressource secondaire lors de la mise en place de processus de recyclage.

3.2. Quelles empreintes matières pour l'énergie électrique ?

3.2.1. Empreintes matières unitaires des énergies de décarbonation du trafic aérien

Dans cette section, sont détaillées les empreintes matières par unité de puissance des trois sources de production d'électricité décarbonée à développer si l'on souhaite décarboner le transport aérien. Ces résultats découlent très majoritairement des travaux réalisés dans le cadre du projet SURFER [44], porté par l'ADEME en collaboration avec le BRGM et le CNRS-ISTerre (Institut des Sciences de la Terre du CNRS). Cependant, l'exploitation des données issues de ce projet (cf. Annexe E) a nécessité un travail d'harmonisation complémentaire qui a pu s'accompagner de certains choix lorsqu'il existait différentes données en fonction des travaux de la littérature et des solutions technologiques considérés.

Concernant la production d'origine nucléaire, l'exploitation des données disponibles dans le projet SURFER [44] s'est révélée plutôt immédiate dans la mesure où la seule adaptation a consisté à transposer les quantités d'aciers de construction mentionnées en quantités de leurs éléments d'alliage suivant les compositions modèles retenues (cf. Annexe E). L'empreinte matières du kW nucléaire est ainsi fournie dans le Tableau 5. Afin de restreindre quelque peu la quantité d'éléments à considérer, le carbone, le soufre, le phosphate et l'azote présents en faibles quantités ou en impuretés dans les aciers ont été négligés. Ces trois derniers éléments sont présents en tant que traces et proviennent des minerais à la base des métaux ; ils ne sont jamais ajoutés par les métallurgistes qui cherchent plutôt à les éliminer, surtout lorsque l'on monte en gamme d'aciers. Dans le cas du carbone, cela peut parfois avoir un intérêt d'en ajouter un peu mais là encore, de manière générale, plus on monte en gamme d'aciers plus on cherche à minimiser les teneurs en carbone (cf. Annexe C et les aciers utilisés dans le domaine aéronautique). Ces éléments sont donc systématiquement négligés tout au long de cette étude.

Empreinte matières de l'électricité nucléaire	Fe	Mn	Cu	Ni	Si	Cr	Mo	Zn	Al
	44496	757	1567,8	1280	240,4	2830	133	100	120
	Pb	Ag	Mg	Cd	Zr	Ti	Sn	Hf	In
	480	1	360	1	900	1660	1,75	0,48	1,6
	Nb	V	Y	W					
	2	0,6	0,5	5					

Tableau 5 : Empreinte matières de l'électricité nucléaire en kg.MW⁻¹.

Dans le cas de l'éolien, les filières de production terrestre et *off-shore* ont été considérées séparément. Comme dans le cas de l'électricité nucléaire, il a été nécessaire de convertir les quantités d'aciers mentionnées dans les tableaux fournis dans l'Annexe E en quantités de chacun de leurs éléments d'alliage. On précisera aussi que, dans

le cas des éoliennes terrestres, plusieurs technologies de générateur existent. Une moyenne arithmétique des différentes valeurs a donc été calculée pour tenir compte de cette spécificité, faute de données précises sur les parts de marché de chacune de ces technologies. De la même façon, les tours peuvent être soit en acier faiblement allié soit en béton ; on a fait l'hypothèse que 50% des tours sont en acier. Dans le cas des éoliennes en mer, ce sont les fondations qui peuvent être de trois natures différentes, ce qui peut induire des proportions de béton et d'acier différentes ; nous avons considéré que chaque solution technique représente le tiers des éoliennes installées en mer, ou qui le seront. Les empreintes matières de l'éolien terrestre et de l'éolien en mer sont fournies dans le Tableau 6.

Empreinte matières de l'éolien terrestre	Fe	Mn	Cu	Ni	Si	Cr	Mo	Al	Nd
	83054	855	5477	1750	206	3250	640	5150	12
	Pr	Dy							
	4	2,4							
Empreinte matières de l'éolien en mer	Fe	Mn	Cu	Ni	Si	Cr	Mo	Al	Nd
	222768	4507	11033	10560	1693	23760	792	2800	129
	Pr	Dy							
	43	28							

Tableau 6 : Empreinte matières de l'électricité éolienne, terrestre et off-shore, en kg.MW⁻¹.

En ce qui concerne l'électricité photovoltaïque, la conversion des données issues du projet SURFER [44] en une empreinte matières directement exploitable pour la suite des travaux a nécessité davantage d'approximations que dans les cas des énergies nucléaire et éolienne. En accord avec les parts de marché des différentes technologies de cellules photovoltaïques (cf. Annexe E), il a été supposé que les technologies silicium mono- et polycristallin représentaient chacune 45% du marché, et les technologies CdTe (tellure de cadmium) et CIGS (sulfures de cuivre, indium et gallium) 5% chacune ; la technologie pérovskite a été négligée. De même, pour le verre des panneaux, nous avons supposé qu'ils étaient composés de silicium pur et, en l'absence de précisions sur le type d'acier utilisé pour les panneaux, nous avons supposé qu'il s'agissait d'un acier faiblement allié. Pour finir, concernant la contribution des onduleurs, nous avons considéré les quantités de matières mentionnées pour l'onduleur de 10 kW que nous avons ramenées par MW, en supposant une fois encore que l'acier mentionné était un acier faiblement allié. Les empreintes matières du solaire photovoltaïque sont fournies dans le Tableau 7.

Empreinte matières de l'électricité photovoltaïque	Fe	Mn	Cu	Ni	Si	Cr	Mo	Al	Ag
	222	1,15	1341	2,3	46665	2,3	2,3	10280	18
	Cd	Te	In	Ga	Se				
	2,5	2,5	8	5,5	1				

Tableau 7 : Empreinte matières de l'électricité photovoltaïque en kg.MW⁻¹.

On observera que, parmi les ressources utilisées dans les infrastructures de production d'énergie et communes aux aéronefs, l'aluminium, le nickel, le chrome et le titane sont utilisées dans des proportions significatives.

3.2.2. Empreintes matières pour le transport et le stockage de l'électricité

La quantification des empreintes matières associées aux infrastructures de transport et de stockage de l'énergie électrique s'est avérée moins immédiate que pour les infrastructures de production d'électricité. Le problème n'a pas tant été l'empreinte matières elle-même, le projet SURFER [44] fournissant des données facilement exploitables par km de câble, par transformateur ou par batterie de stockage (cf. Annexe E), que la quantification des kilomètres de câbles et des nombres de transformateurs et de batteries qui seraient nécessaires. Nous sommes effectivement partis du postulat que, actuellement, faire voler les avions ne requiert aucune électricité ; envisager l'utilisation d'électro-carburants et d'hydrogène requiert donc des besoins nouveaux par rapport aux réseaux actuels.

Afin de quantifier ces besoins, nous nous sommes basés sur les travaux de RTE concernant les scénarios de transition énergétique pour 2050 [39] et le plan de développement du réseau de transport électrique [45]. Ces données concernent la France et ses voisins immédiats uniquement (ceux auxquels elle vend ou achète de l'électricité), mais elles sont très riches et permettent de bien comprendre le lien entre réseau de transport et mix électrique. Nous avons donc supposé que les conclusions de ces travaux de RTE pouvaient être extrapolées à l'échelle mondiale.

Concernant le transport d'électricité, il ressort des rapports de RTE [39], [45] que le choix d'un mix électrique s'appuyant davantage sur les énergies renouvelables aura pour conséquence sur le réseau un certain engorgement des lignes haute tension (63-225 kV). En effet, les énergies renouvelables comme l'éolien et le solaire nécessitent des installations de production plus diffuses et moins puissantes unitairement que les centrales nucléaires (ou même hydroélectriques). Le réseau de la très-haute tension devrait donc être peu affecté par la transition énergétique. Par ailleurs, le réseau de transport d'électricité est à 96% aérien en nombre de km installés.

Une des particularités de ce réseau de transport est que ses infrastructures ont des durées de vie longues, de l'ordre de 70 ans. Néanmoins, une part significative de ces installations arrive en fin de vie, ayant été installées dans l'après seconde guerre mondiale. A l'horizon 2050, les besoins en ressources concernant les réseaux électriques vont donc davantage concerner le remplacement de l'existant qu'une extension significative. RTE affiche ainsi le besoin de création de 15000 km de lignes électriques d'ici cette date, contre 32500 km à remplacer. On notera que ces valeurs sont des valeurs correspondant au scénario N1 de RTE [39] qui, pour rappel, prévoit de passer d'une puissance électrique actuelle installée en France de 116,1 GW (63,1 GW de nucléaire, 25,5 GW d'hydraulique, 16,5 GW d'éolien, 9,4 GW de solaire et 1,6 GW de bioénergies), à une puissance installée de 281,7 GW en 2050 (28,7 GW de nucléaire, 30,1 GW d'hydraulique, 103,0 GW d'éolien, 118,0 GW de solaire et 1,9 GW de bioénergies).

Concernant les transformateurs, RTE n'évoque pas la création de nouveaux transformateurs [39], [45], en revanche il mentionne la nécessité de renouveler et de renforcer 492 transformateurs d'ici 2050, sur les 1320 en service.

Au contraire, dans le cas des batteries pour le stockage stationnaire il s'agit d'un besoin de création *ex nihilo*. En effet, les EnR sont trop peu développées actuellement en France pour qu'il y ait besoin d'infrastructures de stockage dédiées ; pour pallier l'intermittence de ces énergies et piloter la demande en cas de besoin, on compte sur les centrales hydroélectriques. Selon les estimations de RTE [39], il serait ainsi nécessaire d'installer 12 GW de capacités de stockage stationnaire d'ici 2050. Ce chiffre peut paraître relativement faible en regard des 195,1 GW d'EnR intermittentes qu'il est prévu d'installer, mais RTE table sur une optimisation du fonctionnement du réseau, notamment grâce au renouvellement et au renforcement des lignes et transformateurs existants, pour lisser les productions et ne pas avoir besoin de plus de capacités de stockage par batteries. Il compte aussi sur les STEP

(Stations de Transfert d’Energie par Pompage) déjà installées, représentant une capacité de stockage de 4,9 GW au total, auxquels viendraient s’ajouter 3 GW à l’horizon 2050 [39]. Les centrales hydroélectriques, et nucléaires dans une bien moindre mesure, permettant aussi un ajustement de la production avec la demande. Néanmoins, concernant le stockage par batteries, le projet SURFER [44] ne fournit une empreinte matières des batteries Li-ion que pour la seule technologie oxyde de manganèse (cf. Annexe E). Même s’il existe d’autres technologies utilisant notamment du nickel et du cobalt, ces technologies permettent d’obtenir des batteries de plus grande densité énergétique, leur usage est donc pour l’instant plutôt réservé au secteur de la mobilité électrique [34]. Le manque de vision à moyen et long terme sur une éventuelle utilisation des batteries utilisant du nickel et du cobalt pour le stockage stationnaire introduit donc un biais concernant l’évaluation des besoins pour ces deux métaux qui sont particulièrement critiques pour les superalliages pour turbomachines (cf. Section 3.1 et Annexe C).

Sur la base de ces observations, et afin de proposer des empreintes matières de ces infrastructures exploitables à partir des empreintes matières issues du projet SURFER [44], nous avons donc cherché à estimer des empreintes matières non par MW ou par transformateur ou batterie, mais par MW de puissance renouvelable installée. Pour 195100 MW de capacités de production d’EnR intermittentes à l’horizon 2050, il serait donc nécessaire d’installer 47500 km de lignes électriques haute tension, de renouveler 492 transformateurs, et d’installer 12000 MW de batteries. On notera que pour les transformateurs comme pour les câbles du réseau haute tension, les empreintes matières varient en fonction de la tension. Une moyenne arithmétique des empreintes matières a donc été effectuée en considérant les installations de 63 kV à 225 kV. Compte tenu de la sur-représentation du réseau aérien par rapport au réseau souterrain, l’hypothèse a été faite de considérer 100% des lignes à installer ou à renouveler en aérien. De plus, à chaque fois qu’il était mentionné « acier » dans les tableaux, nous avons considéré qu’il s’agissait d’un acier faiblement allié suivant la composition proposée dans l’Annexe E.

Lignes haute tension	Fe	Mn	Cu	Ni	Si	Cr	Mo	Zn	Al
	3520,2	18,3	-	36,5	-	36,5	36,5	65,7	1247,8
Transformateurs	Pb	Li	Co	Graphite					
	1698,2	-	-	-					
Batterie de stockage	Fe	Mn	Cu	Ni	Si	Cr	Mo	Zn	Al
	1067,0	53,1	73,2	11,1	-	11,1	11,1	-	96,6
	Pb	Li	Co	Graphite					
	-	6,3	-	72,6					

Tableau 8 : Empreintes matières des infrastructures de transport et de stockage de l’électricité, exprimées en kg par MW d’EnR intermittentes installées.

Les empreintes matières ainsi calculées (cf. Tableau 8) reposent donc sur des approximations fortes mais elles permettent de traduire les besoins en ressources associés à une évolution des réseaux électriques induite par une croissance de la part des EnR dans le mix électrique.

3.3. Empreinte matières des électrolyseurs

Contrairement aux infrastructures de production, de transport et de stockage d'électricité décarbonée susmentionnées, la question de la production d'hydrogène n'a pas du tout été abordée dans le cadre du projet SURFER [44]. Cependant, pour décarboner le transport aérien, il est prévu l'utilisation de 92,4 à 129,9 Mt.an⁻¹ d'hydrogène décarboné à l'horizon 2050 en fonction du scénario considéré (cf. Tableau 3, Section 2.4.3), que cet hydrogène soit utilisé pour la synthèse des électro-carburants ou comme carburant lui-même. Sa production étant prévue par électrolyse de l'eau, il est donc nécessaire de prendre en compte la construction à venir d'électrolyseurs ; seules 3 Mt.an⁻¹ d'H₂ sont actuellement produites par électrolyse de l'eau [46].

Il existe trois technologies principales d'électrolyseurs [22], [47] : les électrolyseurs alcalins (*Alkaline Electolysis Cell*, AEC), les électrolyseurs à membrane polymère (*Polymer Electrolyte Membrane Electrolysis Cell*, PEMEC), et les électrolyseurs à haute température (*Solide Oxide Electrolysis Cell*, SOEC). Mais seules les deux premières technologies ont des niveaux de TRL au stade de l'utilisation industrielle (TRL 9 pour la technologie AEC qui est celle actuellement utilisée) ou pré-industrielle (TRL 8 pour la technologie PEMEC).

Afin d'obtenir des données sur l'empreinte matières des technologies d'électrolyseurs, nous nous sommes basés sur les travaux réalisés par Zhao *et al.* [47] qui fournissent des données pour les trois technologies susmentionnées. Faute de temps, et les données sur l'empreinte matières de ces dispositifs étant peu nombreuses (on trouve surtout des données d'ACV en termes d'empreinte eau et d'émissions de CO₂ en fonction du caractère plus ou moins décarboné de l'électricité utilisée en entrée), nous avons dû nous contenter de cette seule source. Il s'agit là d'un point faible de cette quantification qui mériterait d'être confortée par une recherche bibliographique étendue.

Table 2 – The inventory of material use of producing 1 m ² SRU of three electrolysis cells unit: g.						
Component	SOEC [20,40]		PEMEC [23,26,27,41,42]		AEC [31,35]	
Oxygen electrode	LSCF	72	Titanium felt	226	Nickel plate	1135
	CGO10	68	Platinum coating	14		
	CGO10	7	Iridium	13		
Electrolyte	8YSZ	56	Ink materials	202		
	Tape casting slurry	135	Nafion 115	167	Zirfon	122
Hydrogen electrode	8YSZ/NiO	94	Carbon paper	198	Nickel plate	1135
	3YSZ/NiO	133	Platinum	8	Nickel Sulfide coating	40
Interconnect	Tape casting slurry	2091	Ink materials	121		
	Ferritic Stainless steel	4170	Titanium plate	9463	Nickel plate	4677
	Mn _{1.5} Co _{1.5} O ₄	32	Platinum sputter	21		
Frame	Yttrium oxide	17				
	Al ₂ O ₃	23				
	Frame of hydrogen side	8750	Stainless steel	1185	Polyphenylene sulfide	1944
	Frame of oxygen side	2500	Rubber gasket	21	Stainless steel	2328
Waste	Al ₂ O ₃	16				
	Glass ceramic	20				
	Stainless steel	15,420	Stainless steel	1185	Nickel	6947
	Manufacture waste	663	Manufacture waste	479	Stainless steel	2328
	Other metals	2359	100% Recycled Nobel metals	47	Manufacture waste	316
			Other metals	969		

Tableau 9 : Empreintes matières des modules de base des différentes technologies d'électrolyseurs [47].

Le Tableau 9 et le Tableau 10 issues de [47] illustrent les empreintes matières d'un module de base (*Single Repeating Unit*, SRU) d'un électrolyseur pour chacune des trois technologies, ainsi que les masses d'hydrogène pouvant être produites par un module de base sur sa durée de vie. Par la suite nous ne considérons que les

technologies AEC et PEMEC qui sont les plus matures et qui affichent les durées de vie les plus longues, même si la technologie SOEC laisse envisager de meilleurs rendements. On notera que les rendements espérés avec cette troisième technologie sont cohérents avec ceux considérés pour établir les besoins en énergies des scénarios de décarbonation (cf. Section 2.2.2).

En faisant l'hypothèse que les électrolyseurs fonctionneront 85% du temps sur une année (les 15% restants ils seront à l'arrêt ou en maintenance), on peut en déduire qu'un module de base sera capable de produire environ 1,7 tonnes d'H₂ par an dans le cas de la technologie AEC et 5,9 tonnes par an dans le cas de la technologie PEMEC. On notera au passage qu'avec un taux de fonctionnement de 85%, les durées de vie affichées pour les différents modules sont respectivement de l'ordre de 11,4 ans et 6,7 ans pour les technologies AEC et PEMEC, ce qui en fait des technologies à plutôt courtes durées de vie qui nécessiteront une maintenance et un renouvellement réguliers des installations. Ce taux de fonctionnement a été choisi de façon arbitraire faute de données précises, c'est néanmoins un taux de fonctionnement raisonnable pour des installations industrielles.

Table 4 – Key parameters of three H₂O electrolysis stack [51,53,54].				
	Unit	SOEC	PEMEC	AEC
Current density	A/cm ²	0.8	1.8	0.4
Cell voltage	V	1.2	1.7	1.8
Life time	hour	40,000	50,000	85,000
System efficiency	%	85	60	65
Total H ₂ over lifetime	ton/m ²	16	40	19

Tableau 10 : Performances des modules de base des différentes technologies d'électrolyseurs [47].

En exploitant les données du Tableau 9, on arrive aux empreintes matières des modules de base des électrolyseurs par tonne d'H₂ fournies dans le Tableau 11. Afin de faciliter l'utilisation ultérieure de ces données, il a été proposé de considérer une répartition 50% AEC – 50% PEMEC des technologies d'électrolyseurs pour tenir compte d'une implantation plus précoce de la technologie AEC. Les empreintes matières calculées ont aussi été arrondies à la troisième décimale près (donc au gramme près).

	Fe	Mn	Ni	Si	Cr	Mo	Ti	Pt	Ir
AEC	0,086	0,002	0,376	0,001	0,022	0,001	0,242	0,001	0,001
PEMEC	0,020	0,001	0,002	0,001	0,006	0,001	-	-	-
Empreinte matières moyenne d'un électrolyseur	0,053	0,002	0,189	0,001	0,014	0,001	0,121	0,001	0,001

Tableau 11 : Empreintes matières des technologies d'électrolyseurs AEC et PEMEC, en kg par tonne d'H₂.

Concernant le Zirfon (https://www.agfa.com/specialty-products/wp-content/uploads/sites/8/2020/10/TDS-ZIRFON-UTP-500_20200831.pdf) et le Nafion 115 (<https://www.sigmaaldrich.com/FR/fr/product/aldrich/541346>), il s'agit respectivement d'un polymère faiblement chargé d'oxydes de zircon et d'un composé perfluoré. Leurs contributions ont donc été négligées, de même que celles des autres polymères. En ce qui concerne l'acier inoxydable, faute de précisions sur la nuance, nous avons considéré la même composition modèle que celle établie dans le projet SURFER [44] (cf. Tableau 32, Annexe E). Le carbone, le phosphore et l'azote présents dans sa

composition ont été négligés, en accord avec ce qui a été décidé précédemment pour les empreintes matières des avions et des infrastructures électriques. Le soufre, présent en tant qu'impureté dans l'acier inoxydable mais aussi sous forme de sulfure de nickel à l'électrode de la technologie AEC, a lui aussi été négligé.

Toutes ces hypothèses, comme par exemple le fait que nous n'avons pris en compte que les modules unitaires des électrolyseurs sans considérer l'ensemble des matériaux de structure de ces installations, font que les empreintes matières calculées pour les électrolyseurs contiennent une part importante d'incertitudes et sont probablement fortement sous-estimées. Néanmoins, elles ont permis une première estimation globale de l'empreinte matières associée à la production d'hydrogène décarboné pour le transport aérien. En toute rigueur, il aurait aussi fallu quantifier l'empreinte matières des systèmes de transport et de stockage de l'hydrogène, mais de très nombreuses incertitudes persistent sur les solutions qui seront retenues ; l'hydrogène gazeux est en effet très volatil, posant des problèmes de perméabilité face à d'éventuelles fuites dans les infrastructures, et l'hydrogène liquide soulève des problèmes d'isolation aux très basses températures. Pour faire face à ces difficultés, une production localisée sur le lieu d'utilisation ou un transport sous forme d'ammoniac sont envisagés. A ce stade, on fera donc l'hypothèse que l'empreinte matières de la production d'hydrogène restera de toute façon faible à l'échelle des autres empreintes matières (production, transport et stockage de l'électricité, ainsi que des avions), limitant l'effet de ces incertitudes sur les besoins en ressources estimés pour répondre à la décarbonation du transport aérien.

On remarquera aussi que, dans l'étude de Zhao *et al.* [47], les différents déchets de production des électrolyseurs ont été quantifiés eux aussi (*cf.* Tableau 9), et que certaines de ces quantités sont significatives et du même ordre de grandeur que celles immobilisées dans les unités de base elles-mêmes. Conformément à l'hypothèse que nous avons formulée précédemment concernant les calculs d'empreinte matières des avions, nous ne considérons dans cette étude que les quantités de matières immobilisées dans les appareils et les infrastructures de production d'énergie. Il est ainsi facile d'intuire que si certains de ces déchets se recyclent difficilement, cela peut représenter des pertes de ressources non négligeables dans certains cas. Toutes les empreintes matières estimées dans ce rapport doivent donc plutôt être considérées comme des quantités *a minima*.

Cependant, il est d'ores et déjà intéressant de noter que les technologies AEC et PEMEC sont dépendantes de deux métaux essentiels pour les avions : le nickel dans le cas de la technologie AEC et pour les superalliages et les aciers aéronautiques, et le titane dans la technologie PEMEC et les alliages de titane à très haute tenue mécanique. Le déploiement massif d'électrolyseurs pourrait donc à terme entraîner des conflits d'usage, ou tout du moins impacter la disponibilité de ces deux métaux pour le secteur aéronautique.

3.4. Besoins en ressources minérales pour la mise en œuvre des trajectoires de décarbonation du trafic aérien

3.4.1. Hypothèses de quantification des besoins en ressources

A partir des empreintes matières estimées précédemment pour chacun des éléments du système d'étude (avions, infrastructures de production, de transport et de stockage d'électricité décarbonée, et infrastructures de production d'hydrogène décarboné), et à partir des chiffres clés établis à la Section 2.4.3 (*cf.* Tableau 3), une liste de 36 ressources minérales indispensables pour la mise en œuvre des scénarios de décarbonation de l'aérien a pu être proposée. Les besoins pour chacune de ces ressources ont aussi été quantifiés. Les tonnages ainsi obtenus sont fournis sous forme de tableau dans l'Annexe F (*cf.* Tableau 41), en précisant pour chacune des ressources si elle

concerne la production des avions, celles des carburants, ou les deux et dans quelles proportions. Les deux scénarios S1 et S2 sont considérés et le découpage en deux périodes 2023-2035 et 2036-2050 a été conservé. Un cumul des quantités des ressources qui seront immobilisées sur chacune de ces périodes ainsi que le cumul total sur la période des scénarios ont ainsi été calculés.

Du point de vue méthodologique, il a été décidé de faire l'hypothèse que les quantités de ressources nécessaires seraient immobilisées sur toute la période des scénarios et qu'on ne pourrait pas compter sur une part significative de recyclage des ressources pour alimenter les besoins au cours des scénarios. En effet, si on regarde la durée de vie moyenne des avions, elle est de 24 ans, et supposée de 20 ans lors de la construction des scénarios. A l'échelle des 28 ans de la période 2023-2050, seuls les nouveaux avions introduits en tout début de période arriveront effectivement en fin de vie avant la fin des scénarios. Qui plus est, comme évoqué ultérieurement (cf. Section 4.2.2), le recyclage des matériaux aéronautiques sans perte de valeur ajoutée n'en est qu'à ses balbutiements [48]. L'hypothèse selon laquelle l'évolution des flottes d'appareils va très majoritairement mobiliser de la ressource primaire, donc issue de l'extraction, et non de la ressource secondaire, issue du recyclage, semble donc raisonnable. Concernant les besoins nécessaires pour la production des avions, il a été supposé que tous les avions qui entreront en service seront de type SMR A320-néo. Il est probable que les futures générations d'avions qui entreront en service à la fin des scénarios présenteront des empreintes matières légèrement plus faibles que maintenant mais, par manque de données sur les bilans de masses des futurs avions, il n'a pas paru pertinent d'essayer de prévoir un tel effet dans les chiffrages proposés. Afin d'établir une référence, un bilan des ressources immobilisées dans la flotte mondiale actuelle a aussi été établi en supposant que l'ensemble des 33299 avions qui constituent la flotte (<https://www.atag.org/facts-figures.html>) sont des A320.

Concernant la prise en compte du renouvellement des infrastructures de production, de transport et de stockage d'électricité, il a de même été considéré qu'il n'y aurait aucun renouvellement sur la période 2023-2050. Cette hypothèse semble encore plus justifiée dans ce cas, dans la mesure où les besoins de création d'infrastructures de production d'électricité décarbonée présupposent un existant vierge par rapport aux besoins aéronautiques, et que les durées de vie des centrales nucléaires, réseaux électriques, transformateurs et batteries de stockage stationnaire sont largement de plusieurs dizaines d'années, voire excèdent 50 ans [39]. De même pour les éoliennes et les panneaux photovoltaïques, leurs durées de vie actuelles sont de l'ordre de 20 à 30 ans, soit la durée de la période d'étude considérée. Dans le cas des électrolyseurs, il a été décidé de ne pas prendre en compte non plus les besoins de leur renouvellement, en accord avec l'hypothèse formulée pour l'ensemble des autres infrastructures impliquées dans la production des carburants. Compte tenu des durées de vie calculées précédemment (cf. Section 3.3), il s'agit dans ce cas précis d'une hypothèse forte qui conduit à sous-estimer les besoins en ressources propres aux électrolyseurs. En effet, dans la mesure où l'hydrogène décarboné est nécessaire à la synthèse des électro-carburants, il y aura un besoin d'électrolyseurs dès 2030 ; certains d'entre eux pourraient donc être renouvelés jusqu'à deux fois sur la période 2030-2050.

Si, à ce stade, on pourrait avoir l'impression que l'apport potentiel de recyclage n'est pas du tout pris en compte dans cette étude, comme nous le verrons par la suite il l'est en fait mais *via* la considération des flux de matières primaires et secondaires dans le commerce mondial des différentes ressources minérales étudiées, et des métaux qui en découlent. Tout cela est abordé en détail dans le Chapitre 4.

Eu égard à la démarche appliquée jusqu'à présent, qui a plutôt consisté à ne pas prendre en compte les besoins en ressources pour lesquels il était difficile d'obtenir des données fiables (partie avionique ou transport de l'hydrogène

par exemple), on gardera en mémoire que les chiffres mentionnés dans le Tableau 41 de l'Annexe F sont probablement sous-estimés, certains plus ou moins fortement (*cf.* décision susmentionnée de ne pas tenir compte du besoin de renouvellement des électrolyseurs en première approche). N'ont aussi été prises en compte que les quantités présentes dans les avions ou dans les unités de production, de transport et de stockage d'électricité décarbonée, et dans celles de production d'hydrogène décarboné. Une approche de mesure d'empreinte matières complète nécessiterait de tenir compte des pertes matières lors des procédés de fabrication des aéronefs, mais aussi de toute la matière immobilisée dans les infrastructures de production de tous ces appareils et infrastructures. Concernant les pertes matières lors des procédés de fabrication, elles peuvent parfois être bien supérieures à 50% en fonction des procédés utilisés et de la géométrie des pièces produites (usinage de pièces de forme complexe par exemple). Même si les déchets de production représentent une part importante des ressources secondaires réutilisées en circuit court dans les processus industriels, la totalité de cette ressource n'est pas forcément recouverte. Certains éléments d'alliage utilisés trop marginalement, comme l'argent et le cadmium, voire certains alliages, comme ceux de magnésium ou de béryllium, ont aussi été négligés.

Pour finir, le cas du hafnium est particulier. En effet, si on regarde la composition modèle retenue pour un superalliage et présentée dans l'Annexe C (*cf.* Tableau 29), il n'apparaît pas, bien qu'étant mentionné comme entrant dans la composition de certains superalliages (*cf.* Tableau 28 de cette même annexe). S'il a été décidé de ne pas le faire apparaître dans les empreintes matières, c'est qu'il n'est présent qu'à hauteur de 0,08 g de hafnium par kg de superalliage. Néanmoins, cet élément étant aussi présent dans l'empreinte matières des centrales nucléaires, nous avons souhaité vérifier que les besoins pour la production des futurs aéronefs pouvaient bien être négligés face à ceux des centrales pour la production d'électricité. Il s'avère que ce n'est pas le cas et la part aéronautique des besoins en hafnium a finalement été prise en compte (*cf.* Tableau 41, Annexe F).

3.4.2. Besoins spécifiques vs. besoins en commun

Le Tableau 12 ci-après propose une vision plus synthétique des besoins en ressources minérales pour la mise en œuvre des scénarios de décarbonation de l'aérien que l'ensemble des données brutes fournies dans le Tableau 41 (*cf.* Annexe F). Il met l'accent sur le ou les éléments du système d'étude auxquels chacune des ressources est associée. De même, il permet de visualiser les besoins à l'horizon 2050 pour la partie aéronefs (Aéro.) et ceux pour la partie infrastructures de production d'électricité et d'hydrogène décarbonés pour les carburants (Carb.). Le symbole * indique que ces éléments sont des terres rares et ** qu'ils appartiennent au groupe des platinoïdes (*cf.* Annexe B). Les éléments grisés sont ceux identifiés comme critiques à l'échelle de l'UE (*cf.* Section 4.1, [49], [50]). Le (x) signifie que l'élément est utilisé dans cette technologie mais soit en quantité négligeable, soit pour d'autres usages. La colonne séparant les ressources nécessaires aux aéronefs de celles nécessaires aux infrastructures de production d'électricité et d'hydrogène décarbonés indique leurs poids respectifs en termes de besoins (*cf.* Tableau 41, Annexe F, pour les chiffreages bruts). Excl. signifie qu'un seul des deux sous-systèmes étudiés est concerné, ~ signifie que la différence de contribution est au maximum de 40%-60%, < ou > signifie que cette différence varie entre 10%-90% et 40%-60%, << ou >> qu'elle varie entre 1%-99% et 10%-90%, et <<< ou >>> qu'elle est supérieure à 1%-99%. Quand on est à la frontière entre deux intervalles, deux échelles peuvent être mentionnées en fonction du scénario, le scénario S2 étant celui qui possède l'empreinte matières la plus importante en raison de besoins en *e-fuels* et H₂ plus importants. Pour plus de concision, les éoliens *on-shore* et *off-shore* sont regroupés sous le terme Eol., ainsi que les lignes à haute-tension et les transformateurs sous le terme Rés.. Les

termes Nucl., Sol., Stock. et Prod. H₂ désignent le nucléaire, le solaire, le stockage stationnaire d'électricité et les électrolyseurs pour la production d'hydrogène, respectivement.

Il ressort de ce tableau que deux groupes de ressources apparaissent. Il y a d'abord les ressources communes à l'ensemble des technologies ou presque, que sont le cuivre, le fer, l'aluminium et les principaux éléments d'alliage des aciers et aluminiums pour la construction (chrome, manganèse, molybdène, nickel et silicium). Pour l'ensemble de ces ressources, la part des besoins pour la production des carburants est très supérieure à celle des besoins pour les aéronefs. En termes de tonnages associés, là encore il s'agit des tonnages les plus importants car à l'horizon 2050 les quantités de matières qui seront immobilisées dans les éléments constitutifs du système d'étude atteindront de l'ordre de la Mt à quelques dizaines de Mt, exception faite du fer pour lequel les besoins cumulés avoisineront 140-190 Mt en fonction du scénario de décarbonation retenu. Le silicium est un cas particulier car sa demande est aussi portée par le développement du solaire photovoltaïque.

	Aéro.	S1 et S2 Aéro.	Poids du besoin	S1 Carb.	S2 Carb.	Nucl.	Eol.	Sol.	Rés.	Stock.	Prod. H ₂
Aluminium	X	0,6 Mt	<<	17,2 Mt	23,7 Mt	X	X	X	X	X	
Argent	(X)	-	Excl.	20,1 kt	27,7 kt	X		X			
Cadmium	(X)	-	Excl.	3,0 kt	4,1 kt	X		X			
Chrome	X	66,2 kt	<<<	11,2 Mt	15,4 Mt	X	X	X	X	X	X
Cobalt	X	24,3 kt	Excl.	-	-					(X)	
Cuivre	X	19,9 kt	<<<	8,6 Mt	11,8 Mt	X	X	X	X	X	
Dysprosium*		-	Excl.	11,7 kt	16,2 kt		X				
Etain	X	2,3 kt	>	371,9 t	512,1 t	X					
Fer	X	184,5 kt	<<<	139,1 Mt	191,6 Mt	X	X	X	X	X	X
Gallium		-	Excl.	6,1 kt	8,4 kt			X			
Graphite		-	Excl.	138,8 kt	191,1 kt					X	
Hafnium	X	22,3 t	<	102,0 t	140,5 t	X					
Indium		-	Excl.	9,2 kt	12,6 kt	X		X			
Iridium**		-	Excl.	15,0 t	21,1 t						X
Lantane*	X	201,0 t	Excl.	-	-						
Lithium	X	1,6 kt	< ou <<	12,0 kt	16,5 kt					X	
Magnésium	X	11,3 kt	< ou <<	76,5 kt	105,3 kt	X					
Manganèse	X	2,1 kt	<<<	2,4 Mt	3,3 Mt	X	X	X	X	X	X
Molybdène	X	25,8 kt	<<	698,4 kt	961,6 kt	X	X	X	X	X	X
Néodyme*		-	Excl.	54,4 kt	75,0 kt		X				
Nickel	X	160,1 kt	<<	5,2 Mt	7,1 Mt	X	X	X	X	X	X
Niobium	X	10,0 kt	>>	425,1 t	585,2 t	X					
Platine**		-	Excl.	49,7 t	69,8 t						X
Plomb		-	Excl.	3,4 Mt	4,6 Mt	X			X		
Praséodyme*		-	Excl.	18,1 kt	25,0 kt		X				
Rhénium	X	1072, 0 t	Excl.	-	-						
Sélénium		-	Excl.	1,1 kt	1,5 kt			X			
Silicium	X	3,8 kt	<<<	52,4 Mt	72,1 Mt	X	X	X			X
Tantale	X	1786,7 t	Excl.	-	-						
Tellure		-	Excl.	2,8 kt	3,8 kt			X			
Titane	X	402,1 kt	~	364,0 kt	501,5 kt	X					X
Tungstène	X	5,5 kt	>	2,1 kt	2,9 kt	X					
Vanadium	X	17,7 kt	>>>	127,5 t	175,6 t	X					
Yttrium*		-	Excl.	106,3 t	146,3 t	X					
Zinc	X	21,3 kt	< ou <<	149,5 kt	205,8 kt	X			X		
Zirconium	X	3,9 kt	<<	191,3 kt	263,3 kt	X					

Tableau 12 : Tableau récapitulatif des ressources minérales nécessaires à la décarbonation de l'aérien d'ici 2050.

Le fait que, pour ces ressources, les besoins soient imposés par les infrastructures pour la production des carburants est un point très important car les scénarios sont construits de telle façon que, jusqu'en 2035, si on se focalise sur l'évolution de la flotte d'appareils, les besoins pour cette dernière resteront relativement limités. En effet, les électro-carburants commenceront juste à être introduits et le renouvellement et l'accroissement de la flotte pourraient être perçus comme pilotant la demande en ressources. En restant centré sur la part aéronaves, on pourrait même avoir l'illusion que les quantités de ressources immobilisées en 2035 seront moindres qu'actuellement dans la mesure où une partie de la flotte actuelle sera encore en service à cette date et que, pour les avions entrant en service actuellement, une part des alliages d'aluminium et des aciers a été remplacée par des matériaux composites (cf. Tableau 4). Dans les faits, les besoins associés à la production d'électricité et d'hydrogène décarbonés pour les *e-fuels* auront déjà supplantés ceux associés à l'évolution de la flotte pour la quasi-totalité des ressources concernées. Cet écart ne fera que croître sur la période 2035-2050, allant en s'accroissant avec l'introduction massive des électro-carburants puis de l'hydrogène comme carburant. C'est donc un besoin qui pourrait être vu comme externe au domaine aéronautique, *i.e.* la production d'électricité et d'hydrogène décarbonés pour les carburants du futur, qui va dimensionner les besoins en ressources minérales pour la décarbonation de l'aérien (cf. Figure 6, Ref. désigne la flotte actuelle).

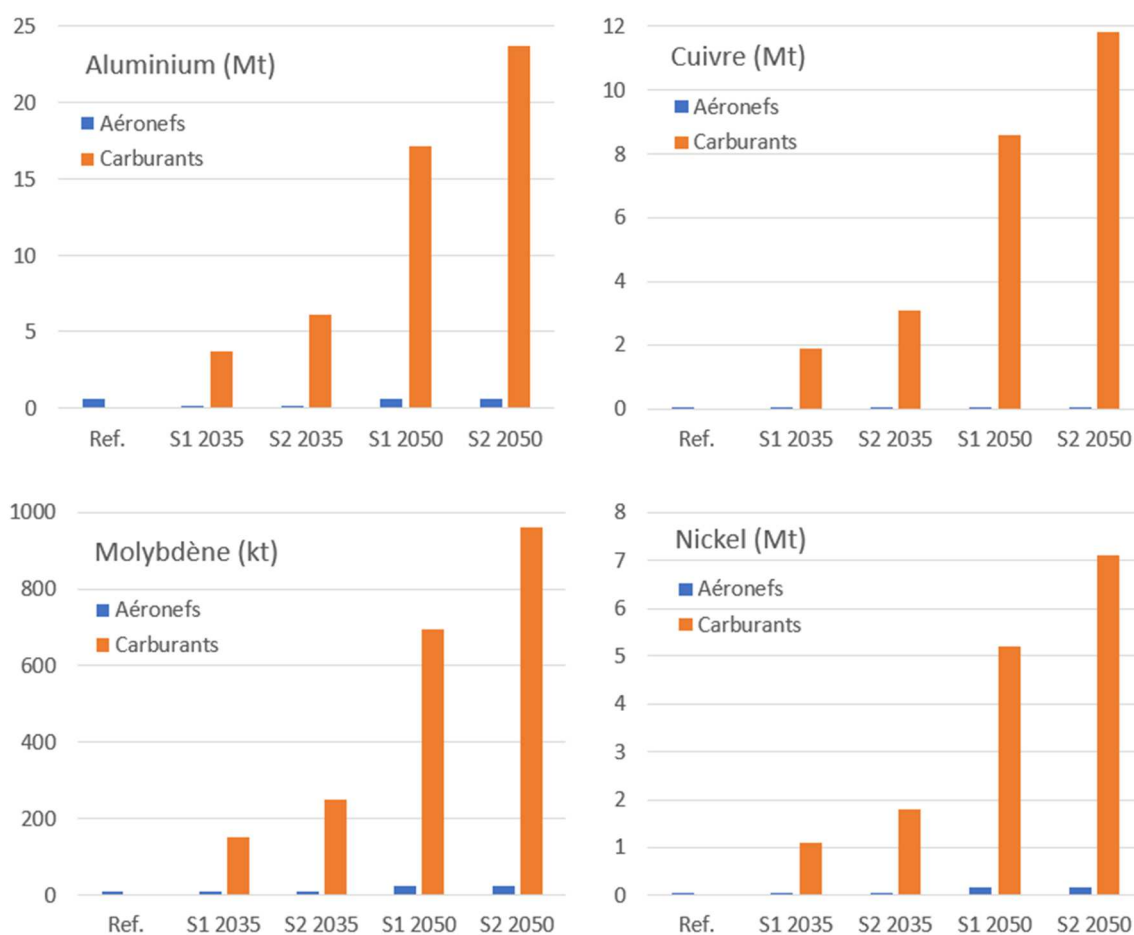


Figure 6 : Evolution du cumul des besoins en ressources communes au cours des scénarios (Al, Cu, Mo et Ni).

Le second groupe englobe le reste des ressources qui sont en général spécifiques à une voire deux technologies, comme par exemple le rhénium et le lanthane pour les superalliages aéronautiques, le tungstène, le vanadium et le niobium pour certains alliages ou aciers à très hautes performances, le praséodyme, le dysprosium et le néodyme

pour les éoliennes, le tellure et le gallium pour le solaire, le platine et l'iridium pour les électrolyseurs, le graphite pour les batteries ou encore l'yttrium pour le nucléaire. Pour toutes ces ressources, les besoins estimés à l'horizon 2050 sont de l'ordre de quelques dizaines ou centaines de tonnes pour les moins consommées, à quelques dizaines ou la centaine de kt pour les autres (cf. Tableau 12). Néanmoins, comme nous le verrons dans la suite de ce rapport, ce qui compte ce ne sont pas les tonnages absolus mais ceux rapportés à la production mondiale de ces ressources et à leurs réserves minières. Concernant ces ressources, l'évolution du besoin au cours des scénarios dépendra alors directement de la technologie à laquelle la ressource contribue, et notamment de l'ampleur et de la vitesse de déploiement prévues pour cette technologie (cf. Figure 7, Ref. désigne la flotte actuelle).

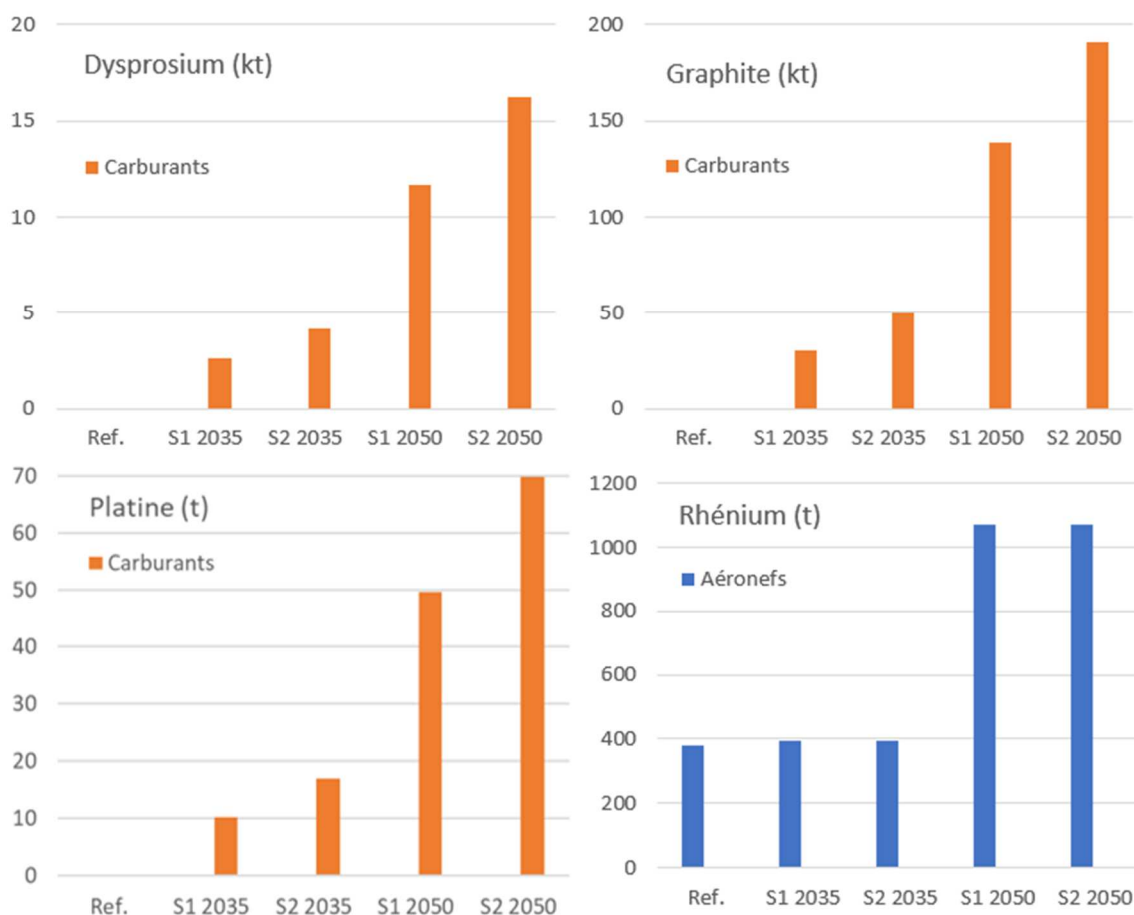


Figure 7 : Evolution du cumul des besoins en ressources spécifiques au cours des scénarios (Dy, graphite, Pt et Re).

Par ailleurs, c'est un résultat connu que le nucléaire possède une empreinte matières significativement plus faible que celles du solaire et de l'éolien surtout (<https://www.mineralinfo.fr/fr/ecomine/production-mondiale-delectricite-une-empreinte-matiere-transition>). Cette tendance semble se dessiner au travers de l'analyse des empreintes matières quantifiées dans cette étude, tout particulièrement pour les ressources communes utilisées en grandes quantités (Fe, Al, Cu). On peut donc légitimement se poser la question du choix du mix de capacités de production d'électricité décarbonée à déployer. Le mix choisi pour établir les chiffrages proposés dans ce rapport a bien sûr son importance mais son influence restera probablement d'une ampleur limitée si on le regarde à l'échelle globale des ressources communes et spécifiques. En effet, dès que l'on s'intéresse aux ressources spécifiques, on observe surtout des empreintes matières très variées d'une énergie à une autre. Changer de mix jouera donc surtout sur les besoins en ressources spécifiques en fonction du poids donné à chaque énergie, mais cette assertion

nécessiterait d'être vérifiée. En revanche, il ressort de cette analyse que le nucléaire comme l'avion apparaissent comme des technologies plus complexes car mobilisant de plus grandes variétés de ressources.

3.5. Décarbonation du trafic aérien : 36 ressources minérales concernées

En travaillant sur les empreintes matières des différents éléments qui composent le système avion, nous avons pu établir une liste de 36 ressources minérales qui seront indispensables dans l'optique de la mise en œuvre des scénarios de décarbonation du trafic aérien. Ces ressources peuvent être divisées en deux sous-groupes, celui des ressources communes à l'ensemble ou à la majorité des technologies concernées, et celui des ressources spécifiques à une ou deux technologies seulement.

Concernant les ressources communes, les besoins à l'échelle des scénarios vont s'exprimer en mégatonnes avec une forte augmentation des besoins sur la seconde période des scénarios (2036-2050) en raison de l'introduction toujours plus importante des électro-carburants et de l'hydrogène (pour la synthèse de ces derniers ou en tant que carburant lui-même). C'est effectivement la substitution envisagée du kérosène par ces carburants alternatifs qui va bouleverser complètement le coût matières de la décarbonation du trafic aérien, très loin devant le renouvellement et l'accroissement de la flotte mondiale.

A contrario, les besoins en ressources spécifiques se chiffrent plutôt en kilotonnes, voire en tonnes, à l'horizon 2050. Dans ce cas, on n'observe pas de tendance systématique quant à l'intensité de l'évolution du besoin sur la période des scénarios. La tendance est bien sûr à la croissance mais cette croissance peut être relativement raisonnable et progressive si la ressource ne concerne que les aéronefs, ou au contraire être très forte si elle concerne les besoins en électricité et en hydrogène décarbonés pour la production des carburants.

Parmi les deux scénarios envisagés, le scénario S1 se révèle être le moins consommateur de ressources minérales, et ne nécessiterait que 75% environ des besoins du scénario S2. Cela est directement lié aux besoins en électricité et en hydrogène décarbonés qui sont plus faibles dans ce scénario qui repose davantage sur l'utilisation des bio-carburants. Le lantane, le rhénium, le tantale et le cobalt sont les seules ressources qui font exception car spécifiques aux aéronefs ; les besoins associés à ces ressources sont par conséquent indépendants du choix du scénario considéré. On peut considérer qu'il en est de même pour le vanadium et le niobium pour lesquels la part du besoin pour les aéronefs domine largement celle pour la production des carburants, ainsi que pour l'étain dans une bien moindre mesure. Dans le cas du tungstène, même si c'est le besoin aéronautique qui est le plus grand, le besoin pour la production d'électricité et d'hydrogène décarbonés est du même ordre de grandeur ; le besoin cumulé dépend donc du scénario de décarbonation considéré.

Pour l'ensemble des ressources listées dans le Tableau 12, la question qui se pose à présent est la suivante : en fonction d'éventuelles tensions qui pourraient advenir concernant l'approvisionnement et la disponibilité de certaines de ces ressources, serait-il possible que certains besoins identifiés ne puissent être satisfaits à l'échelle des scénarios de décarbonation du trafic aérien ? Dans la suite de ce rapport nous cherchons donc à identifier les ressources qui pourraient présenter un risque en termes de mise en œuvre de ces trajectoires.

4. Tensions sur les ressources : nécessité d'une analyse multicritère

Tout au long du chapitre précédent, l'accent a été mis sur la détermination des empreintes matières des différentes entités qui constituent le système avion dans son ensemble. Ainsi, 36 ressources minérales ont été identifiées comme nécessaires au déploiement des scénarios de décarbonation du trafic aérien. Comme nous allons le voir dans ce chapitre, sur ces 36 ressources, 21 ont été identifiées comme critiques (*Critical Raw Materials*, CRM) par l'UE [49]–[52]. Ceci en raison de leur importance économique ou de leur caractère stratégique pour certains secteurs d'activité [53], [54], de leur répartition et de leur provenance à l'échelle mondiale. Il s'agit donc d'analyser les tensions qui pourraient apparaître sur certaines de ces ressources. En particulier, un manque de disponibilité de ces ressources pourrait-il compromettre la mise en œuvre des scénarios de décarbonation en ralentissant, voire en empêchant, le déploiement de certaines des technologies de décarbonation envisagées ? Se pose aussi la question de savoir quels sont les leviers qui permettraient d'atténuer les risques identifiés.

Dans ce chapitre, il est fait référence à différentes notions liées à l'exploitation minière des ressources minérales, telles que les notions de réserves et de ressources minières, de minerais majeurs ou de base, mineurs, rares ou secondaires. Toutes ces notions sont introduites dans l'Annexe G car elles gouvernent les marchés des différents minerais et donc leur disponibilité (relations de sous-produits entre minerais majeurs et mineurs, tonnages des productions annuelles, etc.). Les termes minerais et métaux seront aussi parfois confondus en assimilant le produit de l'extraction et celui du raffinage. Cet abus de langage est rendu possible par le fait que, dans la liste des 36 ressources minérales concernées par cette étude, même quand elles existent sous différentes formes c'est leur forme métallique qui est utilisée dans les technologies considérées. La seule exception est le graphite qui n'existe pas sous forme métallique.

4.1. Criticité des ressources minérales nécessaires aux scénarios de décarbonation

4.1.1. Décarbonation du trafic aérien : 21 ressources identifiées comme critiques par l'UE

Sur la base de la méthodologie décrite dans [55], et brièvement exposée dans l'Annexe H, l'UE a établi une liste de ressources critiques pour son économie [49]–[52]. Cette liste, initiée en 2014, est mise à jour tous les trois ans environ et la dernière liste à jour fait état de 30 ressources critiques parmi les 66 ressources évaluées ; on précisera que les platinoïdes sont considérés comme une seule et même ressource, et que les terres rares sont séparées en terres rares de faible masse molaire et terres rares de masse molaire élevée. Le Tableau 13 récapitule les ressources identifiées comme CRM par l'UE. Les quatre ressources qui ont été ajoutées en 2020 sont la bauxite (pour le gallium comme évoqué dans l'Annexe G), le lithium, le titane, ainsi que le strontium.

Cette question des ressources critiques est particulièrement cruciale à l'échelle européenne car, même si l'Europe possède un certain potentiel minier [56], [57], à l'heure actuelle l'UE dépend à plus de 80% pour son économie de ressources minérales importées [49]. La production minière européenne ne couvre ainsi qu'entre 3% à 40% de ses besoins en fonction des ressources considérées, et pour certaines de ces ressources l'UE est même dépendante à 100% des importations. De plus, cette situation semble peu prête à évoluer rapidement pour des raisons de rentabilité économique, l'exploitation minière en Europe ayant des coûts de production élevés en raison des normes sociales et environnementales en vigueur. Dans une certaine mesure, les pays européens se sont aussi accommodés du fait de sous-traiter cette activité particulièrement polluante et impactante environnementalement hors de leurs frontières [57], [58]. Les citoyens et les états européens ne sont donc pas forcément prêts à accepter

la mise en production de nouvelles mines sur leur sol, sauf dans les pays où il y a une activité minière encore significative comme dans les pays du sud et de l'est de l'Europe, et dans une moindre mesure dans les pays scandinaves, l'Allemagne et le Royaume-Uni. L'Europe investit donc peu dans le domaine de l'exploration minière sur son sol et il y a souvent un manque de données précises concernant la connaissance des réserves et des ressources minières dont elle dispose [57].

2020 Critical Raw Materials (30)			
Antimony	Fluorspar	Magnesium	Silicon Metal
Baryte	Gallium	Natural Graphite	Tantalum
Bauxite	Germanium	Natural Rubber	Titanium
Beryllium	Hafnium	Niobium	Vanadium
Bismuth	HREEs	PGMs	Tungsten
Borates	Indium	Phosphate rock	Strontium
Cobalt	Lithium	Phosphorus	
Coking Coal	LREEs	Scandium	

Tableau 13 : Liste des CRM identifiés par l'UE [49]. HREEs désigne les terres rares de masse molaire élevée, LREEs celles de faible masse molaire, et PGMs désigne le groupe des platinoïdes (cf. Annexe H).

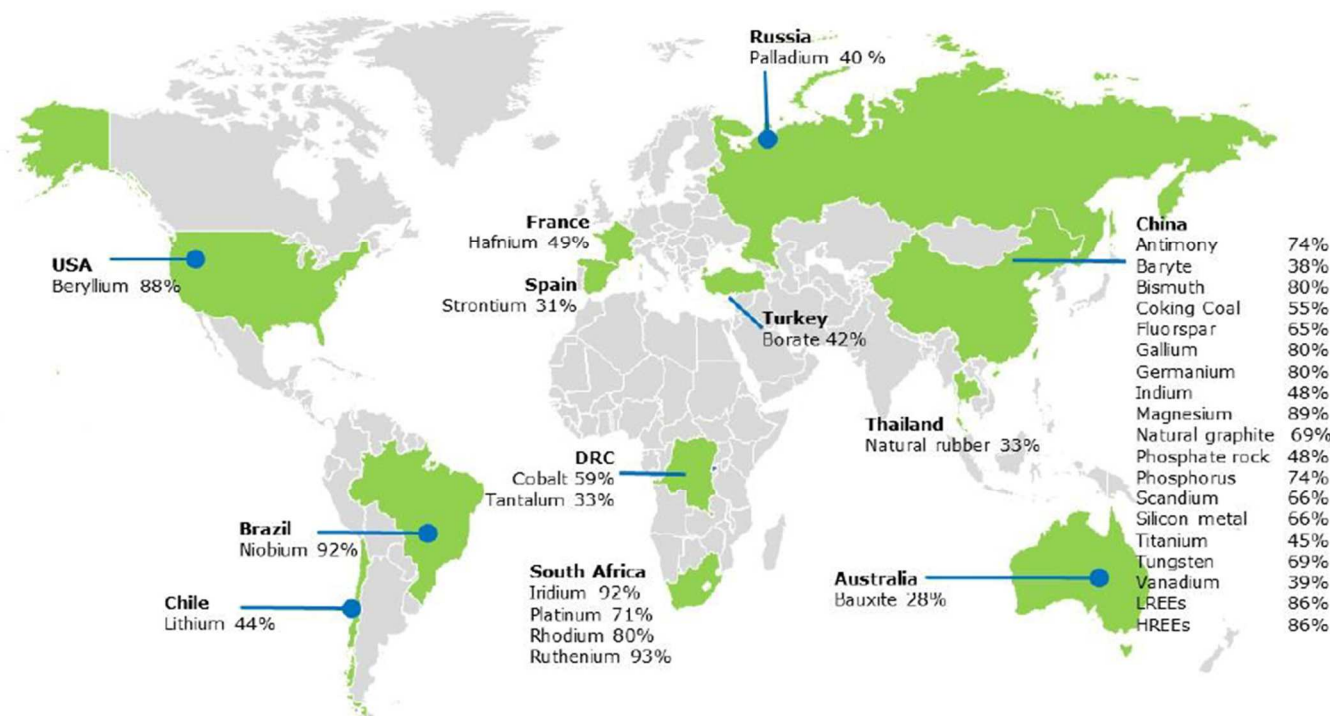


Figure 8 : Principaux lieux d'extraction des CRM [49].

De manière plus visuelle, les Figure 8 et Figure 9 illustrent la dépendance de l'UE vis-à-vis des ressources minérales. En effet, la Figure 8 montre pour chacune des CRM quel est le principal pays producteur à l'échelle mondiale. On notera que dans cette illustration le groupe des platinoïdes a été considéré élément par élément pour tenir compte de l'exception notable du palladium, seul platinoïde dont le premier producteur mondial n'est pas l'Afrique du Sud mais la Russie. La Figure 9 montre quant à elle quels sont les pays qui produisent le plus de CRM. A l'exception de

la France pour le hafnium et de l'Espagne pour le strontium, l'UE est donc presque totalement absente, alors que la Chine est omniprésente et domine très largement la production des CRM. Des données plus précises concernant la situation de l'UE en particulier sont illustrées dans l'Annexe H. Même s'ils ne sont pas considérés comme des ressources critiques, les métaux de base que sont le fer (base des aciers), l'aluminium et le cuivre sont aussi suivis par l'UE en raison des tonnages consommés et de leur omniprésence dans les infrastructures urbaines et industrielles [59].

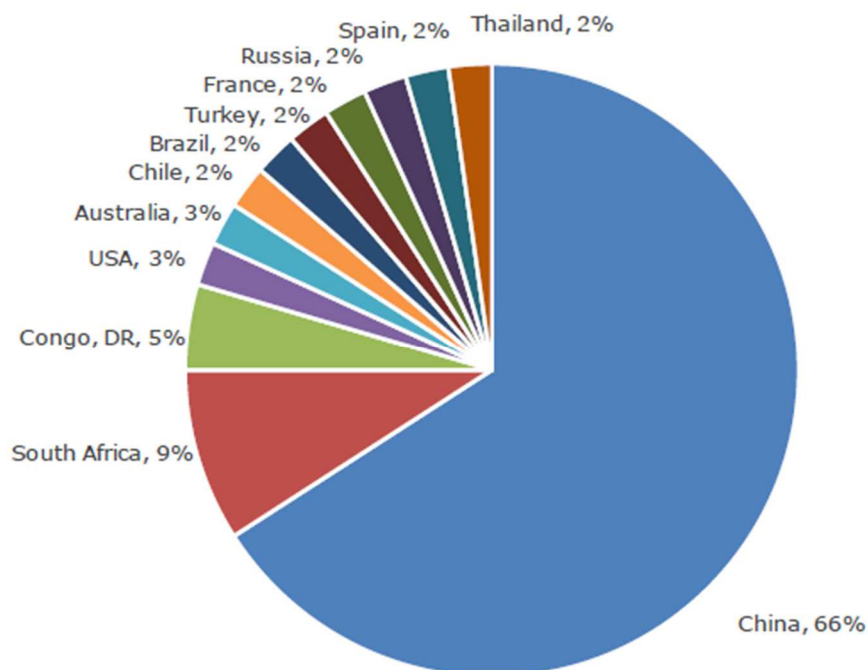


Figure 9 : Principaux pays producteurs de CRM [49].

Concernant la liste des CRM identifiés par l'UE, on remarquera la présence de plusieurs minerais que nous avons décidé de négliger lors de la quantification des empreintes matières des différents éléments du système avion (cf. Chapitre 3). Même s'ils sont peu utilisés pour le système étudié ici, leur criticité s'explique par leurs autres usages. Par exemple le phosphore est certes présent dans certains alliages métalliques, mais il est aussi utilisé pour certaines technologies de batteries et surtout pour la fabrication de phosphates utilisés dans l'agriculture. Le bore, utilisé lui aussi pour certains alliages, est surtout concerné par des usages diffus dans le textile, les conservateurs alimentaires, les verres et fibres de verre, ainsi que dans l'électronique et certaines technologies d'aimants permanents. Pour finir, le béryllium est quant à lui utilisé principalement en plasturgie pour des moules, en métallurgie pour faire des alliages résistants au frottement, et en électronique (il est à la fois bon isolant électrique et bon conducteur thermique). C'est en revanche un matériau toxique au sens de la réglementation européenne REACH (*Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals*) donc on cherche à le substituer dès que possible. On notera aussi que certains métaux apparaissant dans les empreintes matières du système avion ne sont certes pas identifiés comme CRM à l'heure actuelle mais les valeurs des indicateurs de criticité utilisés sont proches des seuils ; c'est le cas du chrome, du manganèse et du molybdène, et dans une moindre mesure du zirconium (cf. Annexe H).

Si on s'intéresse plus particulièrement aux ressources retenues dans notre étude, on notera que 21 des 36 ressources ont été identifiées comme critiques par l'UE, soit environ 58%. Sur la base de différentes données disponibles dans la littérature [52], [60]–[63], ainsi que sur le site du BRGM (<https://www.mineralinfo.fr/fr/securite-des-approvisionnements-pour-leconomie/substances-critiques-strategiques#les-analyses-par-substance>) ou sur celui de l'USGS (<https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/commodity-statistics-and-information>), entre autres, un tableau de synthèse a été réalisé pour recueillir les différentes données de criticité des ressources nécessaires au système avion, mais à l'échelle mondiale cette fois et non plus à l'échelle de l'UE uniquement (cf. Tableau 43, Annexe I). Ces données se focalisent pour partie sur les productions minières et métalliques mondiales des différentes ressources concernées, sur leurs réserves et ressources minières, ainsi que sur les HHI5 (*Herfindahl-Hirschman Index*, calculé sur les cinq principaux pays producteurs) et les WGI (*Worldwide Governance Indicators*) qui caractérisent ces productions (cf. Annexe H pour la définition de ces indicateurs). Elles sont exploitées tout au long de ce chapitre ainsi que des données complémentaires liées au potentiel de substitution, au recyclage, et aux enjeux économiques autour de ces ressources.

L'analyse des HHI5, tant en termes de production minière que de production métallique, quand elles existent (cf. Tableau 43, Annexe I, et les spécificités de production des différentes ressources étudiées), montre que pour 24 ressources sur les 36 concernées par cette étude, des valeurs supérieures à 2500 sont observées sur l'une ou l'autre des productions, souvent sur les deux dans les faits. Cela signifie que la production mondiale en question de cette ressource se concentre à hauteur de 50% minimum environ dans un seul pays, lui conférant une position dominante sur le marché de la ressource. On notera aussi que, parmi les 21 ressources identifiées comme CRM par l'UE, presque toutes appartiennent à cette liste de 24 ressources. Certaines ressources, comme les terres rares (Dy, La, Nd, Pr, Y), le magnésium, le niobium et le tungstène, présentent même des concentrations des productions minière ou métallique particulièrement importantes, avec des HHI5 supérieurs à 6400 soit un pays producteur qui détient de l'ordre de 80% du marché mondial ou plus. On remarquera par ailleurs que les chiffres calculés à l'échelle mondiale montrent une très grande cohérence avec ceux calculés à l'échelle plus restreinte de l'UE [49].

Concernant l'analyse des données par pays, la Chine se révèle être particulièrement dominante sur plusieurs ressources critiques comme les terres rares et le magnésium, et être un des acteurs majeurs de la production mondiale d'un certain nombre des ressources. Cela lui confère une position centrale en termes d'exploitation des ressources minérales mondiales, et de production des matières premières. Beaucoup de pays présentent une influence bien moindre, se concentrant souvent sur une ressource, voire 3 ou 4 tout au plus.

4.1.2. Ressources critiques et enjeux géopolitiques

L'intérêt de caractériser la concentration de la production des ressources minérales et des métaux au travers des HHI5 est de pouvoir les mettre en perspective des WGI des principaux pays producteurs et des enjeux géopolitiques qui peuvent en découler.

De manière schématique, à quelques exceptions, près on va trouver trois grands groupes de pays producteurs de ressources minérales :

- Les démocraties dites occidentales : USA, Canada, et pays de l'UE dans une bien moindre mesure, auxquels on rajoutera l'Australie et le Japon dans le cas de la production métallique principalement pour ce dernier ;
- Les puissances autocratiques que sont la Chine et la Russie ;
- Les pays en voie de développement avec une prédominance des états d'Amérique du Sud et d'Afrique.

Lorsque l'on regarde les WGI des différents pays mentionnés dans les HHI5 des productions minière ou métallique (cf. Tableau 43, Annexe I), à l'exception notable du Chili et de la Corée du Sud qui affichent des indicateurs de gouvernance proches de ceux des démocraties occidentales, tous les autres pays affichent un WGI moyen supérieur à 4, voire 5 ou 6 dans de très nombreux cas. Cela traduit souvent les problèmes de corruption, d'oppression des populations et de manque de transparence qui existent dans ces états dont les modes de gouvernance sont peu démocratiques. Comme cela a été évoqué précédemment, cela contribue fortement à rendre l'exploitation des ressources minières dans ces pays beaucoup plus rentable économiquement et moins contraignante environnementalement et socialement que dans les pays du groupe des démocraties occidentales. Pour ces derniers, ce sont avant tout des enjeux de souveraineté et de maîtrise de l'ensemble de la chaîne de production de certaines technologies jugées comme indispensables qui pourraient les inciter à être plus présents sur les productions minière ou métallique de certaines ressources. Par exemple, la France a fait le choix du nucléaire très majoritairement concernant sa production d'électricité, elle est donc présente parmi les principaux producteurs de hafnium et de zirconium, métaux indispensables à cette industrie. On la retrouve aussi qui s'implante sur le marché des ressources pour les EnR avec le silicium pour le photovoltaïque et le néodyme pour l'éolien, ou avec le projet de mine de lithium pour les batteries, entre autres ressources, envisagé sur le site de Beauvoir à Echassières dans l'Allier (<https://www.mineralinfo.fr/fr/actualite/actualite/octroi-de-prolongation-du-permis-dit-de-beauvoir-allier-puy-de-dome-societe>, https://www.lamontagne.fr/echassieres-03330/actualites/l-une-des-plus-grandes-mines-d-europe-de-lithium-verra-le-jour-dans-l-allier-d-ici-2027_14206172/). Les USA sont quant à eux présents sur les marchés des ressources spécifiques au nucléaire (les USA et la France possèdent les premiers et deuxièmes parcs mondiaux en termes de capacité de production d'énergie nucléaire), mais aussi pour les applications militaires (hafnium, rhénium et tantale pour les superalliages, titane pour les alliages à très haute tenue mécanique).

Du point de vue géostratégique, la Figure 10 ci-après établie par Fizaine sur un panel de 45 ressources [60], mais dont 31 sont communes aux 36 ressources considérées dans notre étude, interroge sur la question de la dépendance des démocraties occidentales au reste du monde en termes de ressources minérales. Cette question est particulièrement critique pour l'UE comme cela a été évoqué dans la section précédente mais, même pour l'Australie, les USA, le Canada et le Japon, la dépendance est importante. Notamment, le Japon est présent sur les productions métalliques de certaines ressources, mais il est très peu présent en ce qui concerne les productions minières et n'a donc pas la réelle maîtrise de ses chaînes d'approvisionnement. Pour comparaison, une analyse similaire à celle proposée dans la Figure 10 a été menée à partir des HHI5 des productions minières et métalliques des 36 ressources qui nous concernent. On retrouve des résultats tout à fait semblables : la Chine est présente dans le HHI5 de 86% des ressources étudiées (31/36), suivie de la Russie à 58% (21/36), de l'Australie à 53% (19/36) et des USA à 50% (18/36).

Ce graphique est d'autant plus préoccupant dans le contexte des tensions internationales résultant de la guerre en Ukraine menée par la Russie, et de celles observées dans la zone indopacifique avec l'ambition affichée par la Chine d'annexion de Taïwan. En effet, la Russie et surtout la Chine se trouvent dans des positions dominantes, voire hégémoniques, en ce qui concerne la production mondiale de métaux. Ces deux pays possèdent donc de véritables arguments de pression sur les approvisionnements en ressources des démocraties mondiales, et sur leurs économies [15], [19], [64]. Dans le cas des 36 ressources qui sont au cœur de cette étude, seuls le hafnium et l'indium n'ont pas la Chine ou la Russie, quand ce ne sont pas les deux à la fois, comme faisant partie des HHI5 des productions minières ou métalliques (cf. Tableau 15, Section 4.3). La question économique est évoquée plus en

détail ultérieurement dans la Section 4.4.1, mais les positions dominantes sur les approvisionnements en ressources mondiales de ces deux pays leur assurent un pouvoir d'influence certain sur les évolutions futures des prix de très nombreuses ressources minérales, en particulier dans le cas des métaux rares pour lesquels il n'y a pas de marché organisé. Qui plus est, contrairement aux pays en voie de développement, la Chine et la Russie ont elles aussi des développements économiques basés sur un fort développement technologique des modes de vie, elles ne sont donc pas que productrices de ces ressources mais aussi utilisatrices. En cas de tensions sur certaines ressources, il serait donc tout à fait possible que ces deux pays restreignent leurs quotas à l'export en privilégiant leurs propres besoins, renforçant ainsi leur contrôle de ces marchés et la dépendance des autres pays vis-à-vis d'eux. Les quotas à l'exportation des terres rares par la Chine font ainsi l'objet de nombreuses contestations, de la part de l'UE et des USA notamment, depuis bientôt deux décennies (<https://www.usinenouvelle.com/article/la-chine-maintient-ses-quotas-a-l-export.N1310587>).

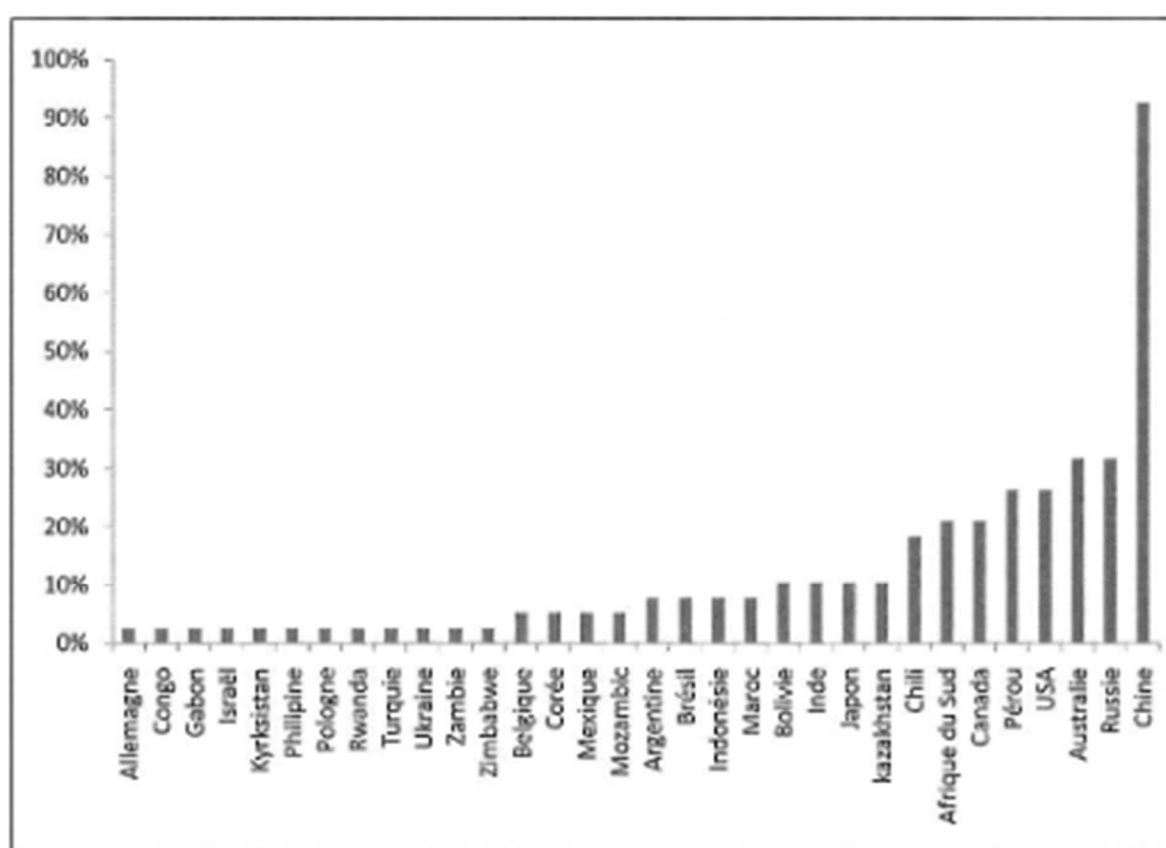


Figure 10 : Taux de présence des pays mentionnés parmi les quatre premiers producteurs mondiaux établis sur un panel de 45 métaux [60].

4.1.3. Productions des ressources et enjeux géopolitiques : quelles perspectives ?

Si, pour l'instant, les tensions induites par la guerre en Ukraine et les sanctions internationales à l'encontre de la Russie n'ont pas entraîné des envolées spectaculaires des cours des matières premières (cf. Section 4.4.1, Annexe I, et <https://www.lme.com/>), les augmentations des prix observées laissent entrevoir ce que pourrait être une augmentation tendancielle des cours sur le long terme liée à un contexte de tensions internationales qui serait amené à perdurer. Quand on voit aussi le poids de la Chine par rapport à celui de la Russie dans la production mondiale de ressources et de métaux en particulier (cf. Figure 10), cela soulève d'importantes questions sur ce qui

se passerait si des tensions similaires devaient apparaître à propos de l'indépendance de Taïwan. Les démocraties occidentales auraient-elles la capacité de s'opposer à la Chine sans craindre des ruptures d'approvisionnement majeures qui résulteraient de sanctions internationales imposées à ce pays ? Et quels niveaux pourraient-être atteints en termes d'envolées des prix des matières premières et de tensions sur les approvisionnements ?

Un autre aspect qui laisse à penser que les positions dominantes de la Chine et de la Russie ne semblent pas prêtes à s'estomper dans les décennies à venir est la façon dont ces deux pays gèrent leurs réserves minières. En effet, lorsque l'on compare les HHI5 des productions minières et métalliques aux HHI5 des réserves minières pour les différentes ressources minérales concernées par cette étude (cf. Tableau 43, Annexe I), on peut remarquer que, pour un certain nombre de ressources, les poids de la Chine et de la Russie sont plus importants en termes de réserves qu'en termes de productions. C'est le cas pour le molybdène et le lithium pour la Chine, ou pour le cuivre, le vanadium et le zinc (donc l'indium et le cadmium qui en sont des sous-produits) pour la Russie. Dans l'ensemble, les productions de ces pays semblent bien dimensionnées par rapport à leurs réserves minières. On retrouve ainsi des poids similaires dans les HHI5 des productions et des réserves pour le tungstène dans le cas de la Russie, ou encore pour le nickel, le rhénium et le tellure pour les deux pays. Cette gestion de leurs réserves leur permet donc d'espérer garder une position forte dans les décennies à venir, là où il n'est pas rare de voir certains pays en voie de développement surexploiter leurs réserves minières en raison d'économies beaucoup plus faibles et moins diversifiées. Les travaux de Fizaine [60], déjà évoqués précédemment, montrent ainsi que la Chine devrait voir son hégémonie faiblement diminuer (en raison d'une surexploitation de ses réserves de terres rares), mais elle restera quand même le premier producteur de métaux au monde. La Russie, ainsi que les USA devraient quant à eux voir leurs poids fortement augmenter, tout comme l'Ukraine. Pour les principaux autres pays producteurs de métaux, le Kazakhstan devrait aussi voir son poids augmenter alors que ceux de l'Australie, du Brésil et du Chili devraient diminuer. Les rapports de force mondiaux en termes d'approvisionnement en métaux, et en métaux rares notamment, devraient donc évoluer mais à la marge dans les décennies à venir. De même, les tensions internationales devraient persister, y compris concernant les velléités d'annexion de l'Ukraine par la Russie eu égard à son potentiel minier. *Idem*, la présence du Kazakhstan, voisin de la Russie et ancien membre de l'Union des Républiques Socialistes Soviétiques (URSS), dans la liste des pays qui vont voir leur poids augmenter en termes de production mondiale de métaux peut laisser craindre d'éventuelles tensions à venir, surtout si celui-ci se dissocie de certaines prises de positions récentes de la Russie alors qu'il en a longtemps été un allié (<https://www.lesechos.fr/monde/enjeux-internationaux/le-kazakhstan-seloigne-a-son-tour-de-la-russie-1414535>, <https://www.connaissancedesenergies.org/tribune-actualite-energies/le-kazakhstan-une-puissance-energetique-meconnue-dans-un-environnement-incertain>, <http://institut-du-pacifique.org/2022/03/29/positionnement-des-pays-de-la-zone-indopacifique-face-au-conflit-ukrainien/>).

4.2. Substitution et recyclabilité des ressources

4.2.1. Possibilités de substitution

Lorsque l'on aborde les enjeux de criticité des ressources et de tensions concernant leur disponibilité, se pose la question du caractère substituable de certaines ressources particulièrement en tension par d'autres qui le seraient moins. A partir des fiches de criticité des ressources minérales établies par le Bureau des Recherches Géologiques et Minières, BRGM, et son site <https://www.mineralinfo.fr/fr/securite-des-approvisionnements-pour-leconomie/substances-critiques-strategiques#les-analyses-par-substance>, par le *United States Geological Survey*,

USGS, <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/commodity-statistics-and-information>, ainsi que grâce à certains travaux réalisés dans le cadre de la Commission Européenne [65], il a été possible de caractériser le potentiel de substituabilité des différentes ressources concernées par cette étude. Ces données sont fournies dans le Tableau 43 (cf. Annexe I), mais une synthèse équivalente est aussi disponible dans [65].

Il ressort des données recueillies que, pour les applications qui concernent cette étude, les ressources minérales sont finalement peu substituables. En effet, si pour certaines applications à très faible valeur ajoutée il peut être aisé de remplacer une ressource par une autre, par exemple le cuivre remplacé par du plastique pour les canalisations, pour les applications à très forte valeur ajoutée et s'appuyant sur des technologies complexes le choix de tel ou tel matériau, ou de telle ou telle ressource, repose sur un long processus d'optimisation de la technologie. Substituer une ressource par une autre s'accompagne donc en général dans ce cas d'une diminution des performances, ou alors d'une augmentation du coût de la technologie. Comme conducteur électrique, le cuivre peut ainsi être remplacé par l'aluminium, moins cher mais moins bon conducteur, ou par l'argent et l'or beaucoup plus chers. Sauf autre contrainte particulière comme la tenue mécanique des câbles qui fait que l'on privilégie l'acier au cuivre pour les lignes à haute tension au détriment des performances de conductivité électrique (cf. Tableau 39, Annexe E), on voit que le cuivre est de loin le meilleur compromis performance / coût pour le transport de l'électricité.

Concernant les métaux majeurs, le nickel au même titre que le cuivre est difficilement substituable car il est concerné par des usages à forte valeur ajoutée que sont les aciers haut de gamme, les superalliages et les batteries. Le lithium, qui n'est pas à proprement parler un métal majeur mais qui est exploité pour lui-même et non en tant que sous-produit d'un autre minerai, est lui aussi difficilement substituable dans les applications qui concernent cette étude (allègement des alliages d'aluminium notamment et batteries). En revanche les autres métaux majeurs que sont le fer, l'aluminium, le zinc, le plomb et l'étain peuvent être substitués par d'autres matériaux dans leurs autres usages, notamment dans le domaine de la construction, ce qui laisse moins craindre un risque de tensions.

La question de la substituabilité des ressources est plus critique pour l'ensemble des métaux ou des ressources dits rares. Les platinoïdes et les terres rares forment des familles d'éléments au sein desquelles la substitution est possible du point de vue de leurs propriétés physico-chimiques mais, d'un point de vue minier, les éléments d'une même famille sont souvent exploités ensemble. Ils sont donc concernés par les mêmes tensions en termes de disponibilité de la ressource et leurs coûts sont assez similaires.

Pour illustrer la difficulté à substituer une technologie par une autre, le cas du cobalt est emblématique. Dans notre étude il ne ressort pas comme une ressource indispensable au stockage de l'énergie électrique et il n'intervient que dans la part des avions *via* les superalliages et les aciers à très haute tenue mécanique. Comme cela a été évoqué, cela découle du fait que les technologies de batteries utilisant le cobalt sont parmi celles qui présentent la meilleure densité énergétique (c'est-à-dire la plus grande capacité à stocker de l'énergie par unité de masse). Elles sont donc privilégiées pour les applications où les batteries seront embarquées sur un véhicule pour des raisons évidentes de minimisation de la masse. *A contrario*, les technologies à base d'oxyde de manganèse présentent une densité énergétique plus faible qui n'est pas un problème dans le cas du stockage stationnaire. Dans le cadre de notre étude il ne serait donc pas raisonnable d'envisager une substitution du manganèse par le cobalt pour la partie stockage d'électricité. De façon similaire, il paraît peut raisonnable d'envisager un remplacement à grande échelle des technologies de panneaux photovoltaïques basées sur le silicium métallique par des technologies cadmium-tellure

ou indium-gallium-sélénium beaucoup plus chères et complexes à mettre en œuvre. Ces technologies sur couches minces resteront des technologies de niche pour des applications à très forte valeur ajoutée (satellites par exemple).

Concernant les différents éléments d'alliage, il est souvent évoqué qu'ils peuvent être substitués par d'autres éléments (cf. Tableau 43, Annexe I), ce qui revient à dire que certaines nuances d'alliages ou d'aciers peuvent être remplacées par d'autres. Dans les faits, dès que l'on parle de technologies complexes et optimisées cette substitution n'est pas forcément plus pertinente que les changements de technologies évoqués ci-dessus dans le cas des batteries ou des panneaux solaires photovoltaïques. Par exemple, changer de nuance d'alliage d'aluminium pour un alliage qui contiendrait moins de lithium ou moins de cuivre aboutira à choisir un alliage plus lourd ou moins ductile, ce qui amènerait à revoir le dimensionnement de la structure des avions par exemple qui s'en trouveraient alourdis, alors que le critère minimisation de la masse est absolument essentiel dans l'optique de la diminution de la consommation de carburants des avions. *Idem*, changer de nuance de superalliage aboutira sans doute à choisir une nuance dont la tenue mécanique à très hautes températures sera moins bonne, et donc à une diminution des températures de fonctionnement des turbomachines et de leur efficacité énergétique (une turbomachine fonctionnant selon le principe du cycle de Carnot). Dans le cas des installations de production d'énergie, si on considère le cas des centrales nucléaires, les enjeux de résistance à la corrosion sous contrainte des conduites d'eau sont des enjeux critiques et le choix des bonnes nuances d'aciers inoxydables est primordial.

Au final, l'une des principales opportunités de substitution dans le cadre de notre étude reste le remplacement des alliages d'aluminium et de certains aciers par des composites à fibres et matrice polymère. Même si cette solution n'est pas sans poser certains problèmes d'ACV en raison de la très faible recyclabilité de ces composites (cf. Annexe D), c'est une piste qui est déjà fortement exploitée notamment pour le fuselage et la voilure des avions, ou les pales des éoliennes.

A la vue de ces observations, la substitution des ressources critiques par d'autres ressources moins critiques n'apparaît donc pas comme une solution qui pourrait contribuer de façon significative à résoudre d'éventuels problèmes de tensions sur les ressources nécessaires à la décarbonation du trafic aérien.

4.2.2. Quel impact du recyclage ?

Un autre levier auquel on pense lorsque l'on parle de minimiser les besoins en ressources est l'apport du recyclage. En effet, de plus en plus on entend parler de la notion de mines urbaines pour désigner tous les produits en fin de vie et déchets de production qui représentent des quantités de ressources significatives [66]–[70]. Ces ressources, dites ressources secondaires, pourraient donc contribuer à répondre à la demande de nouvelles ressources en venant compléter les flux des ressources dites primaires, donc issues de l'extraction.

Si cette notion de mines urbaines revêt autant d'importance à l'échelle de l'UE, mais aussi des pays d'Amérique du Nord ou du Japon, c'est que ces pays sont très dépendants de technologies fortement consommatrices de ressources minérales dont ils ne disposent pas sur leur territoire. Ils sont aussi producteurs de grandes quantités de déchets technologiques. Comme l'UE, les USA ou le Japon ont établi leurs listes de CRM qui se recoupent quasiment avec celle de l'UE. Il y a donc derrière la question des ressources secondaires issues des mines urbaines une question d'indépendance et de souveraineté nationale vis-à-vis des besoins en ressources minérales stratégiques et critiques.

Le second intérêt résulte dans le fait que l’empreinte environnementale, et sociétale, des ressources secondaires est bien plus faible que celle des ressources primaires comme l’illustre le Tableau 14 qui montre les gains de consommation d’énergie entre productions primaires et secondaires pour différents métaux [63].

Meta/Product	% Savings	References
Aluminium	90–97	Norgate & Rankin (2002), Gaballah and Kanari (2001), Quinkert et al. (2001), International Aluminium Institute (2011), Chapman and Roberts (1983)
Copper	84–88	Norgate and Rankin (2002), Gaballah and Kanari (2001)
Gold	98	ecoinvent v2.2
Lead	55–65	Norgate and Rankin (2002), Gaballah and Kanari (2001)
Magnesium	97	USEPA (1994)
Nickel	90	Norgate and Rankin (2002)
Palladium	92–98	ecoinvent v2.2
Platinum	95	ecoinvent v2.2
Rhodium	98	ecoinvent v2.2
Silver	96	ecoinvent v2.2
Steel	60–75	Norgate and Rankin (2002), Gaballah and Kanari (2001)
Stainless Steel (304)	68	Johnson et al. (2008), Eckelman (2010)
Titanium	67	Chapman and Roberts (1983)
Zinc	60–75	Norgate and Rankin (2002), Gaballah and Kanari (2001)

Tableau 14 : Gains de consommation d’énergie entre productions primaires et secondaires des métaux [63].

Néanmoins, lorsque l’on parle recyclabilité des matériaux, il est nécessaire de distinguer le taux de recyclage, qui va correspondre au pourcentage de la ressource qui est effectivement recyclée, soit en circuit court *via* les déchets de production directement réinjectés dans les processus industriels, soit *via* la collecte et le recyclage des objets en fin de vie (on parle de EOL-RR pour *End-Of-Life Recycling Rate*), de la contribution de la ressource recyclée dans les flux entrants des matières premières (on parle alors de EOL-RIR pour *End-Of-Life Recycling Input Rate*). En ce qui concerne le EOL-RR, c’est donc surtout l’efficacité des filières de recyclage qui va entrer en considération, notamment dans le cas de l’existence de filières REP (Responsabilité Elargie du Producteur) qui imposent aux fabricants de collecter leurs produits en fin de vie pour qu’ils soient recyclés comme c’est le cas pour les VHU (Véhicules Hors d’Usage des particuliers) ou les DEEE (Déchets d’Equipements Electriques et Electroniques). L’efficacité des procédés de recyclage va aussi jouer un rôle important.

En ce qui concerne le EOL-RIR la problématique est différente car, bien sûr, le taux de recyclage de la ressource va entrer en ligne de compte, mais cela va aussi dépendre énormément de la durée d’immobilisation de la ressource dans les technologies ou les objets qui l’utilisent, ainsi que de l’évolution de la demande pour cette ressource. Si on prend par exemple le cas du cuivre dont le taux de recyclage est parmi les plus élevés (55%, *cf.* Tableau 43, Annexe I), comme il est souvent immobilisé plusieurs décennies en moyenne dans nombre d’infrastructures de production, de transport et de stockage d’électricité, ce taux de recyclage s’applique sur un tonnage de la ressource extrait il y a plusieurs décennies. Or, en l’espace de 25-30 ans, la production minière de cuivre a été multipliée par deux selon

les données du BRGM (cf. Figure 11, source : <https://www.mineralinfo.fr/fr/secureite-des-approvisionnements-pour-leconomie/substances-critiques-strategiques#les-analyses-par-substance>). 55% de la production d'il y a 25-30 ans correspondent donc à environ 27,5% de la demande actuelle ; le EOL-RIR du cuivre est plutôt estimé dans la réalité à 32% (cf. Tableau 43, Annexe I). La Figure 12 ci-après illustre les EOL-RIR pour différents éléments de la classification périodique de Mendeleïev (cf. Annexe B). Ces valeurs sont obtenues à l'échelle de l'UE mais des valeurs plus complètes concernant les différentes ressources au cœur de cette étude, estimées à l'échelle mondiale cette fois-ci d'où certains écarts, sont disponibles dans le Tableau 43 (cf. Annexe I).

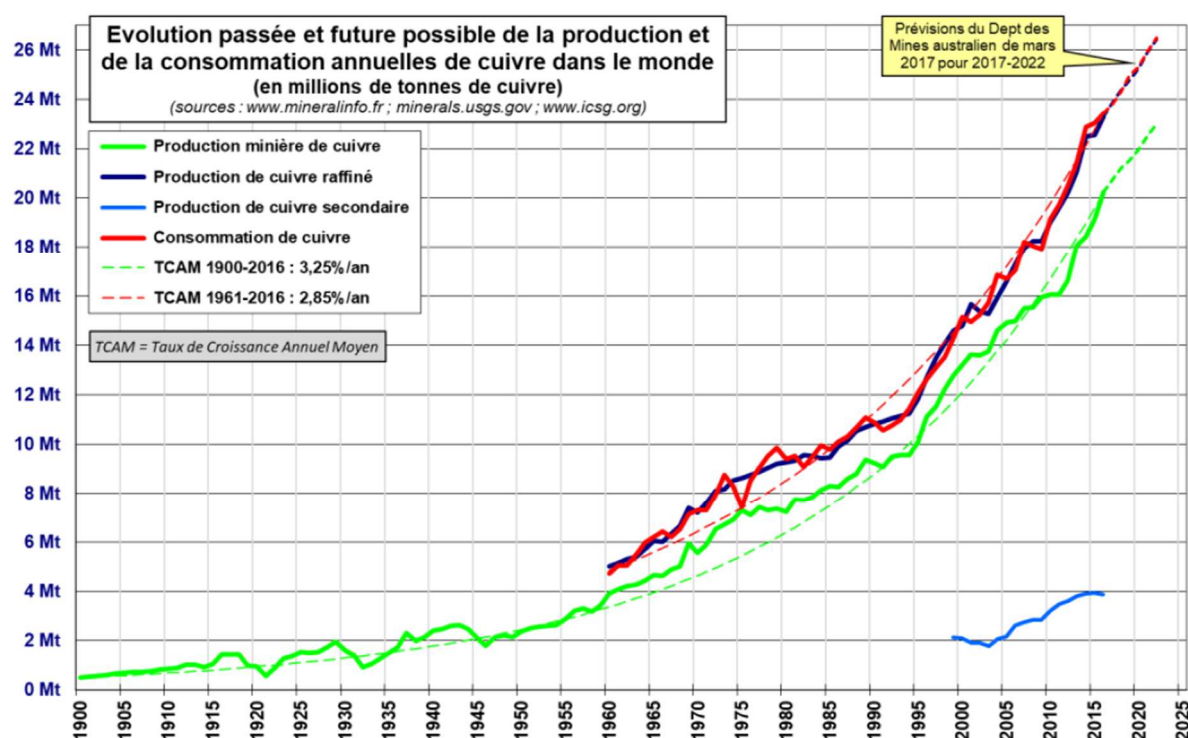


Figure 11 : Evolutions de la production et de la consommation mondiales de cuivre (<https://www.mineralinfo.fr>).

Au final, lorsque l'on regarde l'ensemble des données synthétisées dans le Tableau 43, à l'exception de l'argent et du plomb pour lesquels la demande stagne, et du rhénium dont le marché concerne à 80% les superalliages aéronautiques, toutes les autres ressources concernées par cette étude affichent un EOL-RIR inférieur à 50%, et significativement plus faible que le taux de recyclage de la ressource. Pour nombre de ces ressources, il est même souvent inférieur à 10%, voire à 1% dans le cas des technologies récentes en plein essor (terres rares pour l'éolien, silicium métallique pour le photovoltaïque ou lithium pour les batteries par exemple). Seuls les métaux majeurs et les principaux éléments d'alliage des aciers affichent des EOL-RIR autour des 20-30%. Tous ces chiffres s'expliquent aisément lorsque l'on analyse les taux de croissance annuelle de la demande pour ces ressources qui sont souvent de 3-8%, voire au-delà des 10% (pour rappel, une croissance annuelle de la demande de 3% implique un doublement de la demande tous les 25 ans environ). Pour reprendre les propos de Labbé [71], cette notion d'immobilisation de la ressource mise en regard de la croissance de la demande représente une limite physique forte à la contribution du recyclage dans l'approvisionnement en ressources minérales.

Néanmoins, même si le EOL-RIR apparaît comme l'indicateur pertinent pour quantifier une contribution de la ressource secondaire à la demande souvent faible malheureusement, l'amélioration de la recyclabilité des

matériaux reste une nécessité car, en améliorant le taux de recyclabilité de la ressource, cela contribue à améliorer le EOL-RIR. Cette question est d'autant plus cruciale que, dans les faits, la part des ressources secondaires est surtout alimentée par les déchets de production (*new scraps*) tels que les copeaux d'usinage qui sont réutilisés directement dans les processus de production industrielle. C'est le cas pour nombre d'aciers ou d'alliages métalliques non-ferreux, ainsi que pour leurs éléments d'alliage. La contribution des déchets en fin de vie (*old scraps*) via le EOL-RR est généralement assez faible et le recyclage de ces déchets peut s'avérer d'autant plus délicat qu'il s'agit de matériaux complexes et à très forte valeur ajoutée comme ceux utilisés dans les technologies de l'aéronautique ou de l'énergie [72]–[74] ; nous reviendrons ultérieurement sur cet aspect.

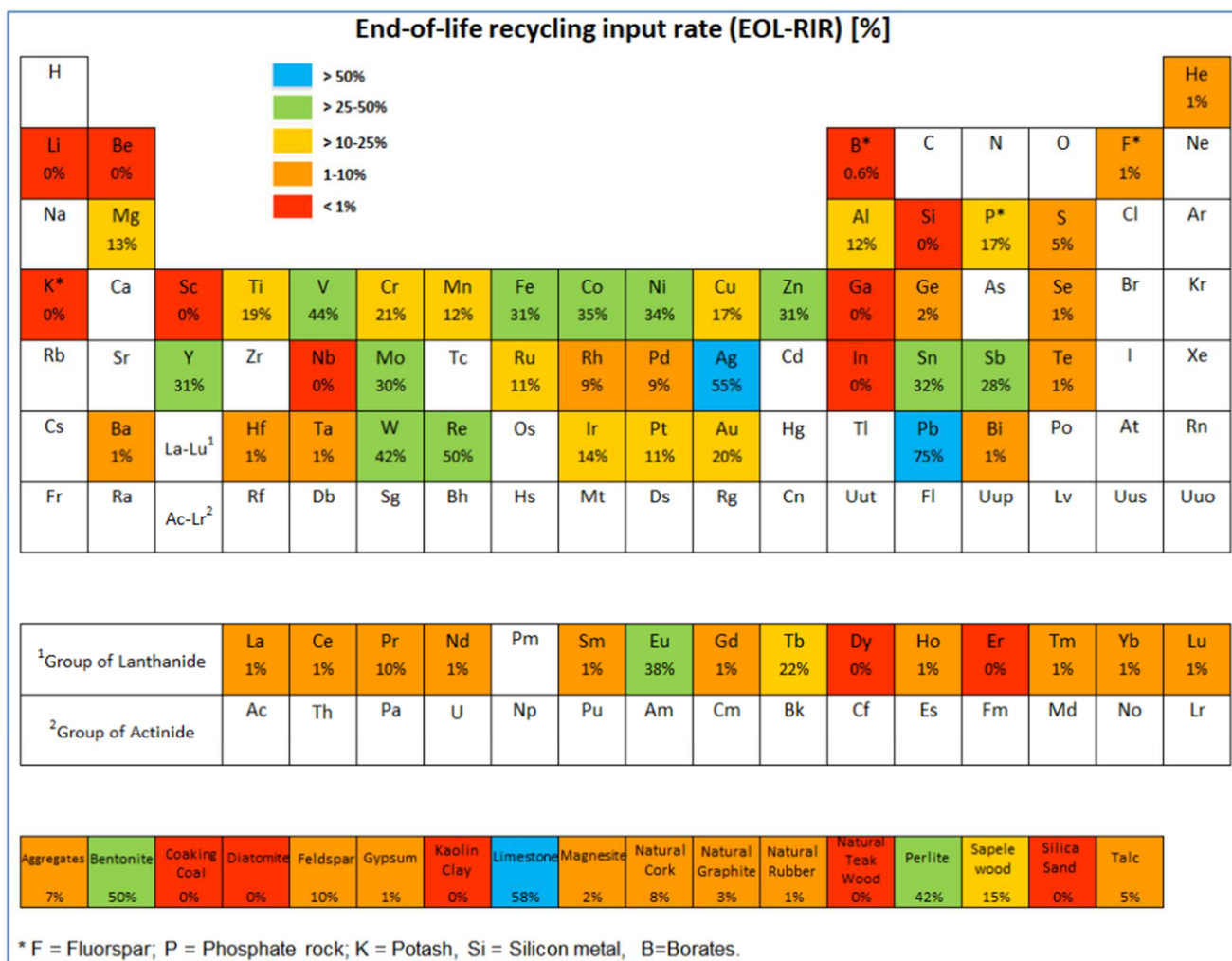


Figure 12 : EOL-RIR calculés à l'échelle de l'UE pour différentes ressources [61].

4.3. Besoins en ressources minérales vs. capacités de la production minière

4.3.1. Risques de tensions induits par les scénarios de décarbonation de l'aérien

Dans le but de quantifier plus précisément les enjeux de disponibilité des ressources par rapport aux besoins des scénarios de décarbonation de l'aérien, il a été décidé d'exprimer les quantités de ressources nécessaires à la mise en œuvre des scénarios en pourcentages des réserves minières connues. La comparaison avec les réserves a bien sûr été privilégiée à une comparaison avec les ressources minières en raison du caractère incertain que revêt la

notion de ressource minière en termes de teneur en minerais et de coûts d'exploitation réels (cf. Annexe G). Tant qu'une ressource minière n'est pas *a minima* mesurée, voire requalifiée en réserve, il est au final difficile de connaître avec précision la quantité de minerai dont on disposera vraiment.

En parallèle de cette approche de quantification d'un risque de pénurie de la ressource en termes de stocks, une quantification en termes de flux a aussi été proposée. En effet, même si les réserves sont conséquentes à l'échelle des besoins estimés, si les capacités de production annuelle de la ressource ne peuvent suivre la demande cela entraînera un retard dans le déploiement de la technologie qui utilise cette ressource. Faute d'avoir des informations sur les flux de matières annuels spécifiques aux technologies concernées par cette étude, il n'a pas été possible de proposer un modèle qui aurait intégré une croissance progressive du besoin à partir d'une année de référence donnée, ainsi que la forte accélération attendue à partir de 2036 et l'introduction massive des électrocarburants puis de l'hydrogène. Le parti a donc été pris de considérer les besoins en ressources cumulés à l'horizon 2050 et de les diviser par les 28 années de la période 2023-2050 afin d'estimer une demande annuelle moyenne sur la période d'étude associée à la décarbonation du trafic aérien. C'est ce chiffre qui a été comparé aux capacités de production annuelle pour chacune des ressources considérées.

L'ensemble des données ainsi quantifiées est fourni dans le Tableau 15 ci-après. Ces données ont été calculées à partir des données des réserves minières et des capacités de production renseignées dans le Tableau 43 (cf. Annexe I). Concernant les productions annuelles nous avons considéré les productions minières prioritairement, la production métallique et la demande pouvant intégrer une contribution du recyclage des déchets en fin de vie et des déchets de production. L'intérêt de raisonner de cette façon est que cela permet une approche conservative des enjeux de tensions sur les approvisionnements ; si les EOL-RIR s'améliorent, alors la production minière ne devra pas croître aussi rapidement que la production métallurgique *via* la demande, et les tensions seront moindres que celles prévues. Il s'agit là d'un choix arbitraire et discutable mais qui peut se justifier par le fait que, *a priori*, c'est la production minière qui risque d'être la plus limitante car ne pouvant pas s'adapter aussi rapidement à la demande que la production métallique, ce en raison de ses infrastructures plus lourdes. Néanmoins, dans les faits cette distinction importe peu pour l'instant pour la majeure partie des ressources étudiées ici, les productions minières et métallurgiques étant souvent très proches en raison d'EOL-RIR faibles voire très faibles. On notera que, dans le cas de l'aluminium, les données minières étaient exprimées en tonnages de bauxite ; la conversion en tonnages d'aluminium a donc été faite sur la base d'1 t d'Al pour 4 t de bauxite (cf. Annexe G). En outre, pour le magnésium, le silicium, le titane et le zirconium, ce sont les productions métalliques qui ont été considérées car elles étaient beaucoup plus pertinentes dans la mesure où, dans la très grande majorité des applications, ces éléments ne sont pas utilisés sous forme métallique. Autres cas particuliers, le manganèse et certaines terres rares pour lesquels les données sont exprimées en tonnages de silico- et ferro-manganèse, ou de l'ensemble des oxydes de terres rares. Même s'il s'agit des formes minérales sous lesquelles ces ressources sont exploitées, il n'a pas été possible à partir de ces seuls chiffres d'estimer les parts respectives des métaux purs.

	HHI5 Chine / Russie	Réserves minières	Besoins à l'horizon 2050		Production minière annuelle	Demande moyenne annuelle pour les scénarios	
			S1	S2		S1	S2
Aluminium	X / X	7500 Mt	17,8 Mt – 0,2%	24,3 Mt – 0,3%	65 Mt.an ⁻¹	0,6 Mt.an ⁻¹ – 1,0%	0,9 Mt.an ⁻¹ – 1,3%
Argent	X / X	503 kt	20,1 kt – 4,0%	27,7 kt – 5,5%	26,5 kt.an ⁻¹	0,7 kt.an ⁻¹ – 2,7%	1,0 kt.an ⁻¹ – 3,7%
Cadmium	X / -	690 kt	3,0 kt – 0,4%	4,1 kt – 0,6%	26,4 kt.an ⁻¹	0,1 kt.an ⁻¹ – 0,4%	0,2 kt.an ⁻¹ – 0,7%
Chrome	X / X	145 Mt	11,3 Mt – 7,8%	15,5 Mt – 10,7%	8,4 Mt.an ⁻¹	0,4 Mt.an ⁻¹ – 4,8%	0,6 Mt.an ⁻¹ – 6,6%
Cobalt	X / -	7 Mt	24,3 kt – 0,3%	24,3 kt – 0,3%	137,8 kt.an ⁻¹	0,9 kt.an ⁻¹ – 0,6%	0,9 kt.an ⁻¹ – 0,6%
Cuivre	X / X	777 Mt	8,6 Mt – 1,1%	11,8 Mt – 1,5%	20,2 Mt.an ⁻¹	0,3 Mt.an ⁻¹ – 1,5%	0,4 Mt.an ⁻¹ – 2,1%
Dysprosium*	X / -	601,3 kt	11,7 kt – 1,9%	16,2 kt – 2,7%	1,3 kt.an ⁻¹	0,4 kt.an ⁻¹ – 31,1%	0,6 kt.an ⁻¹ – 44,5%
Etain	X / -	2,1-4,8 Mt	2,7 kt – 0,1%	2,8 kt – 0,1%	398 kt.an ⁻¹	0,1 kt.an ⁻¹ – 0,02%	0,1 kt.an ⁻¹ – 0,03%
Fer	X / X	230000 Mt	139,3 Mt – 0,1%	191,8 Mt – 0,1%	1500 Mt.an ⁻¹	5,0 Mt.an ⁻¹ – 0,3%	6,9 Mt.an ⁻¹ – 0,5%
Gallium	X / X	Non chiffrées	-	-	435 t.an ⁻¹	0,2 kt.an ⁻¹ – 50,0%	0,3 kt.an ⁻¹ – 69,0%
Graphite	X / -	230 Mt	138,8 kt – 0,1%	191,1 kt – 0,1%	1 Mt.an ⁻¹	5,0 kt.an ⁻¹ – 0,5%	6,8 kt.an ⁻¹ – 0,7%
Hafnium		1,1 Mt	124,3 t – 0,01%	162,8 t – 0,01%	70-80 t.an ⁻¹	4,4 t.an ⁻¹ – 6,3%	5,8 t.an ⁻¹ – 8,3%
Indium		380 kt	9,2 kt – 2,4%	12,6 kt – 3,3%	0,8 kt.an ⁻¹	0,3 kt.an ⁻¹ – 41,1%	0,5 kt.an ⁻¹ – 56,3%
Iridium**	- / X	1,5 kt	15,0 t – 1,0%	21,1 t – 1,4%	8-8,5 t.an ⁻¹	0,5 t.an ⁻¹ – 6,7%	0,8 t.an ⁻¹ – 9,4%
Lantane*	X / X	137-375 Mt tous oxydes de REE	-	-	143 kt.an ⁻¹ tous oxydes de REE	-	-
Lithium	X / -	8,3-14 Mt	13,6 kt – 0,2%	18,1 kt – 0,2%	36,5 kt.an ⁻¹	0,5 kt.an ⁻¹ – 1,3%	0,6 kt.an ⁻¹ – 1,8%
Magnésium	X / X	Non chiffrées	-	-	1,1 Mt.an ⁻¹	3,1 kt.an ⁻¹ – 0,3%	4,2 kt.an ⁻¹ – 0,4%
Manganèse	X / -	810 Mt silico et ferromanganèse	-	-	19 Mt.an ⁻¹ silico et ferromanganèse	-	-
Molybdène	X / -	18 Mt	724,2 kt – 4,0%	987,4 kt – 5,5%	248 kt.an ⁻¹	25,9 kt.an ⁻¹ – 10,4%	35,3 kt.an ⁻¹ – 14,2%
Néodyme*	X / X	7,8-11,3 Mt	54,4 kt – 0,7%	75,0 kt – 1,0%	20 kt.an ⁻¹	1,9 kt.an ⁻¹ – 9,7%	2,7 kt.an ⁻¹ – 13,4%
Nickel	X / X	69 Mt	5,4 Mt – 7,8%	7,3 Mt – 10,6%	2,1 Mt.an ⁻¹	0,2 Mt.an ⁻¹ – 9,2%	0,3 Mt.an ⁻¹ – 12,4%
Niobium	- / X	4,3 Mt	10,4 kt – 0,2%	10,6 kt – 0,2%	58 kt.an ⁻¹	0,4 kt.an ⁻¹ – 0,6%	0,4 kt.an ⁻¹ – 0,6%
Platine**	- / X	13 kt	49,7 t – 0,4%	69,8 t – 0,5%	190 t.an ⁻¹	1,8 t.an ⁻¹ – 0,9%	2,5 t.an ⁻¹ – 1,3%
Plomb	X / -	90 Mt	3,4 Mt – 3,8%	4,6 Mt – 5,1%	12,7 Mt.an ⁻¹	0,1 Mt.an ⁻¹ – 1,0%	0,2 Mt.an ⁻¹ – 1,3%
Praséodyme*	X / X	137-375 Mt tous oxydes de REE	-	-	4,1 kt.an ⁻¹	0,6 kt.an ⁻¹ – 15,8%	0,9 kt.an ⁻¹ – 21,8%
Rhénium	X / -	2,5 kt	1072,0 t – 42,9%	1072,0 t – 42,9%	47 t.an ⁻¹	38,3 t.an ⁻¹ – 81,5%	38,3 t.an ⁻¹ – 81,5%
Sélénium	X / X	100 kt	1,1 kt – 1,1%	1,5 kt – 1,5%	3,6 kt.an ⁻¹	39,3 t.an ⁻¹ – 1,1%	53,6 t.an ⁻¹ – 1,5%
Silicium	X / -	Non chiffrées	-	-	3,8 Mt.an ⁻¹	1,9 Mt.an ⁻¹ – 49,2%	2,6 Mt.an ⁻¹ – 67,8%
Tantale	X / -	310-330 kt	1786,7 t – 0,6%	1786,7 t – 0,6%	2 kt.an ⁻¹	63,8 t.an ⁻¹ – 3,2%	63,8 t.an ⁻¹ – 3,2%
Tellure	X / X	36-46 kt	2,8 kt – 7,8%	3,8 kt – 10,6%	0,5 kt.an ⁻¹	0,1 kt.an ⁻¹ – 21,3%	0,2 kt.an ⁻¹ – 28,9%
Titane	X / X	487,8 Mt	766,1 kt – 0,2%	903,6 kt – 0,2%	180 kt.an ⁻¹ Ti métal	27,4 kt.an ⁻¹ – 15,2%	32,3 kt.an ⁻¹ – 17,9%

	HHI5 Chine / Russie	Réserves minières	Besoins à l'horizon 2050		Production minière annuelle	Demande moyenne annuelle pour les scénarios	
			S1	S2		S1	S2
Tungstène	X / X	3,2 Mt	7,6 kt – 0,2%	8,4 kt – 0,3%	89 kt.an ⁻¹	0,3 kt.an ⁻¹ – 0,3%	0,3 kt.an ⁻¹ – 0,3%
Vanadium	X / X	18,8 Mt	17,7 kt – 0,1%	17,8 kt – 0,1%	79 kt.an ⁻¹	0,6 kt.an ⁻¹ – 0,8%	0,6 kt.an ⁻¹ – 0,8%
Yttrium*	X / X	137-375 Mt tous oxydes de REE	-	-	143 kt.an ⁻¹ tous oxydes de REE	-	-
Zinc	X / -	250 Mt	170,8 kt – 0,1%	227,1 kt – 0,1%	13 Mt.an ⁻¹	6,1 kt.an ⁻¹ – 0,1%	8,1 kt.an ⁻¹ – 0,1%
Zirconium	X / X	74,4 Mt	195,2 kt – 0,3%	267,2 kt – 0,4%	7 kt.an ⁻¹ Zr métal	7,0 kt.an ⁻¹ – 99,6%	9,5 kt.an ⁻¹ – 136,3%

Tableau 15 : Quantification des risques de tensions de la production minière sur les ressources nécessaires à la mise en œuvre des scénarios de décarbonation du trafic aérien.

Pour rappel, ce tableau indique aussi les ressources pour lesquelles la Chine ou la Russie font partie des cinq principaux producteurs de la ressource, qu'il s'agisse de la production minière ou de la production métallurgique. Ces données ont déjà été analysées précédemment (cf. Section 4.1.2).

Pour plus de lisibilité, les ressources dont les besoins associés à la décarbonation du trafic aérien représentent plus de 1% en termes de réserves ou de production annuelle sont signalées en jaune, celles pour lesquelles ces besoins représentent plus de 10% le sont en orange, et celles pour lesquelles ces besoins représentent plus de 50% le sont en rouge. Ce code couleur n'a pas pour but de fixer des seuils qui auraient un sens particulier en termes de réserves minières ou de capacités annuelles de production. Par exemple, le rhénium apparaît en rouge concernant la demande annuelle associée aux scénarios qui représenterait 81,5% de la demande mondiale, or le rhénium est déjà utilisé à 80% pour la production des superalliages aéronautiques (cf. Tableau 43, Annexe I), avec un point de vigilance néanmoins ; son usage actuel est majoritairement militaire alors que les chiffrages établis dans cette étude ne concernent qu'un usage civil. Le fait que les besoins en rhénium pour la mise en œuvre des trajectoires représentent 42,9% des réserves minières pour cette ressource est proportionnellement plus critique car, sur la base d'une poursuite de la croissance du trafic aérien au même rythme que celui envisagé dans les scénarios au-delà de 2050, les réserves de rhénium pourraient être épuisées à l'horizon 2070 environ, voire plus tôt si on inclut les besoins militaires, ce qui ne représente pas un avenir si lointain.

Les chiffres doivent donc être analysés au cas par cas, en fonction de la part des besoins découlant des scénarios par rapport aux usages actuels de la ressource tous secteurs d'activité confondus. Le risque s'exprime donc plutôt en termes de déséquilibre flagrant de ce point de vue, ce qui impliquerait des conflits d'usage à venir avec d'autres secteurs d'activité. L'intérêt de ce code couleur est avant tout qu'il confirme le fait que la problématique de tension sur les ressources doit, au moins pour les décennies à venir, être abordée prioritairement sous l'angle des flux plutôt que sous celui des stocks (davantage de ressources sont concernées et en général avec une plus forte intensité).

A la lecture du Tableau 15, il ressort que, à l'échelle des besoins associés à la décarbonation du trafic aérien, les risques de tensions à venir sont finalement assez faibles. En effet, seuls le gallium, l'indium, le silicium métal et le zirconium métal affichent des perspectives de demandes annuelles qui impliqueraient un changement d'équilibre entre les différents secteurs d'activité qui utilisent ces ressources (5%, 5%, 59% et 100%, ce sont les poids cumulés actuels des consommations annuelles en Ga, In, Si métal et Zr métal pour les technologies qui concernent cette étude, cf. Tableau 43, Annexe I). Pour toutes les autres ressources suivies, les projections en termes de besoins de consommation ne semblent pas problématiques. Néanmoins, avec ces quatre ressources concernées seulement, on se rend compte qu'il existe un risque de tensions sur au moins une ressource pour la production des avions, ainsi que pour la production de l'ensemble des infrastructures de production d'électricité et d'hydrogène décarbonés (centrales nucléaires, éoliennes, panneaux photovoltaïques et électrolyseurs seraient impactés, cf. Tableau 12, Section 3.4.2). Cette conclusion apporte ainsi un élément de réponse partiel concernant l'opportunité de choisir un autre mix de capacité de production d'électricité décarbonée, question évoquée à la fin du Chapitre 2. Toutes les voies de production étant impactées, il n'en existe aucune qui pourrait permettre de s'affranchir d'un tel risque de tensions sur certaines ressources.

On gardera aussi à l'esprit que le choix a été fait de lisser la demande sur les 28 années restantes des scénarios de décarbonation. Une estimation basée sur les besoins de consommation sur la période 2036-2050, période des scénarios la plus consommatrice en ressources, aurait donc conduit à intensifier les risques de tensions, en désignant potentiellement d'autres ressources complémentaires comme particulièrement exposées à ce risque. On observera par ailleurs que l'on retrouve bien dans l'analyse proposée le fait que le scénario S2 à un impact matières plus important que celui de S1.

4.3.2. Mise en perspective avec les risques de tensions induits par la transition énergétique

Le problème de la survenue éventuelle de tensions d’approvisionnement se révèle en revanche beaucoup plus critique lorsque l’on considère le contexte plus général de la transition énergétique. En effet, pour rappel aucun scénario de transition énergétique n’a pris en compte les besoins du secteur aérien résultant d’un déploiement des électro-carburants et de l’hydrogène. Or, si on considère le scénario net-zéro de l’IEA qui prévoit qu’il faudrait installer 15 GW de nucléaire, 190 GW d’éolien et 475 GW de photovoltaïque par an jusqu’en 2070 pour espérer limiter le réchauffement climatique à 1,5°C d’ici la fin du siècle [3]. Si on se projette à l’horizon 2050, il faudrait donc installer 420 GW de nucléaire, 5320 GW d’éolien et 13300 GW de photovoltaïque. Sous réserve que l’on puisse négliger la part avions (ce qui est tout à fait raisonnable pour la majorité des ressources non spécifiques comme nous l’avons montré précédemment, cf. Section 3.4.2), les chiffrages qui sont proposés dans cette étude correspondent à une installation de 253 GW de nucléaire, 480 GW d’éolien et 1313 GW de photovoltaïque environ (valeurs moyennes sur les scénarios S1 et S2, cf. Tableau 3, Section 2.4.3). Ces chiffres, en plus d’être des besoins additionnels, représentent donc de l’ordre de 60% des besoins associés aux scénarios de transition énergétique pour le nucléaire, mais seulement 9% et 10% environ de ceux pour l’éolien et le photovoltaïque, respectivement.

La transition énergétique et l’électrification des mobilités (hors aérien) posent en effet un problème très important de tensions sur un certain nombre de ressources qui est bien documenté [16], [50], [75]–[77]. Même si le périmètre d’étude peut parfois changer (UE vs. monde, accent mis sur certaines sources de production d’énergie décarbonée, sur certaines ressources ou sur certaines mobilités), l’ensemble de ces études s’accorde pour dire que cette transition va entraîner des besoins en certains minerais et métaux bien supérieurs à ceux actuels. Dans le cas du lithium par exemple, il est prévu que la demande annuelle européenne soit multipliée par presque 20 à l’horizon 2030 et presque 60 à l’horizon 2050 (par rapport à la consommation 2018) [50]. Cette même étude estime ces facteurs à 4 et 14 dans le cas du graphite, 5 et 12 dans le cas du dysprosium, ou encore 2 et 4 dans le cas du néodyme. Des tendances similaires sont prédites à l’échelle mondiale [77]. Ces études montrent aussi que même les métaux de base sont concernés par cet accroissement très marqué de la demande. En croisant les prédictions de demande annuelle estimées par Gregoir et van Acker [76] avec les données de la production actuelle (cf. Tableau 15), la production d’aluminium devrait être multipliée par 3,8 à l’horizon 2050, celle du cuivre par 3,5 ou celle de nickel par 3,6. Dans le cas du cobalt, qui n’est pas perçu comme exposé à un risque de tension sur la ressource dans notre étude car non concerné par les technologies de stockage d’électricité retenues, ce facteur multiplicatif serait de 4,7. Ces chiffres soulèvent en plus la question de l’évolution des EOL-RIR dans le futur. Quand on voit de telles prévisions de croissance de la demande en l’espace de deux ou trois décennies à peine, et compte tenu des durées d’immobilisation des ressources dans les technologies, il n’est pas impossible que les EOL-RIR stagnent, voire même diminuent, si les taux de recyclage n’augmentent pas très fortement eux aussi en parallèle.

En se focalisant sur les enjeux de mobilité électrique, Michaux [75] fournit lui aussi des données très intéressantes concernant les besoins en ressources qui seraient nécessaires au déploiement de plus de 1,4 milliards de batteries Li-ions pour répondre aux besoins d’alimentation et de stockage de la flotte mondiale de véhicules à moteur thermique (hors avions toujours). Après avoir travaillé sur plusieurs scénarios, il propose ainsi des estimations qui montrent que les réserves minières connues de nickel et de cobalt ne couvriraient qu’à peine 10-20% des besoins associés à l’électrification d’une génération de véhicules (cf. Figure 13 ci-dessous). Le développement de la mobilité électrique et le besoin de grandes quantités de nickel et de cobalt pour les batteries pourraient donc, dans l’avenir, entraîner un vrai risque de conflits d’usage avec les aciers et les superalliages utilisés dans l’aéronautique.

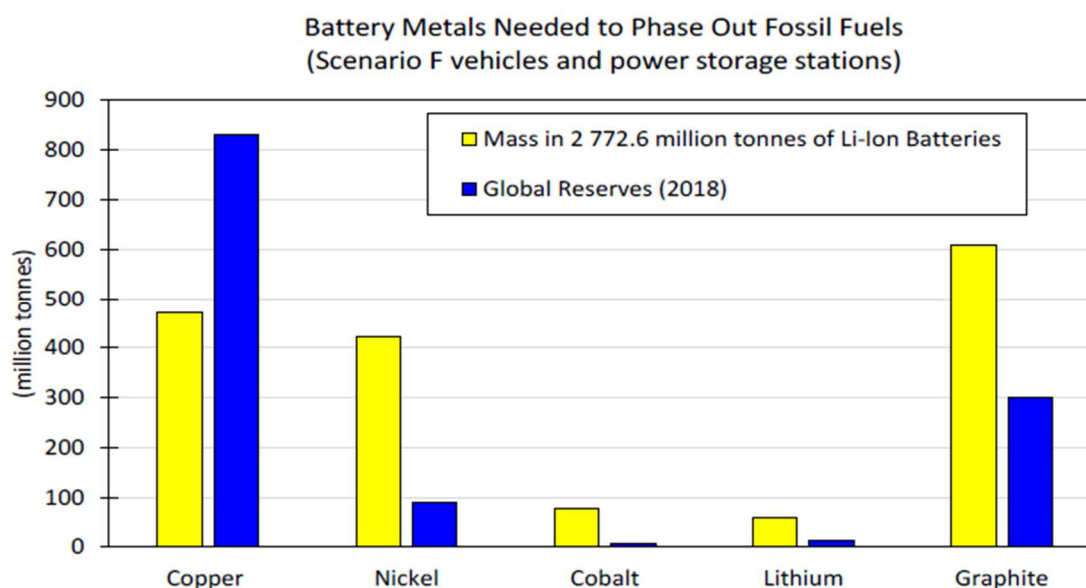


Figure 13 : Comparaison entre les réserves minières et les besoins nécessaires à l'électrification des mobilités (hors avions) pour cinq ressources indispensables aux technologies de batteries [75].

Le lithium et le graphite apparaissent aussi comme très critiques dans l'étude de Michaux [75] car leurs réserves minières ne couvriraient que 20% et 50% environ des besoins pour une génération de véhicules. Même dans le cas du cuivre, les réserves ne représenteraient qu'à peine 170% des besoins, donc à peine deux générations de véhicules. En incluant les infrastructures de production, d'acheminement et de stockage d'électricité qu'il faudrait déployer pour remplacer les carburants par des énergies décarbonées, il aboutit à des chiffres encore plus vertigineux (<https://www.counterpunch.org/2022/08/23/is-there-enough-metal-to-replace-oil/>). Dans ce cas, les réserves mondiales de cuivre ne représenteraient plus que 19,2% des besoins pour une génération de technologies. Les réserves de nickel ne couvriraient quant à elles que 10,1% des besoins, celles de cobalt 3,5%, celles de lithium 2,3%, et celles de graphite 3,6%. Même dans le cas du vanadium, métal rare non concerné par les technologies de batteries mais lié à la production des aciers pour le nucléaire, les réserves ne représenteraient que 3,5% des besoins, ce qui pourrait laisser craindre des tensions sur certains alliages d'aluminium ou de titane aéronautiques qui utilisent cet élément, tout en présentant des marchés beaucoup plus faibles que celui des aciers.

Compte tenu de ces chiffres, la faisabilité complète des scénarios de transition énergétique et le déploiement des énergies décarbonées peuvent être questionnés. Cependant, on gardera aussi à l'esprit que l'intérêt premier de telles estimations est de donner l'ordre de grandeur du problème à considérer. Dans la réalité, la transition énergétique ne se fera, ni d'un seul coup, ni de façon homogène ; toutes les technologies ne seront pas déployées simultanément à un instant t_0 . La durée de vie d'une batterie de voiture n'est par exemple que de quelques années, contre deux décennies environ pour l'éolienne qui fournira l'électricité. Chaque technologie, en fonction de son empreinte matières, de sa durée de vie, de sa recyclabilité, de son déploiement plus ou moins rapide et massif, aura donc un poids différent sur le besoin et dans le temps. Par ailleurs, comme nous allons le détailler dans ce qui suit, le prix de la ressource ainsi que l'amélioration des procédés de l'industrie minière ont aussi leur rôle à jouer car ils peuvent permettre de transformer des ressources minières en nouvelles réserves minières. Ils peuvent ainsi influencer sur la demande et la production des ressources, même s'ils ont aussi leurs limites.

4.4. Limites économiques et physiques de l'exploitation minière

4.4.1. Mécanismes d'évolution des marchés des ressources minérales

Suite à l'analyse proposée dans la section précédente, qui a tenté d'estimer les risques de tensions sur les productions des ressources minérales nécessaires pour la décarbonation du trafic aérien sous un angle quantitatif, la question qui peut être posée est la suivante : en raisonnant sur les ressources minières au lieu des réserves minières et en envisageant la mise en production de nouvelles mines, l'atteinte d'un net-zéro émissions de CO₂ du trafic aérien resterait-elle possible à l'horizon 2050, voire éventuellement un peu plus tard ?

La problématique qui est sous-jacente à cette question est celle d'une évolution des prix des matières premières qui permettraient de rendre rentable l'exploitation de nouveaux gisements miniers moins riches en minerais que ceux actuels. En effet, les gisements exploités en priorités sont ceux qui sont les plus facilement accessibles et dont les teneurs en minerais sont les plus élevées, pour des raisons évidentes de rentabilité économique de l'exploitation minière. Envisager la conversion de ressources minières en réserves minières signifiera donc que les réserves actuelles seront arrivées à épuisement, et que les prix des ressources auront suffisamment augmenté pour rendre rentable l'exploitation de gisements moins riches.

Dans l'Annexe G ont été introduites les notions de minerais majeurs (ou métaux majeurs pour la très grande majorité des ressources qui concernent cette étude), de minerais mineurs ou sous-produits de l'exploitation minière, et de métaux précieux. Du point de vue économique cette logique de produits et de sous-produits de l'extraction minière est absolument primordiale car, compte-tenu des volumes financiers en jeu, c'est la demande en minerai majeur qui va justifier l'activité minière. C'est donc cette demande seule qui va présenter une certaine élasticité en termes d'adaptation des productions et des prix à la demande. *A contrario*, pour les sous-produits, la production va être entièrement pilotée par la demande pour le produit de base et la teneur en sous-produits des gisements, indépendamment de la demande propre pour les sous-produits. Cela peut entraîner des fluctuations beaucoup plus fortes sur les prix des métaux mineurs que sur ceux des métaux majeurs, ainsi que des tensions en termes d'approvisionnement, en fonction des écarts existants entre la production et la demande pour ces sous-produits. Le risque de tension devient particulièrement critique lorsque la demande pour le sous-produit évolue beaucoup plus vite que la demande pour le minerai majeur, ce qui peut aboutir à une saturation des capacités de production du sous-produit. Parmi les ressources concernées par notre étude, on note par exemple que la demande en indium croît beaucoup plus vite que celles en zinc ou en étain, de même pour le gallium par rapport à l'aluminium, l'iridium par rapport aux autres platinoïdes, ou le tellure par rapport au plomb, au zinc et au cuivre dont il est un sous-produit. Il existe cependant une marge concernant le raffinage des sous-produits. En effet, le raffinage des minerais en vue de leur transformation en métaux est actuellement optimisé pour les minerais de base, toujours selon le principe que ce sont eux qui justifient l'activité minière. Dans son ouvrage, Fizaine [60] mentionne ainsi les gains de productivité qui pourraient être faits dans le raffinage des sous-produits de l'extraction minière, pouvant aller jusqu'à des augmentations de la production d'un facteur trois à cinq parfois selon les minerais. Ce levier permettrait ainsi de retarder une éventuelle saturation des productions de certains minerais ou métaux mineurs.

Un second levier possible pour diminuer la volatilité du marché d'un sous-produit minier et le risque de saturation de sa production est son passage de sous-produit à co-produit. En effet, dans de très rares cas, des minerais secondaires peuvent justifier une exploitation minière au moins partielle pour eux-mêmes, et non plus en tant que sous-produits, au même titre que les terres rares, le lithium, les platinoïdes et les métaux précieux. Parmi les

ressources qui nous concernent et sur lesquelles pèse un risque de tensions futures, le cobalt et le molybdène ont ainsi acquis le statut de co-produits depuis 2010 en étant cotées à la *London Metal Exchange* (<https://www.lme.com/>). L'intérêt d'une telle cotation boursière est qu'elle permet de redonner de l'élasticité et de stabiliser le marché de la ressource en passant sur un marché à terme, donc permettant une plus grande visibilité sur l'évolution des prix tant pour les producteurs que pour les acheteurs, ainsi qu'une meilleure transparence sur l'établissement de ces prix. L'opacité et la non-organisation des marchés des sous-produits miniers contribuent en effet à leur forte volatilité. Même si les marchés du cobalt et du molybdène restent environ dix fois plus faibles que ceux de l'aluminium ou du cuivre en termes de volumes financiers (8-10 milliards de dollars US annuels contre 120-140 milliards de dollars US), en termes de tonnages leurs marchés ont crû respectivement d'un facteur 600 et d'un facteur 25000 en à peine un siècle (contre des facteurs 35 et 20 pour le cuivre et le fer respectivement) [60].

Si on s'intéresse plus particulièrement aux prix des ressources concernées par cette étude, et particulièrement ceux des métaux cotés (cf. Tableau 43, Annexe I), on constate que les prix sont certes élevés mais qu'ils restent dans la fourchette haute classique des variations habituellement observées depuis deux décennies (cf. sites du LME <https://www.lme.com/> et du BRGM <https://www.mineralinfo.fr/fr/securite-des-approvisionnements-pour-leconomie/substances-critiques-strategiques#les-analyses-par-substance>), même dans le contexte actuel de tensions internationales avec la guerre en Ukraine et les sanctions économiques à l'égard de la Russie. Un constat similaire est réalisé par le GIFAS (Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales) concernant le nickel, l'aluminium, le fer et le cobalt. Des envolées bien plus spectaculaires des prix des matières premières ont ainsi été observées pour nombre de ressources lors de la crise dite des *subprimes* de 2007-2008 (cf. Figure 14).



Figure 14 : Evolutions du prix du nickel depuis 20 ans (<https://www.mineralinfo.fr>). Pour comparaison, actuellement la tonne de nickel se vend autour de 23600 US\$ (<https://www.lme.com/>).

Même s'il est difficile d'anticiper l'évolution des cours des matières premières, il est probable qu'une évolution tendancielle des prix à la hausse va se poursuivre sur le long terme, mais pas forcément dans des proportions considérables à l'exception d'évènements spéculatifs ponctuels. En effet, le marché des ressources minérales possède ses propres mécanismes de freinage dans la mesure où, d'un côté les producteurs n'ont aucun intérêt à surproduire au risque de faire s'effondrer les prix (on parle d'épuisement économique dans le cas des minerais majeurs) et, de l'autre côté, des prix trop élevés ont pour effet de ralentir la demande. Le risque d'une augmentation significative des prix concernerait donc davantage les minerais mineurs, dont les prix sont bien plus élevés que ceux des minerais majeurs mais qui sont utilisés en bien plus faibles quantités dans les technologies.

En revanche, ce qui semble plus problématique concernant d'éventuelles tensions à venir est que le facteur prix ne semble pas pouvoir permettre à lui seul de diminuer grandement les tensions qui pourraient peser sur certaines ressources. En effet, contrairement au cobalt ou au molybdène, peu de métaux mineurs semblent avoir vocation à devenir des co-produits. Ces métaux, pour la plupart, ne seront *a priori* jamais exploités pour eux-mêmes, sauf à envisager de multiplier leurs prix d'un facteur 10 à 1000 [60], ce qui changerait totalement le coût des technologies. Les métaux rares sont souvent exploités à des teneurs de quelques grammes à quelques centaines de grammes au mieux par tonne de minerai, contre quelques kilogrammes à quelques centaines de kilogrammes pour les métaux de base. Les marchés de nombreux minerais rares resteront donc fortement inélastiques et sujets à des tensions car la production sera pilotée par celle du minerai de base dont ils sont un sous-produit et non par la demande les concernant. En outre, les prix des minerais primaires ne semblent pas vouloir augmenter suffisamment à court terme pour justifier la mise en exploitation de nouveaux gisements moins riches que ceux exploités actuellement. Cette mise en exploitation pouvant prendre de l'ordre de 10 à 15 ans [19], [78], [79], à l'horizon 2050 des scénarios de décarbonation du trafic aérien, il semble donc raisonnable de nous placer dans le cadre des réserves minières et des capacités de production actuelles connues.

Par ailleurs, le positionnement hégémonique de la Chine, et de la Russie dans une moindre mesure, concernant la production minière et métallurgique de nombre de minerais et métaux rares ne va pas dans le sens de favoriser l'émergence de marchés à terme pour ces ressources. En effet, ces pays en tant qu'utilisateurs eux aussi de ces ressources ont tout intérêt, pour conforter leur monopole, à conserver une certaine opacité sur ces marchés et sur leurs productions, ce qui leur permet d'appliquer des quotas à l'export notamment vis-à-vis de pays concurrents.

De même, la substitution des métaux rares entre eux ne semble pas plus une solution viable à grande échelle du point de vue économique qu'elle ne l'est du point de vue technologique (*cf.* Section 4.2.1). Y avoir recours aurait ainsi pour principal effet de déplacer le problème de saturation de la production d'un minerai rare vers un autre minerai rare, voire de saturer successivement les productions de plusieurs métaux rares. En outre, tous les métaux rares sont concernés par une demande croissante de leur production. Les seules vraies marges pour contrôler davantage l'évolution des prix des métaux rares sont donc l'optimisation des processus de raffinage des sous-produits miniers, mais qui ne pourra à elle seule répondre aux prévisions de croissance de la demande pour certaines ressources (des augmentations d'un facteur 10, 15 voire 60 étant envisagées pour certaines ressources [50]), ainsi que l'amélioration du taux de recyclage de ces métaux (*cf.* Section 4.2.2).

4.4.2. Vers un épuisement qualitatif des ressources minières ?

Pour reprendre le terme de Fizaine [60], une autre notion concernant les limites physiques de l'exploitation minière commence à émerger, il s'agit de la notion d'épuisement qualitatif des ressources. En effet, il apparaît comme évident que l'on n'atteindra jamais un épuisement complet d'une ou de plusieurs ressources minérales d'un point de vue quantitatif au sens strict. Moyennant des coûts de production plus élevés, il sera toujours possible d'exploiter des gisements moins riches en minerais. C'est effectivement le biais quand on raisonne de façon purement quantitative, les notions de réserves et de ressources minières étant par essence des notions évolutives, et les notions de flux de production autorisant une certaine souplesse si on admet qu'un besoin en une ressource peut être satisfait moins vite que prévu (au travers d'une mise en œuvre moins massive ou moins rapide des scénarios de décarbonation du trafic aérien par exemple).

Cette notion d'épuisement quantitatif permet de prendre en compte la richesse des gisements exploités dans l'analyse. On pourra se référer aux interviews de Stéphan (<https://www.youtube.com/watch?v=i8RMX8ODWQs> et <https://www.youtube.com/watch?v=xx3PsG2mr-Y>), et aux travaux de l'association SystExt (<https://www.systext.org/>) de manière plus générale, ou à l'ouvrage de Bihouix et de Guillebon [48], qui évoquent très bien cette problématique de l'appauvrissement progressif des gisements miniers qui seront amenés à être exploités. A titre d'exemple, la production mondiale actuelle des métaux, de l'extraction au raffinage, représente de l'ordre de 10% de la consommation d'énergies primaires totale, et cette part pourrait être amenée à croître assez rapidement, conséquence d'un effet croisé de l'accroissement de la demande et de plus faibles teneurs en minerais des gisements exploités [48]. La consommation d'énergie primaire pour l'extraction minière a ainsi augmenté deux fois plus vite que la consommation d'énergie primaire pour le raffinage des métaux entre 1973 et 2011 [60]. Ces travaux permettent aussi de bien appréhender la relation qui existe entre exploitation minière et énergie, sans énergie pas de ressources minérales et sans ressources minérales pas d'énergie. La transition énergétique avec les besoins en ressources minérales considérables qui vont en découler fait donc courir le risque de l'apparition d'une boucle rétroactive à effet négatif à plus ou moins longue échéance (cf. Figure 15). Pour schématiser le fonctionnement de cette boucle, plus il va falloir d'énergie pour extraire les ressources minérales nécessaires à la production d'énergie future, plus le coût de cette énergie va augmenter, entraînant en retour une nouvelle augmentation des coûts d'extraction et ainsi de suite. Une telle boucle serait-elle déjà plus en moins en train de se mettre place avec la tendance à la hausse des prix des matières premières observée depuis le début des années 2000 ? La question peut se poser.

Dans tous les cas, la mise en place d'un tel cercle vicieux serait particulièrement dommageable dans l'optique de la transition énergétique. Il augmenterait les montants des investissements nécessaires au déploiement des technologies sachant que, pour l'instant, les investissements prévus par les états sont *a priori* déjà insuffisants pour permettre la réalisation de scénarios de transition énergétique permettant d'aboutir à des mix électrique et énergétique très fortement décarbonés dans les décennies à venir (cf. Section 2.3 et [13], [14]). Le seul mécanisme qui pourrait enrayer ce cercle vicieux semble être une chute brutale de la production, qui pourrait découler d'une trop forte augmentation des prix. Mais du point de vue du déploiement des technologies de décarbonation du trafic aérien notamment, cela poserait tout autant la question de la disponibilité des ressources nécessaires que l'augmentation des coûts.

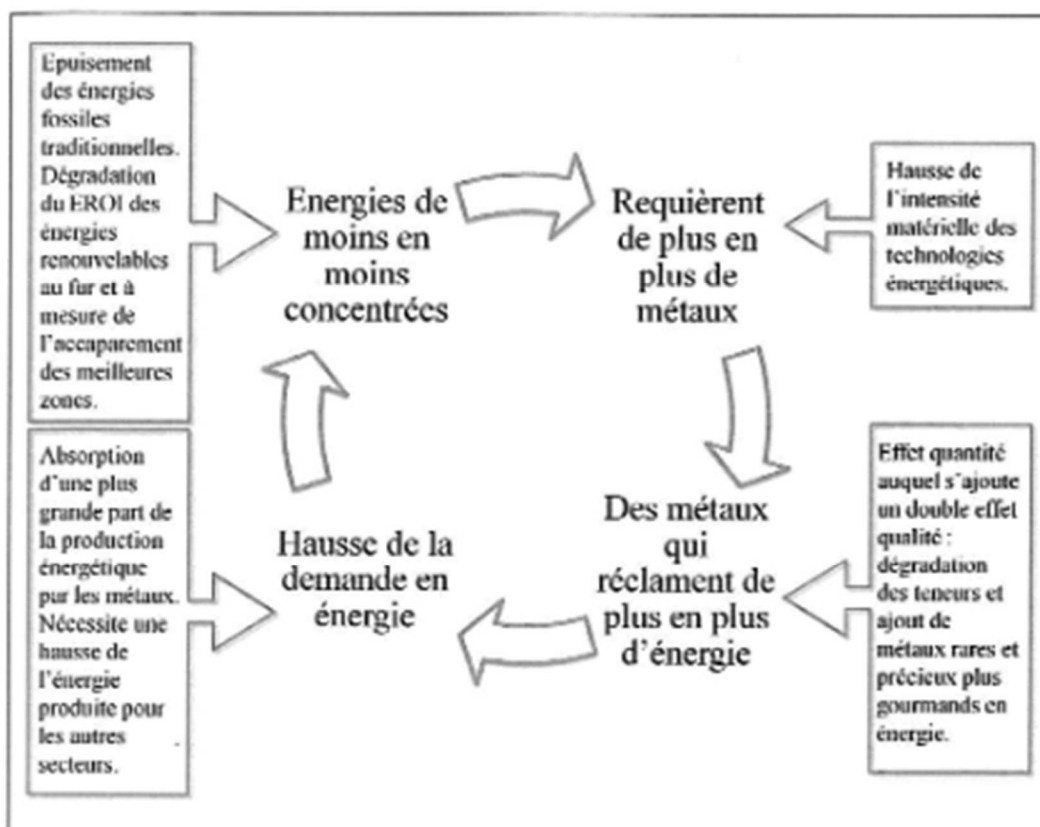


Figure 15 : Cycle traduisant le risque d'épuisement qualitatif de l'exploitation des ressources minières [60].

Même si cette question n'est pas au cœur de cette étude, il est aussi évident que l'épuisement qualitatif des ressources minières va soulever de très nombreuses questions en termes d'impacts environnementaux et sociaux de l'exploitation minière car, pour obtenir les mêmes quantités de ressources finales, il faudra extraire toujours plus de roches [80]. Le broyage et le traitement des minerais génèreront eux-aussi toujours plus de stériles miniers pollués et polluants, mettant en danger les écosystèmes et les populations locales [58], [63].

Même analysé sous l'angle économique, il existe donc un risque non négligeable que, dans le cadre de la transition énergétique et des besoins considérables en ressources minérales qui y sont associés, ces besoins ne puissent être entièrement satisfaits en raison de capacités de production trop faibles pour répondre à la demande [60]. La survenue d'un tel risque entraînerait *de facto* un retard dans le déploiement des technologies nécessaires pour mener à bien cette transition, ainsi que l'ensemble des transitions qui en découlent.

4.5. Forte croissance de la demande et tensions à venir sur les ressources

On retiendra de ce chapitre que l'analyse multicritère des enjeux de criticité des ressources nécessaires pour la décarbonation du trafic aérien laisse à penser qu'il existe un risque significatif de tensions sur certaines d'entre elles. Le Tableau 16 ci-dessous résume les ressources qui sont exposées à ce risque selon les critères retenus.

Le problème majeur est celui d'un risque accru de décrochage progressif des capacités de production par rapport à une demande dont les prédictions de croissance sont de plus en plus grandes, tout particulièrement pour les ressources spécifiques indispensables aux infrastructures de production d'électricité décarbonée. Dans ce contexte, les minerais ou métaux dits rares pourraient être particulièrement affectés en raison d'une moins grande élasticité et d'une plus grande opacité de leurs marchés. En tant que sous-produits miniers, leurs productions sont pilotées

par les demandes en minerais de base dont ils sont issus et non par leur demande propre. Même si une augmentation progressive des prix est attendue pour l'ensemble des ressources étudiées, dans la poursuite de la tendance observée depuis le début des années 2000, cette augmentation devrait être plus importante et chaotique dans le cas des minerais rares. Tous ces mécanismes pourraient aussi être amplifiés par le fait que, plus on exploite la ressource, plus les minerais exploités sont de faibles teneurs. Leurs coûts d'exploitation énergétiques et économiques sont ainsi de plus en plus élevés. Cela nécessite donc toujours plus de ressources en amont et une ressource toujours plus chère, avec un risque de mise en place d'une boucle rétroactive qui alimenterait les mécanismes créateurs de tensions.

Ressources dont la production minière ou métallique est particulièrement concentrée (HHI5 > 6400)	Terres rares (Dy, La, Nd, Pr, Y), Mg, Nb, W
Ressources ayant la Chine ou la Russie dans leur HHI5 (minerai ou métal)	Toutes, sauf Hf et In
Ressources dont le marché est peu élastique en raison de leur caractère de sous-produits miniers	Cd, Cr, Ga, Hf, In, Mg, Nb, Re, Se, Ta, Te, W, V, Zr
Ressources exposées à un risque de tensions d'approvisionnement, sur les flux ou les stocks, induit par la mise en œuvre des scénarios de décarbonation du trafic aérien	Ga, In, Re, Si métal, Zr métal
Ressources exposées à un risque de tensions d'approvisionnement, sur les flux ou les stocks, induit par les scénarios de la transition énergétique	Terres rares (Dy, La, Nd, Pr, Y), Cu, Co, graphite, Li, Ni, V
Ressources particulièrement peu substituables dans les technologies concernées par cette étude (à moins de les remplacer par un élément de cette même liste)	Terres rares (Dy, La, Nd, Pr, Y), Cd, Cr, Co, Cu, Ga (dans les applications aéronautiques), Hf (dans le nucléaire), Li, Mg, Mn, Mo, Ni, Nb, Re, Si métal, Ta, Ti, W, V, Zr métal
Ressources dont le EOL-RIR est inférieur à 10%	Terres rares (Dy, La, Nd, Pr, Y), Ga, graphite, Hf, In, Li, Nb, Se, Si métal, Ta, Te, V, Zr métal

Tableau 16 : Listes des principales ressources nécessaires à la décarbonation du trafic aérien qui sont exposées à un risque de tension selon les critères retenus.

En outre, le contexte géopolitique ne laisse pas entrevoir de réelles perspectives de diminution des tensions internationales entre les pays occidentaux, USA en tête, la Chine et la Russie, ces trois pays ayant des positions dominantes dans les productions mondiales de métaux qui sont amenées à perdurer. Dans un contexte de besoins toujours croissants, fortement induits par les besoins de la transition énergétique, les enjeux de souveraineté des états en la matière risquent même d'exacerber ces tensions. On notera au passage que l'UE pourrait être la grande perdante dans la mesure où elle dépend très majoritairement de ressources extérieures à ses frontières et subit donc fortement la situation.

Concernant d'éventuels manques de certaines ressources à prévoir, il est impossible d'être affirmatif quant à un épuisement quantitatif plus ou moins lointain des réserves de minerais. En revanche, concernant les flux, les besoins de production annuelle de certaines ressources pour les scénarios de décarbonation du trafic aérien, et leur mise en perspective vis-à-vis des prévisions de demande mondiale à venir peuvent inquiéter. Dans tous les cas, ce ne sont pas les besoins induits par le renouvellement des flottes d'appareils qui vont être la cause du problème, mais les besoins en termes d'infrastructures de production d'électricité décarbonée, ce d'autant plus que l'on considère les besoins globaux de la transition énergétique. Des conflits d'usage pourraient ainsi apparaître, voire une marginalisation du besoin aéronautique par rapport à celui d'autres secteurs, de l'énergie notamment, qui

pourraient amener le secteur aéronautique à subir des situations de tension et d'augmentation significative des prix sur certaines ressources, et pas seulement des métaux rares. Avec le développement de la mobilité électrique et des besoins de stockage de l'électricité, le nickel, le cobalt et le lithium sont ainsi en première ligne des ressources pour lesquelles il pourrait y avoir de très fortes tensions dans les décennies à venir. Avec le besoin croissant d'infrastructures de production et de transport d'électricité décarbonée, le silicium et le zirconium métalliques, le cuivre, le vanadium, le gallium, l'indium et les terres rares sont aussi particulièrement exposés. Même si elles semblent moins concernées par des risques d'épuisement de la ressource ou de saturation de la production, on remarquera que le magnésium, le niobium et le tungstène sont aussi soumis à des risques de tensions en raison de production très concentrées et de leurs très faibles substituabilité et EOL-RIR (cf. Tableau 16).

Du point de vue des avions, cela signifie donc que les alliages de titane (utilisant du vanadium et du zirconium) et les superalliages (à base nickel ou cobalt, mais utilisant aussi du niobium, du tungstène et zirconium en éléments d'alliage) pourraient être exposés à des tensions accrues sur les ressources minérales. Le rhénium est aussi à surveiller en fonction de l'évolution des besoins cumulés civils et militaires de cette ressource. Dans la mesure où il est utilisé quasi-exclusivement dans les superalliages aéronautiques, son marché restera très restreint et très peu élastique (le rhénium est un sous-produit du molybdène qui reste un métal mineur même s'il a atteint le statut de co-produit). Les alliages d'aluminium et les aciers aéronautiques utilisent aussi certains de ces éléments comme éléments d'alliage, mais leur remplacement massif par les composites à fibres et à matrice polymère laisse espérer une moindre criticité.

Du point de vue plus global des scénarios de décarbonation du trafic aérien, ces perspectives de tensions sur les ressources soulèvent en revanche des interrogations quant à leur possible mise en œuvre. En effet, les ressources listées précédemment montrent qu'aucune des voies de production d'électricité décarbonée envisagées dans ces scénarios n'est épargnée par un risque de tension sur une ou plusieurs de ses ressources spécifiques. Se pose donc la question d'un éventuel manque d'électricité décarbonée dans des quantités suffisantes à l'échelle des scénarios.

On notera aussi que, malheureusement, les leviers qui pourraient diminuer les tensions sur les ressources semblent assez peu opérants, tout du moins dans le cadre spécifique de la mise en œuvre des trajectoires de décarbonation. En effet, les technologies utilisées sont des technologies souvent complexes et optimisées ; il est donc très difficile de substituer une ressource par une autre sans risquer une perte de performances qui induirait une diminution des rendements du système. De même, dans un contexte d'augmentation très forte de la demande annuelle en ressources, l'effet temporel induit par l'immobilisation de ces ressources dans les technologies fait que, malgré des efforts pour augmenter les taux de recyclage, pour beaucoup des ressources étudiées la part de la ressource secondaire restera faible voire très faible comparée au besoin en ressource primaire pour répondre à la demande. Les usages considérés ici, sous forme de matériaux ou de technologies complexes ne facilitent pas non plus la recyclabilité des ressources considérées.

5. Retard de pénétration des technologies et impacts sur les trajectoires de décarbonation

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer l'impact qu'auraient, sur la mise en œuvre des scénarios S1 et S2 de décarbonation du trafic aérien, de possibles tensions à venir sur certaines des ressources qui leur sont nécessaires. Nous nous projetons donc dans un déploiement incomplet des scénarios induit par une décarbonation trop lente du mix électrique mondial, dans le but d'évaluer les émissions résiduelles de CO₂ qui pourraient en résulter. Nous nous interrogeons aussi sur les leviers qui permettraient de rendre ces scénarios moins consommateurs de ressources minérales, et donc moins dépendants de ces dernières.

5.1. Empreinte carbone du mix électrique mondial : le point faible des scénarios

Comme évoqué dans le Chapitre 2, en faisant le choix de s'appuyer sur des technologies de décarbonation fortement consommatrices d'électricité, le CORAC a adossé ses scénarios de décarbonation à ceux de la transition énergétique. Hormis pour quelques ressources spécifiques aux technologies aéronautiques, c'est donc le développement de nouvelles capacités de production d'électricité décarbonée, ainsi que d'hydrogène décarboné, qui vont gouverner les besoins en ressources minérales des trajectoires de décarbonation de l'aérien.

A l'heure actuelle, en prenant 2019 comme référence [11], le mix électrique mondial est le suivant : 37% charbon, 3% pétrole, 23% gaz naturel, 10% nucléaire, 27% EnR (avec le mix de puissances installées : 28% charbon, 6% pétrole, 24% gaz naturel, 6% nucléaire, 36% EnR). Ce mix est donc carboné à 63%. En supposant les ordres de grandeurs suivants des empreintes carbonées des différentes sources de production d'électricité, 1040 gCO₂eq/kWh pour le charbon, 700 gCO₂eq/kWh pour le pétrole, 410 gCO₂eq/kWh pour le gaz naturel, 10 gCO₂eq/kWh pour le nucléaire, 10 gCO₂eq/kWh pour les EnR (https://fr.wikipedia.org/wiki/Empreinte_carbone_de_l%27%C3%A9lectricit%C3%A9, [22]), le mix électrique actuel émet donc 504 gCO₂eq/kWh. Si on considère les scénarios proposés par l'IEA à l'horizon 2040 [3], [11], qu'il s'agisse du scénario soutenable basé sur un mix électrique carboné à 27% (5% charbon, 0% pétrole, 12% gaz naturel, 11% nucléaire, 72% EnR), ou qu'il s'agisse du scénario « politiques proposées par les états » carboné à 44% (22% charbon, 1% pétrole, 21% gaz naturel, 9% nucléaire, 47% EnR), leurs empreintes carbone seront respectivement de 110 gCO₂eq/kWh et 328 gCO₂eq/kWh.

Par comparaison, la combustion du kérosène émet 260-310 gCO₂eq/kWh en fonction de si on considère uniquement l'empreinte de sa combustion ou aussi celle de sa production (<https://fr.wikipedia.org/wiki/Kérosène>). Dans la mesure où il faut environ 2 MJ d'électricité pour produire 1 MJ d'électro-carburant ou d'hydrogène liquéfié (cf. Figure 4, Chapitre 2), on voit que l'introduction des technologies électro-carburants et H₂ à l'horizon 2040 risque d'entraîner un accroissement indirect des émissions de CO₂ du trafic aérien au lieu de les réduire en raison d'un mix électrique bien trop carboné. Même le scénario soutenable de l'IEA n'entraînerait finalement qu'une diminution limitée des émissions de CO₂ du trafic aérien, les électro-carburants et l'hydrogène nécessitant un mix électrique émettant au maximum 130-150 gCO₂eq/kWh pour que leur introduction soit neutre en termes d'émissions (cet ordre de grandeur est similaire à celui évoqué dans [22]). En outre, des travaux concernant la viabilité économique des carburants alternatifs par rapport au kérosène ont montré que les carburants alternatifs resteront significativement plus chers que le kérosène [22]–[24], [28]. En dehors de toute obligation réglementaire, ou sans l'introduction d'un coût carbone des carburants aéronautiques qui agirait comme une incitation, il faudra

donc un gain significatif en termes de réduction des émissions de CO₂ pour que les compagnies aériennes acceptent de remplacer le kérosène par ces carburants compte tenu du surcoût opérationnel que cela engendrerait pour elles.

L'analyse des scénarios de décarbonation du mix électrique mondial montre par conséquent que, en l'état, les conditions ne semblent pas réunies pour que l'on tende vers un mix électrique qui permettrait d'introduire les électro-carburants et l'hydrogène comme carburants aéronautiques. A l'heure actuelle, il s'agit clairement d'un problème de sous-investissement des états pour financer le déploiement des EnR, et du nucléaire dans une moindre mesure (cf. Section 2.3 et Section 2.4.2).

La question qui se pose est : sous réserve que les états investissent massivement pour combler le retard observé en termes d'évolution vers un mix électrique très fortement décarboné, les tensions observées sur certaines ressources indispensables aux technologies de production d'électricité décarbonée ne vont-elles pas entraîner de toute façon des retards dans la décarbonation du mix électrique mondiale ?

En regard des travaux réalisés dans cette étude, il semble en effet que pour certaines ressources les projections concernant la demande vont être davantage problématiques vis-à-vis des capacités de production que vis-à-vis des réserves minières, surtout si on se place dans le contexte d'une électrification directe ou indirecte très massive des usages. Il semble donc probable que le mix électrique mondial ne va pas pouvoir être décarboné aussi vite et autant que souhaité pour la mise en œuvre des trajectoires de décarbonation du trafic aérien. On rappellera par ailleurs que, malheureusement, aucune technologie de production d'électricité décarbonée n'est épargnée dans la mesure où le nucléaire, comme l'éolien et le photovoltaïque affichent une ou plusieurs de leurs ressources spécifiques qui sont exposées à un risque d'approvisionnement (cf. Chapitre 4).

A l'horizon 2050, voire à plus longue échéance en fonction du retard pris pour décarboner le mix électrique mondial, la mise en œuvre complète des scénarios de décarbonation apparaît donc comme hypothétique. La décarbonation du trafic aérien pourrait ainsi ne reposer que sur l'amélioration de l'efficacité énergétique des aéronefs, l'optimisation des manœuvres aéroportuaires et l'introduction des bio-carburants. Sous cette hypothèse et en tenant compte :

- Des gains escomptés pour chacune des contributions à la réduction des émissions de CO₂ de l'aérien (efficacité énergétique des avions, optimisation des opérations aéroportuaires, technologie H₂ et Carburants d'Aviation Durables, CAD, cf. Figure 2, Section 2.1.2) ;
- Des proportions entre bio- et électro-carburants pour les CAD (cf. Tableau 2, Section 2.1.2) ;
- Des taux de réduction des émissions de CO₂ espérés pour les CAD par rapport au kérosène à l'horizon 2050 (80% pour les bio-carburants et 95% pour les électro-carburants [1]),

il est possible d'estimer les émissions résiduelles du trafic aérien qui résulteraient de l'absence de déploiement des électro-carburants et de l'hydrogène. Les estimations ainsi obtenues sont fournies dans le Tableau 17. Elles montrent que pour le scénario S1 on observerait une stagnation par rapport aux émissions actuelles, alors que pour S2 les émissions du trafic aérien augmenteraient de 23,6%. En outre, si les électro-carburants et l'hydrogène devaient être introduits malgré un mix électrique mondial à 328 gCO₂eq/kWh (scénario « politiques proposées par les états » selon l'IEA), les émissions indirectes de CO₂ associées à l'usage de ces carburants seraient environ 2,2 fois supérieures à celles directes dues à l'utilisation du kérosène. Dans le cas du scénario S1, cela annihilerait presque entièrement les bénéfices des gains de sobriété énergétique des appareils futurs, d'optimisation des manœuvres aéroportuaires et d'introduction des bio-carburants (cf. Tableau 17). Et, dans le cas du scénario S2, les émissions

annuelles de CO₂ à terme dépasseraient celles du scénario de référence « Technologie 2018 » du CORAC dans lequel aucune action n'est envisagée à l'exception du renouvellement et de l'accroissement de la flotte sur la base des technologies d'aéronefs de 2018 (cf. Section 2.1.2).

	Mise en œuvre complète des scénarios (cf. Tableau 2)		Mix électrique mondial : scénario soutenable de l'IEA		Mix électrique mondial : engagement des états	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2
Emissions résiduelles à l'horizon 2050 (MT.an ⁻¹)	190	135	830	940	1120 <i>(2170)</i>	1360 <i>(2900)</i>
Evolution par rapport aux émissions actuelles (1100 MT.an ⁻¹)	-82,7%	-87,7%	-24,5%	-14,5%	+1,8% <i>(+97,3%)</i>	+23,6% <i>(+163,6%)</i>

Tableau 17 : Estimation des émissions résiduelles du trafic aérien à l'horizon 2050 en fonction de la mise en œuvre plus ou moins totale des scénarios S1 et S2. Les valeurs en italique illustrent l'effet de la substitution du kérosène par les *e-fuels* et l'H₂ dans un mix électrique mondial insuffisamment décarboné.

Même en prenant pour hypothèses l'atteinte d'un mix électrique à 100 gCO₂eq/kWh (plus ou moins le scénario soutenable de l'IEA) et un effet neutre de l'introduction des *e-fuels* et de l'H₂ à partir d'un mix électrique inférieur à 150 gCO₂eq/kWh (hypothèses légèrement optimistes donc), les gains sur les émissions de CO₂ du trafic aérien seraient trois fois moindres que ceux escomptés pour les contributions des technologies H₂ et de la part *e-fuels* des CAD. Dans le cas du scénario S1 cela permettrait de réduire de 290 Mt.an⁻¹ supplémentaires les émissions annuelles du trafic à l'horizon 2050, par rapport au même scénario dans lequel seuls les bio-carburants auraient pu être introduits, soit un gain par rapport aux émissions actuelles de 24,5%. Dans le cas du scénario S2, cette réduction imputable à l'introduction des électro-carburants et de l'hydrogène serait de 420 Mt.an⁻¹, soit un gain par rapport aux émissions actuelles de 14,5% seulement (cf. Tableau 17). A moins d'avoir une croissance du trafic aérien quasi-nulle, ou *a minima* une croissance beaucoup plus faible que les 3% annuels envisagés par le CORAC, on resterait donc loin de l'objectif net-zéro émissions ambitionné à l'horizon 2050 lors de la construction des scénarios, sauf à disposer d'une plus grande quantité de biomasse en vue d'une introduction beaucoup plus massive des bio-carburants.

On observera que ces analyses sont indépendantes de la disponibilité effective des technologies *e-fuels* et H₂ pour les futurs aéronefs, l'enjeu n'étant pas l'avion ni la maturité des technologies qui y sont associées mais la disponibilité de carburants alternatifs suffisamment décarbonés. Cette problématique est encore plus aigüe pour le transport aérien que pour les autres mobilités pour lesquelles il est envisagé d'utiliser directement l'électricité comme énergie finale [75]. Dans le cas de l'avion, tout du moins dans le cadre de cette étude, l'électricité n'est qu'une énergie secondaire ou intermédiaire, d'où un besoin accru à cause d'un rendement global de la chaîne énergétique plus faible en raison d'étapes de transformation supplémentaires [22]–[24] et d'un rendement des turbomachines lui-même environ deux fois moindre que celui d'un moteur électrique [81].

5.2. Leviers pour des scénarios plus sobres en ressources minérales

Pour faire face au risque évoqué précédemment concernant l'éventualité d'une mise en œuvre incomplète des scénarios de décarbonation du trafic aérien, se pose la question des leviers qui permettraient de rendre ces scénarios plus sobres en termes de consommation de ressources minérales et donc davantage réalisables.

Le premier levier est évident et a déjà été évoqué précédemment, c'est celui de la croissance du trafic aérien. Une croissance plus faible qu'escomptée nécessitera une moindre croissance de la flotte mondiale ainsi qu'une moindre consommation de carburants et donc d'électricité décarbonée pour les produire. Le second levier envisagé est celui de la durée de vie des aéronefs. Il impacte bien sûr les besoins de renouvellement de la flotte d'appareils mais aussi la vitesse de pénétration des avions de nouvelle génération plus sobres en termes de consommation de carburants.

Pour évaluer l'effet de ces deux leviers, différents scénarios ont été testés grâce à la contribution de X. Vancassel :

- Scénarios S1 et S2 mais avec une durée de vie des appareils de 30 ans au lieu de 20 ans ;
- Scénarios S1 et S2 mais avec des prévisions de croissance annuelle du trafic deux fois moindre (1,6% au lieu de 3,1% pour notre étude) ;
- Scénarios S1 et S2 avec à la fois une durée de vie plus longue des appareils et une diminution du taux de croissance du trafic.

Ces scénarios modifiés ont tous été construits pour tendre vers un net-zéro émissions de CO₂ à l'horizon 2050, comme les scénarios d'origine. Les chiffres clés de ces différents scénarios sont présentés dans le Tableau 18 et le Tableau 19. Ils sont comparés aux chiffres obtenus pour les scénarios d'origine (cf. Tableau 3, Section 2.4.3), en conservant le même mix de capacités de production d'électricité décarbonée à installer. Comme cela a été évoqué à la fin de la Section 3.4.2, il pourrait être intéressant d'essayer de quantifier l'effet de ce mix sur les besoins en ressources minérales associées aux trajectoires de décarbonation du trafic aérien. On pense en particulier à l'impact que pourrait avoir un mix reposant davantage sur le nucléaire qui présente un taux de charge beaucoup plus élevé que ceux de l'éolien et du photovoltaïque, et qui nécessite donc des besoins en puissances installées moindres pour une même production d'énergie. Néanmoins, le nucléaire présente aussi une complexité et des coûts de développement beaucoup plus importants (environ 5000 €/kW, contre 500-1000 €/kW pour le photovoltaïque, 1200 €/kW pour l'éolien terrestre et 2000-3000 €/kW pour l'éolien en mer [39]). De plus, certaines des ressources qui lui sont spécifiques sont elles aussi exposées à des risques de tensions. Les scénarios médians proposés par l'IEA et RTE que nous avons utilisés (cf. Section 2.4.2) semblent donc les plus raisonnables en première approche. Comme pour le Tableau 3, dans les tableaux ci-dessous, pour les flottes R, SMR et LR désignent respectivement l'avion régional, *small and medium range* et *long range* (long courrier). % renouv. désigne la part du remplacement d'appareils en fin de vie, le complément correspondant aux appareils ajoutés pour répondre à l'augmentation prévue du trafic aérien. Pour les énergies, N, ET, EM et P désignent respectivement le nucléaire, l'éolien terrestre, l'éolien en mer et le photovoltaïque.

5.2.1. Effet d'un allongement de la durée de vie en service des aéronefs

En ce qui concerne l'effet d'un allongement de la durée de vie des aéronefs (cf. Tableau 18), il serait au final contreproductif à l'échelle des scénarios. Si cela permettrait certes de diminuer le nombre d'avions à construire à l'horizon 2050 (diminution de 23% de la taille de la flotte contre 28% de diminution pour la part du renouvellement), d'où une immobilisation moindre de ressources dans la flotte d'appareils, cela ne représenterait un intérêt que pour les ressources spécifiques aux avions. En effet, en ralentissant l'introduction des nouvelles générations d'aéronefs plus sobres en termes de consommation de carburants, il faudrait au final produire plus de carburants décarbonés et les besoins en électricité décarbonée seraient donc accrus. Ce phénomène serait aussi accentué par un déploiement plus lent de la technologie H₂ qui présente un rendement de chaîne légèrement meilleur que celui des *e-fuels* (cf. Figure 4, Section 2.2.2). Dans la mesure où c'est la part associée à la production des carburants qui

pilote les besoins en ressources des trajectoires de décarbonation, allonger la durée de vie des aéronefs n'apparaît donc pas comme un bon levier. Même dans l'hypothèse où il ne serait pas possible d'introduire les électro-carburants et l'hydrogène en raison d'un mix électrique mondial trop carboné, cela aurait certes un effet positif en diminuant les besoins en ressources, mais cela aurait aussi un effet très négatif sur la diminution des émissions de CO₂ du trafic aérien en raison d'un déploiement plus lent des avions les plus sobres.

	Nombre d'avions à construire sur la période		Capacités de production d'énergie à déployer à terme sur la période			
	S1 et S2	S1 et S2 – 30 ans	S1	S1 – 30 ans	S2	S2 – 30 ans
2023 - 2035	30455 R : 8183 SMR : 19699 LR : 2573	23803 R : 6389 SMR : 15380 LR : 2034	N : 46,2 GW ET : 92,4 GW EM : 83,2 GW P : 240,3 GW H ₂ : 18,9 Mt.an ⁻¹	N : 48,5 GW ET : 97,1 GW EM : 87,3 GW P : 252,3 GW H ₂ : 19,8 Mt.an ⁻¹	N : 76,0 GW ET : 152,0 GW EM : 136,8 GW P : 395,1 GW H ₂ : 31,5 Mt.an ⁻¹	N : 78,4 GW ET : 156,8 GW EM : 141,1 GW P : 407,6 GW H ₂ : 32,3 Mt.an ⁻¹
2036 - 2050	52675 R : 14132 SMR : 34026 LR : 4517	40408 R : 10844 SMR : 26109 LR : 3455	N : 166,3 GW ET : 332,6 GW EM : 299,4 GW P : 864,8 GW H ₂ : 73,5 Mt.an ⁻¹	N : 170,3 GW ET : 340,6 GW EM : 306,6 GW P : 885,6 GW H ₂ : 73,5 Mt.an ⁻¹	N : 216,6 GW ET : 433,2 GW EM : 389,9 GW P : 1126,4 GW H ₂ : 98,4 Mt.an ⁻¹	N : 232,7 GW ET : 465,4 GW EM : 418,8 GW P : 1210,0 GW H ₂ : 102,5 Mt.an ⁻¹
2023 - 2050	83130 R : 22315 SMR : 53725 LR : 7090 % renouv. : 51,7%	64211 R : 17233 SMR : 41489 LR : 5489 % renouv. : 37,5%	N : 212,5 GW ET : 425,0 GW EM : 382,6 GW P : 1105,1 GW H ₂ : 92,4 Mt.an ⁻¹	N : 218,8 GW ET : 437,7 GW EM : 393,9 GW P : 1137,9 GW H ₂ : 93,3 Mt.an ⁻¹	N : 292,6 GW ET : 585,2 GW EM : 526,7 GW P : 1521,5 GW H ₂ : 129,9 Mt.an ⁻¹	N : 311,1 GW ET : 622,2 GW EM : 559,9 GW P : 1617,6 GW H ₂ : 134,8 Mt.an ⁻¹

Tableau 18 : Chiffres clés des trajectoires de décarbonation du trafic aérien dans l'hypothèse d'un allongement de la durée de vie des aéronefs à 30 ans au lieu de 20 ans.

5.2.2. Le levier de la croissance du trafic aérien

Concernant l'effet d'une moindre augmentation du trafic aérien annuel, de façon prévisible il s'agit là d'un levier très puissant pour diminuer les besoins en ressources associés à la mise en œuvre des scénarios de décarbonation (cf. Tableau 19). Les bénéfices se font sentir aussi bien sur les besoins nécessaires pour le renouvellement et l'accroissement de la flotte mondiale que sur ceux nécessaires à la production des carburants décarbonés. Pour la part des aéronefs, les besoins concerneraient au final principalement le renouvellement de la flotte, bien plus que sa croissance. Quant à la part des besoins en ressources pour la production des carburants décarbonés, là encore les économies en termes de capacités de production d'électricité et d'hydrogène décarbonés à installer, et donc de besoins en ressources minérales sous-jacents, sont significatives (de l'ordre de 33% pour une diminution de la croissance annuelle du trafic d'un facteur 2). Aborder la question d'une moindre augmentation, voire d'une réduction, du trafic aérien sur le long terme pourrait apparaître comme un levier d'action non prioritaire pour les acteurs de la filière aéronautique, néanmoins, force est de constater que ce questionnement n'est plus tabou, qu'il s'agisse d'une solution pensée comme temporaire le temps de décarboner le transport aérien (cf. interview de A. de Romanet, PDG d'Aéroports de Paris, https://www.bfmtv.com/economie/augustin-de-romanet-aeroport-de-paris-je-ne-veux-pas-qu-on-me-reproche-de-pousser-a-la-consommation_AV-202209190623.html) ou d'une solution envisagée sur le long terme (cf. réflexions du collectif Pensons l'Aéronautique pour Demain [8] ou l'étude de Louis *et al.* [82]).

	Nombre d'avions à construire sur la période		Capacités de production d'énergie à déployer à terme sur la période			
	S1 et S2	S1 et S2 – 1,6%	S1	S1 – 1,6%	S2	S2 – 1,6%
2023 - 2035	30455 R : 8183 SMR : 19699 LR : 2573	20748 R : 5846 SMR : 13073 LR : 1829	N : 46,2 GW ET : 92,4 GW EM : 83,2 GW P : 240,3 GW H ₂ : 18,9 Mt.an ⁻¹	N : 36,2 GW ET : 72,5 GW EM : 65,2 GW P : 188,4 GW H ₂ : 14,8 Mt.an ⁻¹	N : 76,0 GW ET : 152,0 GW EM : 136,8 GW P : 395,1 GW H ₂ : 31,5 Mt.an ⁻¹	N : 59,3 GW ET : 118,5 GW EM : 106,7 GW P : 308,2 GW H ₂ : 24,5 Mt.an ⁻¹
2036 - 2050	52675 R : 14132 SMR : 34026 LR : 4517	32566 R : 8467 SMR : 21387 LR : 2712	N : 166,3 GW ET : 332,6 GW EM : 299,4 GW P : 864,8 GW H ₂ : 73,5 Mt.an ⁻¹	N : 96,1 GW ET : 192,2 GW EM : 172,9 GW P : 499,6 GW H ₂ : 41,8 Mt.an ⁻¹	N : 216,6 GW ET : 433,2 GW EM : 389,9 GW P : 1126,4 GW H ₂ : 98,4 Mt.an ⁻¹	N : 125,2 GW ET : 250,5 GW EM : 225,4 GW P : 651,3 GW H ₂ : 57,2 Mt.an ⁻¹
2023 - 2050	83130 R : 22315 SMR : 53725 LR : 7090 % renouv. : 51,7%	53314 R : 14313 SMR : 34460 LR : 4541 % renouv. : 70,6%	N : 212,5 GW ET : 425,0 GW EM : 382,6 GW P : 1105,1 GW H ₂ : 92,4 Mt.an ⁻¹	N : 132,3 GW ET : 264,7 GW EM : 238,1 GW P : 688,0 GW H ₂ : 56,6 Mt.an ⁻¹	N : 292,6 GW ET : 585,2 GW EM : 526,7 GW P : 1521,5 GW H ₂ : 129,9 Mt.an ⁻¹	N : 184,5 GW ET : 369,0 GW EM : 332,1 GW P : 959,5 GW H ₂ : 81,7 Mt.an ⁻¹
	S1 et S2	S1 et S2 – 1,6% 30 ans	S1	S1 – 1,6% 30 ans	S2	S2 – 1,6% 30 ans
2023 - 2035	30455 R : 8183 SMR : 19699 LR : 2573	15096 R : 4052 SMR : 9754 LR : 1290	N : 46,2 GW ET : 92,4 GW EM : 83,2 GW P : 240,3 GW H ₂ : 18,9 Mt.an ⁻¹	N : 38,5 GW ET : 77,1 GW EM : 69,4 GW P : 200,4 GW H ₂ : 15,7 Mt.an ⁻¹	N : 76,0 GW ET : 152,0 GW EM : 136,8 GW P : 395,1 GW H ₂ : 31,5 Mt.an ⁻¹	N : 61,6 GW ET : 123,3 GW EM : 111,0 GW P : 320,6 GW H ₂ : 25,3 Mt.an ⁻¹
2036 - 2050	52675 R : 14132 SMR : 34026 LR : 4517	24668 R : 6620 SMR : 15939 LR : 2109	N : 166,3 GW ET : 332,6 GW EM : 299,4 GW P : 864,8 GW H ₂ : 73,5 Mt.an ⁻¹	N : 98,3 GW ET : 196,5 GW EM : 176,9 GW P : 511,1 GW H ₂ : 42,5 Mt.an ⁻¹	N : 216,6 GW ET : 433,2 GW EM : 389,9 GW P : 1126,4 GW H ₂ : 98,4 Mt.an ⁻¹	N : 133,4 GW ET : 266,8 GW EM : 240,1 GW P : 693,8 GW H ₂ : 59,1 Mt.an ⁻¹
2023 - 2050	83130 R : 22315 SMR : 53725 LR : 7090 % renouv. : 51,7%	39764 R : 10672 SMR : 25693 LR : 3399 % renouv. : 60,5%	N : 212,5 GW ET : 425,0 GW EM : 382,6 GW P : 1105,1 GW H ₂ : 92,4 Mt.an ⁻¹	N : 136,8 GW ET : 273,6 GW EM : 246,3 GW P : 711,5 GW H ₂ : 58,2 Mt.an ⁻¹	N : 292,6 GW ET : 585,2 GW EM : 526,7 GW P : 1521,5 GW H ₂ : 129,9 Mt.an ⁻¹	N : 195,1 GW ET : 390,1 GW EM : 351,1 GW P : 1014,4 GW H ₂ : 84,4 Mt.an ⁻¹

Tableau 19 : Chiffres clés des trajectoires de décarbonation du trafic aérien dans l'hypothèse d'une croissance du trafic de 1,6% par an au lieu de 3,1% par an. Durée de vie en service des avions de 20 ans en partie haute du tableau, et de 30 ans en partie basse.

Les données fournies en partie basse du Tableau 19 viennent confirmer les tendances déjà observées, à savoir que le levier principal pour diminuer les besoins en ressources pour la mise en œuvre des scénarios de décarbonation reste celui du taux de croissance annuel du trafic aérien. Plus il sera élevé et plus la mise en œuvre des scénarios nécessitera d'immobiliser de grandes quantités de ressources, avec le souci à terme que les risques de tensions observés sur certaines ressources empêchent la mise en œuvre complète des scénarios. Concernant le levier de la durée de vie des avions, il s'avère au final que, dans l'optique d'un déploiement rapide d'avions futurs sobres, il ne faut au contraire pas chercher à ralentir le renouvellement des appareils. En revanche, cela doit s'accompagner du développement du recyclage des matériaux aéronautiques en matériaux aéronautiques, afin qu'il y ait le moins possible de pertes de valeur lors du passage de la ressource primaire en fin de vie à une nouvelle ressource secondaire.

5.2.3. Importance du développement du démantèlement et du recyclage des aéronefs

Pour minimiser l'effet d'un renouvellement plus précoce des aéronefs sur les besoins en ressources, la solution à développer serait d'améliorer la recyclabilité et le recyclage effectifs des matériaux aéronautiques. Nous reviendrons sur ce point dans les pistes d'ouverture qui découlent de ces travaux, mais cela ne fait qu'une dizaine d'années environ que la filière aéronautique commence à se structurer pour gérer le démantèlement des avions en fin de vie. La filière française compte ainsi deux acteurs : TARMAC Aerosave (<https://www.tarmacaerosave.aero/>) et l'Aéroport de Châteauroux (<https://chateauroux.aeroport.fr/>). Quelques acteurs supplémentaires existent dans le monde, accrédités par l'AFRA (*Aircraft Fleet Recycling Association*, <https://afraassociation.org/>). Or, si différentes initiatives telles le projet PAMELA soutenu par la Commission Européenne (*Process for Advanced Management of End of Life of Aircraft*, https://ec.europa.eu/environment/ecoap/about-eco-innovation/good-practices/eu/719_fr, <https://trimis.ec.europa.eu/project/process-advanced-management-end-life-aircraft>) ont permis d'atteindre des taux de recyclage des avions de 90% voire davantage, dans les faits, il s'agit surtout de fournir des pièces de rechange ou d'un recyclage avec une perte de valeur significative des matériaux recyclés (cf. [48], <https://www.usinenouvelle.com/article/le-casse-tete-du-recyclage-des-avions.N337147>, ou les travaux de l'Observatoire du Recyclage et de l'Economie Circulaires, Orée, <http://www.oree.org/filiere-demantelement-des-vehicules-en-fin-de-vie.html>). Pour des raisons de volumes concernés et de rentabilité des filières, les alliages d'aluminium ou les aciers aéronautiques se retrouvent ainsi souvent recyclés avec des alliages d'aluminium ou des aciers utilisés dans d'autres secteurs d'activité (emballages ou construction par exemple), et les éléments d'alliage qui font toute leur valeur du point de vue aéronautique se retrouvent à l'état « d'impuretés » dans des métaux à plus faible valeur ajoutée. Même dans le cas des superalliages, on se rend compte que ce sont essentiellement les déchets de production qui sont utilisés pour faire de la ressource secondaire (<https://www.aerometal.fr/>). La structuration d'une filière de recyclage des matériaux aéronautiques présente donc un enjeu de taille surtout que, selon les estimations, ce seraient de l'ordre de 600 avions par ans qui arriveraient en fin de vie, là où les capacités de démantèlement des acteurs du secteur seraient plutôt de l'ordre de la moitié si on se fie aux chiffres qu'ils avancent concernant les nombres d'avions qu'ils démantèlent chaque année, et ceux qu'ils doivent stocker en attendant de pouvoir le faire. En outre, la filière étant récente, il y a aussi tous les stocks d'avions envoyés en fin de vie avant sa mise en place qu'il faudra traiter.

Pour se convaincre du potentiel d'une telle filière, il suffit de regarder le cas particulier du rhénium. Ce métal est très majoritairement utilisé pour les superalliages monocristallins pour les aubes des turbomachines (80% des usages, cf. Annexe C) et son marché est très restreint et inélastique. On pourrait donc s'attendre à ce que son EOL-RIR soit faible car son recyclage à titre individuel ne peut pas être rentable économiquement. Or, c'est l'une des trois seules ressources qui présente un EOL-RIR supérieur ou égal à 50% (cf. Tableau 43, Annexe I). Cela tient au fait que les aubes présentant des défauts sont immédiatement refondues et réintroduites comme ressource secondaire dans la chaîne de production ; c'est donc tout le superalliage qui est recyclé en même temps et non ses éléments d'alliage pris individuellement. Il est en effet beaucoup plus facile métallurgiquement de réajuster les teneurs en éléments d'un alliage que d'essayer de dissocier chaque élément pour le recycler séparément.

Avec la mise en place d'une filière performante de recyclage des matériaux aéronautiques sans perte de valeur, et sous l'hypothèse d'une croissance du trafic beaucoup plus faible que celle envisagée, on pourrait tendre vers une notion de circularité de la filière de production des aéronefs en ayant une part très significative des besoins en ressources couverts par les ressources secondaires.

5.3. Risque d'indisponibilité des ressources : la difficile concrétisation des trajectoires de décarbonation du trafic aérien à l'horizon 2050

On retiendra de ce chapitre que la mise en œuvre complète des scénarios de décarbonation du trafic aérien à l'horizon 2050 est exposée à deux risques majeurs, qui sont liés au besoin de grandes quantités d'électricité décarbonée de ces scénarios. Le premier risque est associé à un sous-investissement important, et constaté, des états pour financer la transition énergétique. Le second est plus difficile à quantifier et concerne la survenue possible de tensions sur certaines ressources indispensables à la décarbonation massive du mix électrique mondial à moyen terme.

Si l'un au moins de ces risques devait être avéré, la mise en œuvre des scénarios de décarbonation pourrait finalement n'être que partielle et reposer pour l'essentiel sur l'amélioration de la sobriété énergétique des avions, sur l'optimisation des opérations aéroportuaires et sur l'introduction d'une part plus ou moins importante de bio-carburants. L'introduction des électro-carburants et de l'hydrogène serait quant à elle suspendue à l'existence d'un mix électrique mondial suffisamment décarboné pour qu'elle n'entraîne pas une augmentation d'émissions indirectes de CO₂ par rapport celles directes dues au kérosène. En fonction du mix électrique mondial, on peut estimer les émissions de CO₂ résiduelles du trafic aérien à l'horizon 2050 sur la base des scénarios actuels, mais on resterait finalement assez loin de l'objectif net-zéro émissions ou presque escompté (cf. Tableau 17). On notera aussi que, si le scénario S2 semble le plus prometteur en théorie, sa plus grande dépendance aux électro-carburants et à l'hydrogène, le rend beaucoup plus aléatoire que le scénario S1 en termes de mise en œuvre.

Dans l'hypothèse où la décarbonation du mix électrique mondial s'avèrerait finalement trop lente pour permettre une introduction massive des électro-carburants et de l'hydrogène, un levier immédiat dont disposerait les états serait d'inciter à une réduction de la croissance annuelle du trafic, voire au besoin une stagnation ou une diminution de celle-ci. La croissance annuelle du trafic aérien est effectivement le facteur dominant concernant le dimensionnement des flottes futures d'appareils, et donc des besoins en ressources et en électricité décarbonée des scénarios ; plus cette croissance sera faible, plus les scénarios seront sobres et facilement réalisables. Néanmoins, comme cela est évoqué dans les perspectives de ce travail, il pourrait être envisagé un déploiement partiel des électro-carburants et de l'hydrogène en raisonnant à l'échelle des mix électriques des états, tout en conservant une part de kérosène si la part des bio-carburants ne peut augmenter. Cela permettrait de diminuer en partie les émissions de CO₂ du trafic aérien, voire éventuellement de tendre vers un net-zéro émissions dans le cas d'une moindre croissance du trafic.

En revanche, compte tenu de la nécessité d'aller vers des flottes toujours plus sobres en termes de consommation de carburants, il ne faut surtout pas retarder le déploiement des nouvelles générations d'appareils ultra-sobres en allongeant les durées de vie en service. Mais, pour que ce renouvellement des flottes ne s'accompagne pas d'une surconsommation des ressources nécessaires à la fabrication des avions, il est indispensable de poursuivre dans la voie d'une mise en place d'une filière performante de démantèlement des appareils et de recyclage des matériaux aéronautiques, afin de minimiser les pertes de valeur ajoutée lors du passage de la fin de vie à la ressource secondaire.

6. Conclusions et perspectives

Les travaux présentés tout au long de ce rapport avaient pour objectif d'identifier et d'estimer les besoins en ressources minérales qui seront nécessaires à la mise en œuvre des scénarios de décarbonation du trafic aérien. Il s'agit là d'un enjeu majeur pour le secteur aéronautique car l'atteinte de l'objectif net-zéro émissions de CO₂ qu'il s'est fixé à l'horizon 2050 repose entièrement sur la concrétisation de ces scénarios. Ces derniers s'appuient pour l'essentiel sur le déploiement de nouvelles technologies qui doivent permettre de développer des aéronefs toujours moins consommateurs de carburants pour les futures générations d'appareils, ainsi que sur la substitution progressive du kérosène par des bio-carburants puis, plus massivement, par des électro-carburants et enfin de l'hydrogène. A l'échelle du cycle de vie d'un aéronef, il était tout à fait logique d'aborder la problématique de la réduction des émissions de CO₂ du trafic aérien sous l'angle de la consommation de carburants et de leur décarbonation ; les émissions de CO₂ de la phase d'usage d'un avion représentent de l'ordre de 90% du total des émissions sur tout son cycle de vie.

Néanmoins, le choix de faire reposer pour partie ces scénarios sur les électro-carburants et l'hydrogène suspend la performance des trajectoires de décarbonation de l'aérien à la réalisation des scénarios de la transition énergétique. Ces carburants du futur nécessitent en effet de très grandes quantités d'électricité décarbonée comme énergie intermédiaire pour qu'eux-mêmes puissent présenter une faible empreinte CO₂ sur leur cycle de vie ; plus l'empreinte CO₂ de l'électricité utilisée pour leur production est faible et plus ces carburants voient leur propre empreinte CO₂ diminuer. C'est finalement ce lien entre scénarios de décarbonation du trafic aérien et scénarios de la transition énergétique qui impose un changement de paradigme complet pour le secteur aéronautique, et qui justifie tout l'intérêt des résultats de cette étude. En effet, la mise en œuvre de la transition énergétique soulève des interrogations quant aux besoins affichés pour certaines ressources minérales qui seraient amenés à croître de façon considérable en quelques décennies à peine. Cela doit ainsi amener le secteur aéronautique à élargir sa vision de son empreinte carbone à la question des ressources et des émissions indirectes induites par son activité.

Indépendamment de toute discussion autour de la disponibilité effective des technologies envisagées pour décarboner le transport aérien (les travaux réalisés n'avaient nullement vocation à évaluer l'avancée des recherches et des développements industriels pour ces technologies), la question fondamentale qui s'est posée a été la suivante : aurons-nous les ressources minérales suffisantes pour déployer les technologies nécessaires à la décarbonation du transport aérien aussi rapidement et massivement que prévu ? La seconde question qui a immédiatement découlé de cette première question a été : si jamais certaines des technologies ne pouvaient finalement pas être déployées, quel impact cela aurait-il sur les performances à terme des scénarios de décarbonation ?

Afin de répondre à ces questions, nous avons donc défini le système avion comme système de référence pour cette étude. C'est-à-dire que nous avons non seulement considéré les flottes d'appareils qui seront à renouveler et agrandir d'ici 2050, suivant les trajectoires de décarbonation, mais aussi l'ensemble des infrastructures de production d'électricité et d'hydrogène décarbonés qui seront à prévoir pour la production des carburants du futur, le transport aérien n'en ayant besoin d'aucune pour l'instant. En travaillant sur les empreintes matières des différents éléments constitutifs de notre système d'étude (avions, centrales nucléaires, éoliennes, fermes photovoltaïques, batteries, électrolyseurs, *etc.*), nous avons ainsi pu identifier une liste de 36 ressources minérales qui seront indispensables à la mise en œuvre des scénarios de décarbonation du trafic aérien. Or, parmi ces

ressources, 21 sont identifiées comme critiques par l'UE, c'est-à-dire qu'elles sont exposées à des risques d'approvisionnement et qu'elles sont essentielles aux technologies sur lesquelles reposent l'économie et les modes de vie des sociétés industrialisées.

L'étude des causes des tensions qui pourraient impacter la disponibilité à terme de certaines de ces ressources, et par conséquent des technologies qui en dépendent, ainsi que les perspectives d'évolution de ces tensions, qu'elles résultent de conséquences géopolitiques, d'enjeux de production minière ou de recyclabilité des ressources, a mis en exergue deux problématiques complètement différentes en fonction de l'échelle que l'on considère. Les conclusions à ce travail ne sont effectivement pas du tout les mêmes si on se focalise sur l'évolution des flottes d'appareils ou si au contraire on aborde aussi la problématique de la production des carburants décarbonés.

6.1. Evolution des flottes d'appareils : le fort potentiel du recyclage pour faire face aux risques de tensions sur les ressources

Si on se place à l'échelle de l'évolution des flottes d'appareils, les résultats de cette étude montrent que les besoins en ressources associés au renouvellement de la flotte mondiale peuvent apparaître comme un problème de second ordre, même en cas d'augmentation significative du nombre d'avions en service afin de répondre à une augmentation du trafic qui aurait lieu d'ici 2050. En effet, à l'exception de quelques ressources très spécifiques aux avions, les besoins en ressources des scénarios de décarbonation vont être très majoritairement dimensionnés par ceux des infrastructures de production d'électricité et d'hydrogène décarbonés qu'il sera nécessaire de déployer en vue de la production massive de certains carburants aéronautiques décarbonés.

Cependant, le fait que la part des aéronefs ne soit pas la part qui dimensionnera le besoin ne veut pas dire que la production des aéronefs ne pourra pas être impactée par d'éventuelles tensions à venir sur certaines ressources. La survenue de tensions pour certains matériaux indispensables à la construction des aéronefs et pour lesquels il y a conflit d'usage avec les technologies de l'énergie semble en effet fortement probable. Ces ressources sont le nickel, le cobalt, le lithium, le cuivre, le silicium, le vanadium et le zirconium pour celles identifiées le plus clairement. Cela veut dire que les productions de superalliages et d'alliages de titane qui utilisent ces éléments, soit comme élément de base soit comme élément d'alliage, pourraient être directement impactées. Les alliages d'aluminium et les aciers sont concernés eux aussi mais, grâce à la variété des nuances d'alliages et grâce aux composites qui font que les nouvelles générations d'aéronefs en utilisent significativement moins qu'avant, le risque semble moins élevé dans ce cas.

Face au risque susmentionné, le secteur aéronautique peut éventuellement fonctionner en subissant des hausses des prix des matières premières. Cela pourrait être envisageable dans le cas des métaux majeurs dont les marchés présentent une certaine élasticité et pour lesquels la production pourra plus facilement s'adapter afin de répondre à une demande croissante ; sont concernés le cuivre, le nickel et le cobalt. Qui plus est, pour ces ressources, les besoins pour la construction des aéronefs sont négligeables à l'échelle de ceux de la transition énergétique. Le lithium et le silicium métal suivent aussi ce schéma. Les cas du vanadium et du zirconium semblent en revanche plus problématiques car il s'agit de métaux mineurs pour lesquels la production s'adaptera beaucoup plus difficilement à la demande en raison de leur statut de sous-produits de l'exploitation minière ; accepter de payer ces matières premières plus cher ne résoudra pas forcément le problème de leur disponibilité. Dans cette optique, le rhénium est aussi à surveiller car il s'agit d'un sous-produit de sous-produit minier. Même si son usage concerne quasi-exclusivement certains superalliages pour lesquels il entre dans leur composition, l'extension de l'usage des

superalliages en question du domaine militaire au domaine civil pourrait entraîner une croissance significative de la demande. La production minière ne pourra pas forcément répondre à cette demande en raison de la petitesse du marché en question, ou alors il faudrait que le rhénium acquière un quasi-statut de métal précieux au même titre que les platinoïdes et son prix s'envolerait (les prix de l'iridium et du platine sont environ 50 fois et 30 fois plus élevés que celui du rhénium, et avec un marché cumulé en tonnages 4 fois supérieur, cf. Tableau 43, Annexe I).

La filière aéronautique possède néanmoins une solution très prometteuse pour résoudre le problème des tensions externes qui pourraient peser sur certaines des ressources nécessaires à la fabrication des appareils. Il s'agit de la mise en place d'une filière de démantèlement et de recyclage des matériaux aéronautiques, qui sont des matériaux à très forte valeur ajoutée. Une telle filière existe mais sa mise en œuvre est récente et des gains en termes de maturité de la filière à court et moyen termes sont très probables. En s'inspirant du cas du rhénium, dont la part de la ressource secondaire dans les flux de matière première est l'une des plus élevée du panel des ressources étudiées, en dépit de son marché très restreint, on comprend tout l'intérêt pour la filière de recycler ses matériaux en interne. Les matériaux aéronautiques doivent rester des matériaux aéronautiques afin qu'il y ait le moins possible de perte de valeur ajoutée lors de leur recyclage. A court terme, cela peut apparaître comme un coût en regard des faibles volumes concernés mais, sur le long terme, la filière devrait ainsi être moins sensible à des tensions externes sur les ressources qu'elle emploie et qui entraîneront inévitablement une augmentation des prix de ces matières premières. C'est aussi un enjeu de souveraineté de la filière, vis-à-vis de la Chine notamment qui s'est lancée dans la construction aéronautique et qui domine la production de la ressource. En outre, tous les acteurs sont déjà présents entre les avioneurs, les plateformes de mise à disposition des appareils pour les compagnies aériennes et celles de démantèlement des avions en fin de vie. En structurant complètement la filière suivant une telle approche d'économie circulaire, il doit être possible d'avoir une traçabilité complète des avions tout au long de leur vie en service et d'optimiser la part de la ressource secondaire dans les besoins en matières premières ; le CORAC est d'ailleurs en train de mettre en place une feuille de route dédiées aux questions d'ACV, de recyclage et d'économie circulaire des aéronefs. Une question qui se pose concerne le rôle que pourrait jouer la filière aéronautique européenne dans ce contexte. En effet, l'UE dispose d'une structure adaptée à cette problématique, la filière REP (Responsabilité Elargie du Producteur), et elle est l'un des leaders du secteur aéronautique (avec l'Amérique du Nord). La filière aéronautique européenne, en renforçant son engagement dans cette voie, pourrait jouer un rôle de prescripteur (cf. le cas de TARMAC Aerosave qui vient de lancer un partenariat avec la Chine pour y implanter une première plateforme de démantèlement des aéronefs, https://actu.fr/economie/hautes-pyrenees-tarmac-aerosave-apporte-son-expertise-dans-le-recyclage-d-avions-a-la-chine_48015597.html).

6.2. Production des carburants du futur : le risque d'une transition énergétique impactée par des tensions à prévoir pour certaines ressources critiques

A l'échelle de la mise en œuvre des scénarios de décarbonation du trafic aérien, la question des tensions à prévoir sur certaines ressources apparaît en revanche beaucoup plus critique. Dans ce cas, le problème découle du fait du risque élevé d'avoir une transition énergétique beaucoup plus lente et partielle qu'envisagée.

A l'heure actuelle, le déploiement des technologies de décarbonation de l'énergie, pour aller notamment vers un usage massif d'électricité décarbonée à la place des énergies fossiles, est surtout ralenti par le manque d'investissement des états pour financer cette transition. Cependant, même dans l'hypothèse où ces retards

d'investissement seraient finalement comblés, de très nombreuses études concernant les besoins en ressources minérales qui seront nécessaires pour mener à bien cette transition montrent que ces besoins risquent d'être bien supérieurs aux capacités de production pour certaines des ressources concernées. La survenue de telles tensions sur la ressource entraînera inévitablement des retards dans le déploiement des technologies de décarbonation des énergies. En outre, l'analyse des enjeux géopolitiques, économiques et techniques de la production minière ne laissent pas entrevoir l'existence de leviers qui permettraient de diminuer significativement le risque de tensions. Il semble même au contraire que, plus il faudra exploiter la ressource, plus les tensions seront accrues en raison d'une plus faible rentabilité économique des gisements qui seront exploités (diminution des teneurs en minerais, d'où une exploitation qui nécessitera toujours plus d'une énergie toujours plus chère).

Concernant les besoins spécifiques pour la décarbonation du trafic aérien, en plus des ressources précédemment citées pour l'évolution des flottes d'appareils, le galium, l'indium, le graphite et les terres rares apparaissent comme particulièrement critiques. Quand on regarde l'ensemble de ces ressources et les technologies dans lesquelles elles sont utilisées, on s'aperçoit que toutes les technologies de production d'électricité décarbonée sont concernées par un risque de tension à venir sur une ou plusieurs de leurs ressources spécifiques. Il est donc probable que le secteur aérien ne puisse finalement pas disposer d'électricité décarbonée en quantité suffisante pour permettre la production d'électro-carburants et d'hydrogène suffisamment décarbonés pour être introduits comme carburants de substitution à la place du kérosène. Tout du moins, à l'horizon 2050, cette introduction ne pourrait finalement être que partielle et le bénéfice en termes de réduction des émissions de CO₂ du trafic aérien pourrait être bien plus faible que prévu, loin du net-zéro émissions espéré lors de la construction des trajectoires de décarbonation. Face à ce risque, parmi les deux scénarios de décarbonation proposés par le CORAC, c'est le scénario S1 qui semble le plus robuste car c'est celui qui repose le moins sur les électro-carburants et l'hydrogène.

Tous les travaux concourant à l'amélioration de la sobriété énergétique des appareils et de l'optimisation des manœuvres aéroportuaires apparaissent donc comme prioritaires car, avec l'introduction d'une partie de bio-carburants, ils représentent les voies les plus sûres pour la réduction des émissions de CO₂ du trafic aérien. Dans cette optique, il ne faut surtout pas retarder la pénétration des futures générations d'aéronefs ultra-sobres dans la flotte afin de minimiser les consommations de carburants, mais cela doit s'accompagner du renforcement de la filière de démantèlement et de recyclage des avions, comme évoqué dans la section précédente. De même, électrifier certaines opérations aéroportuaires comme l'utilisation de tracteurs de piste électriques peut-être une très bonne opportunité compte tenu des rendements très élevés des moteurs électriques.

En revanche, utiliser l'électricité comme énergie intermédiaire en vue de produire des carburants qui seront brûlés dans des moteurs thermiques soulève des questionnements pour l'instant, compte tenu de la trop forte empreinte carbone du mix électrique mondial actuel et du faible rendement énergétique global de la chaîne de production de ces carburants. Tous les travaux qui concourront à l'amélioration de ce rendement de chaîne sont donc essentiels, dans le but aussi de réduire les coûts de production des carburants envisagés.

6.3. Déploiement spatial et temporel des carburants du futur : un enjeu de transition

Bien que les perspectives évoquées précédemment soient plutôt pessimistes et suggèrent qu'il va être difficile de faire tendre les émissions de CO₂ du trafic aérien vers un net-zéro à l'horizon 2050, sans diminution massive de ce trafic, la question à se poser est celle de l'échelle à considérer pour le déploiement des scénarios de décarbonation. En effet, la viabilité actuelle du transport aérien repose sur une vision uniformisée des enjeux

d'approvisionnement en énergie ; quels que soient ses points de départ et d'arrivée à travers le monde, un avion dispose toujours du même kérosène. Dans l'optique d'une transition du transport aérien vers un transport moins carboné, à défaut d'être complètement décarboné, il va falloir opérer un changement de paradigme concernant ces enjeux d'approvisionnement en énergie. Dans le cadre d'une transition progressive, on pourrait ainsi imaginer que les électro-carburants ou l'hydrogène ne soient par exemple utilisés que sur des vols domestiques ou entre pays ayant un mix très décarboné dans un premier temps. Ou, pourquoi ne pas envisager un avion dont le réservoir serait rempli soit de kérosène, soit de bio-carburant, soit d'électro-carburant suivant l'endroit d'où il décolle ? un tel bouleversement des modes de fonctionnement de l'aérien n'est pas inconcevable, mais il soulève de nombreuses questions de faisabilité technique et de remise en cause du modèle économique dont il faut s'emparer.

Par exemple, avec son mix électrique très fortement décarboné (62 gCO₂eq/kWh [39]), la France serait en mesure de produire de l'hydrogène bas-carbone. Tous ses vols domestiques pourraient ainsi être opérés grâce à des *e-fuels* ou de l'hydrogène. De même, les vols vers la Suède, autre pays au mix électrique très décarboné, pourraient se faire *via* ces carburants. En revanche cela ne serait pas envisageable pour des vols vers la Pologne en raison de son mix électrique très carboné. Mais, qu'en serait-il de la viabilité économique d'un tel fonctionnement ? Faudrait-il en effet rattacher certaines technologies d'aéronefs à certaines lignes aériennes ? N'y aurait-il pas alors un risque de devoir surdimensionner les flottes d'appareils, les aéronefs n'étant plus forcément interchangeables ? Quelle influence cela aurait-il sur le prix des billets ? Faudrait-il répartir le surcoût de ces carburants sur l'ensemble du trafic ou juste sur les pays qui en bénéficieraient ?

Du point de vue géopolitique, des équilibres entre états pourraient ainsi être modifiés et certaines tensions apparaître. Certains pays importateurs de pétrole pourraient-ils devenir exportateurs d'électro-carburants ? Qu'est-ce que cela impliquerait en termes de consommation d'électricité pour ces pays tous usages confondus (il ne faudrait pas que ce besoin d'électricité additionnel soit carboné) ? Les pays exportateurs de pétrole actuellement, pourraient-ils devenir exportateurs d'électro-carburants ? Les pays dont le mix électrique est déjà très décarboné ne bénéficieraient-ils pas d'un avantage qui serait accru par une transition énergétique plus lente qu'espérée ?

Si on pousse au maximum le raisonnement du particularisme, le problème du transport de l'hydrogène étant un problème majeur, les carburants aéronautiques pourraient-ils être produits localement sur les aéroports selon une démarche d'Ecologie Industrielle et territoriale ? Certaines grandes métropoles françaises envisagent déjà de telles approches pour leurs mobilités lourdes (bus, bennes à ordures), dans le cas d'hydrogène gazeux ou sous forme de piles à combustible et issu du biométhane.

Tous ces questionnements ne lèvent en rien les principaux verrous technologiques qui persistent avant d'envisager une substitution du kérosène par les *e-fuels* et l'hydrogène, à savoir la capture du CO₂ à grande échelle et le stockage de l'hydrogène liquéfié. Ils ne résolvent pas non plus le problème d'éventuels conflits d'usage à prévoir concernant la demande en hydrogène décarboné ou en certaines ressources minérales. En revanche, ils permettent d'interroger ce que serait une stratégie pertinente pour une mise en œuvre progressive et partielle des solutions de décarbonation du trafic aérien. En arrière-plan, il est question de la contribution réelle que pourrait avoir les électro-carburants et l'hydrogène pour décarboner le trafic aérien, par rapport à celle escomptée dans les scénarios de décarbonation. Nombre des questions ci-dessus peuvent aussi être posées dans des formes similaires pour les bio-carburants autour des enjeux de disponibilité de la biomasse.

Par ailleurs, cela soulève aussi la question d'un nécessaire aller-retour entre un raisonnement à l'échelle locale et un raisonnement à l'échelle mondiale pour établir une stratégie pertinente de décarbonation du trafic aérien. En effet, les besoins en électricité décarbonée pour la décarbonation du trafic aérien n'étant pas pris en compte dans les scénarios de la transition énergétique, et n'étant pas négligeables à l'échelle de la demande prévue tous secteurs confondus hors aérien, se posera alors forcément la question de comment produire encore plus d'électricité que prévu. Cela sera-t-il possible ? Avec quelles sources d'énergies dans ce cas, carbonées ou non ?

6.4. Décarbonation du trafic aérien : perspectives à explorer concernant les ressources minérales et les matériaux

Si on se recentre sur la question des ressources, la première perspective qui découle de cette étude consisterait à affiner les besoins matières associés aux électrolyseurs. En effet, l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau est au cœur des scénarios or, les besoins en ressources qui devront être immobilisées pour le déploiement des électrolyseurs sont probablement ceux qui ont été le plus sous-estimés dans les chiffrages proposés. Il faudrait ainsi consolider les données d'empreinte matières des électrolyseurs au travers d'une étude bibliographique approfondie sur le sujet. Il faudrait aussi étendre cette quantification des empreintes matières aux infrastructures complètes et non aux seules unités d'électrolyse. Par ailleurs, il serait indispensable de prendre en compte un renouvellement des électrolyseurs sur la période des scénarios de décarbonation mais, pour cela, il faudrait envisager une approche continue des besoins et non à terme par période. Cela suggère aussi qu'il faudrait s'intéresser à la fin de vie de ces infrastructures et à la recyclabilité des unités d'électrolyse. En termes d'enjeux de tensions sur les ressources, cela ne devrait pas avoir d'impact significatif pour les ressources communes à l'ensemble des technologies impliquées dans les scénarios de décarbonation de l'aérien. En revanche, la question pourrait se poser pour l'iridium principalement, et éventuellement pour le platine et le titane.

D'autres problématiques à étudier ressortent de ces travaux. En négligeant la partie avionique lors de l'estimation des empreintes matières des avions, la décision a été prise de centrer ce travail sur les tensions induites par les besoins en ressources pour la transition énergétique. Néanmoins, la numérisation des modes de vie est une autre transition, pas forcément sans lien avec cette dernière d'ailleurs, qui va mobiliser de grandes quantités de ressources, certaines communes à celles déjà étudiées ici et d'autres plus spécifiques [37], [50]. L'avionique pourrait donc être très fortement impactée par les besoins en composants électroniques et en ressources associées pour la transition numérique. Concernant les ressources déjà identifiées comme à risque de tensions élevées, il serait aussi pertinent de poursuivre l'analyse de ce risque de façon plus spécifique à chacune de ces ressources, dans une démarche moins macroscopique que celle proposée en première approche tout au long de ce travail.

Par ailleurs, si cette étude a permis d'obtenir des informations très intéressantes sur les empreintes matières des éléments constitutifs du système avion sous l'angle des ressources minérales, sous l'angle de l'ACV des avions et des carburants aéronautiques envisagés pour le futur la part des matériaux composites et du béton par exemple a complètement été négligée. La mise en œuvre de l'un des scénarios de décarbonation du trafic aérien aboutira probablement à un changement très significatif des parts respectives des différentes étapes du cycle de vie en termes d'émissions de CO₂. La phase d'usage très largement majoritaire actuellement sera amenée à décroître plus ou moins fortement, contrairement aux phases d'extraction des ressources et de production qui seront amenées à croître au moins en relatif. Qu'il s'agisse de l'ACV des avions ou de celle des électro-carburants et de l'hydrogène, les empreintes matières et énergie de la production de ces éléments du système d'étude vont en effet induire un

impact plus important des matériaux, des minéraux et des consommations d'énergie sur leur empreinte environnementale, tout particulièrement dans la perspective d'un épuisement qualitatif des ressources minières. Afin de bien appréhender les enjeux qui seraient associés à un rééquilibrage plus ou moins important des poids respectifs des différentes phases de l'ACV du transport aérien, le secteur aéronautique doit se doter des outils lui permettant de mettre en place une telle approche d'ACV robuste à l'échelle du système avion, et pas seulement à l'échelle des sous-ensembles technologiques.

Le cas des technologies de capture et de séquestration du CO₂ nécessite lui aussi d'être approfondi. Compte tenu du manque de maturité de ces technologies à l'échelle industrielle, et du manque de données concernant leur empreinte matières, elles ont été négligées à ce stade des travaux. Néanmoins, elles sont indispensables pour produire des électro-carburants sans avoir recours aux hydrocarbures comme matière première [22]–[24], indépendamment donc du caractère plus ou moins carboné de l'énergie utilisée pour la production de ces carburants. Dans le cas de l'hydrogène, ces technologies pourraient aussi jouer un rôle moindre *via* sa production à partir du méthane [22]–[24]. Une partie significative des scénarios de décarbonation du trafic aérien repose donc aussi sur le déploiement de ces technologies qui, en plus des enjeux de rendement de chaîne énergétique qui y sont associés, soulèvent la question de leur empreinte matières. Leur déploiement pourrait en effet nécessiter de grandes quantités de vanadium, niobium, cobalt, molybdène, tantale, rhénium et yttrium si on se base sur les technologies actuellement en développement [60]. On observera immédiatement que certaines de ces ressources sont déjà identifiées comme à risque de tensions dans l'optique de la mise en œuvre des scénarios de la transition énergétique (vanadium, cobalt), ou qu'elles pourraient être concernées par des risques de conflit d'usage avec le secteur aéronautique (tantale, rhénium).

Pour finir, à l'échelle plus large de l'extraction des ressources, on peut aussi se poser la question de l'exploitation d'autres sources de production des matières premières métalliques que les seules mines. Différentes voies sont ainsi régulièrement envisagées comme l'exploitation des nodules polycristallins ou les ions dissous dans les océans par exemple [48]. Cependant, de nombreuses interrogations subsistent concernant les performances de production de ces voies. Quels seraient leurs coûts d'exploitation, et donc quels seraient les coûts des matières premières qui en seraient issus ? Quelles seraient leurs coûts énergétiques et environnementaux ? Quelles capacités de production peut-on en attendre ? Toutes les matières premières métalliques sont-elles accessibles par ces voies ou certaines seulement ? Afin d'apporter des réponses à toutes ces questions, si elles existent, il serait intéressant de faire une revue de l'état de l'art sur le sujet.

Références

- [1] « Décarbonation du transport aérien : Analyses et propositions du CORAC », CORAC, 2021.
- [2] « Pouvoir voler en 2050 : quelle aviation dans un monde contraint ? », The Shift Project, 2021.
- [3] « Energy Technology Perspectives 2020 », IEA, 2020.
- [4] J. E. Penner *et al.*, *L'aviation et l'atmosphère planétaire : résumé à l'intention des décideurs*. Genève: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 1999.
- [5] D. S. Lee *et al.*, « The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018 », *Atmospheric Environment*, vol. 244, p. 117834, janv. 2021, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117834.
- [6] S. Gössling et A. Humpe, « The global scale, distribution and growth of aviation: Implications for climate change », *Global Environmental Change*, vol. 65, p. 102194, nov. 2020, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2020.102194.
- [7] J. Valentino, « Enquête Nationale auprès des Passagers Aériens 2015-2016 », DGAC, 2017.
- [8] « Moins d'avions / plus d'emplois : Recommandations pour une transformation en une région écologiste, égalitaire, épanouie. », Collectif Pensons l'Aéronautique pour Demain, 2021.
- [9] D. Williams, « 2021 United States Aviation Climate Action Plan », p. 40, 2021.
- [10] « Waypoint 2050 : Balancing growth in connectivity with a comprehensive global air transport response to the climate emergency: a vision of net-zero aviation by mid-century », ATAG, 2021.
- [11] « World Energy Outlook 2020 », IEA, 2020.
- [12] « Reaching zero with renewables: Eliminating CO2 emissions from industry and transport in line with the 1.5°C climate goal », IRENA, 2020.
- [13] « World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway », IRENA, 2021.
- [14] « World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway », IRENA, 2022.
- [15] C.-A. Paillard, « La question des minerais stratégiques, enjeu majeur de la géoéconomie mondiale », *Géoéconomie*, vol. 59, n° 4, p. 17, 2011, doi: 10.3917/geoec.059.0017.
- [16] O. Vidal, B. Goffé, et N. Arndt, « Metals for a low-carbon society », *Nature Geosci*, vol. 6, n° 11, p. 894-896, nov. 2013, doi: 10.1038/ngeo1993.
- [17] G. Alain, « L'épuisement des métaux et minéraux : faut-il s'inquiéter ? », ADEME, 2017.
- [18] G. Lepasant, « La transition énergétique face au défi des métaux critiques », IFRI, 2018.
- [19] « Matières premières et nouvelles dépendances », *Annales des Mines*, 99, 2020.
- [20] F. De Rochette et G. De Temmerman, « Fluxes, not stocks: the real challenges of metallic resources for the energy transition », Zenon Research, 2022.
- [21] P. Schmollgruber, A. Albanese, D. Rohacs, A. Kocsis, et K. Sibilski, « Effects of GABRIEL concept on the air transportation sustainability », European Commission, 2014.
- [22] X. Vancassel *et al.*, « Rapport final du projet ENERGIA « Evaluation Nouvelles Energies Décarbonées pour l'Aéronautique » », ONERA, RT 3/30747 DTP, 2021.
- [23] X. Vancassel *et al.*, « Rapport de synthèse du projet ENERGIA « Evaluation Nouvelles Energies Décarbonées pour l'Aéronautique » ANNEXES », ONERA, RT 4/30747 DTP, 2021.
- [24] X. Vancassel *et al.*, « Rapport de synthèse du projet ENERGIA « Evaluation Nouvelles Energies Décarbonées pour l'Aéronautique » », ONERA, RT 5/30747 DTP, 2021.
- [25] « Aviation décarbonée : embarquement immédiat », Institut Montaigne, 2022.

- [26] Académie de l'air et de l'espace, Association aéronautique et astronautique de France, et Académie des technologies, Éd., *Matériaux aéronautiques d'aujourd'hui et de demain*. Toulouse: Académie de l'air et de l'espace, 2014.
- [27] « On Board : a sustainable future », OACI, 2016.
- [28] J.-B. Jarin, « Étude sur l'apport des carburants durables dans la trajectoire bas carbone du secteur », Mines ParisTech, 2021.
- [29] M. Prewitz, A. Bardenhagen, et R. Beck, « Hydrogen as the fuel of the future in aircrafts – Challenges and opportunities », *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, n° 46, p. 25378-25385, sept. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.06.238.
- [30] « Espace et Défense, enjeux actuels », Lettre 3AF, 47, 2021.
- [31] B. Paluch, « Pre-PRF Décarbonation – Etude de dimensionnement et d'intégration des réservoirs LH2 dans les avions de transport civils », ONERA, RT 1/31093 DMPE/DMAS, 2022.
- [32] P. Boucly, « L'hydrogène change d'échelle », Actu-Environnement, 2022.
- [33] World Bank Group, *The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future*. World Bank, Washington, DC, 2017. doi: 10.1596/28312.
- [34] D. Bloch, G. Lefebvre, et J.-P. Hauet, « Les matériaux pour batteries Li-ion : faut-il s'inquiéter ? », EdEnmag, 8, 2019.
- [35] « Ressources minérales : les terres rares », BRGM, 2021.
- [36] « Stratégie Nationale Bas Carbone sous contrainte de ressources », INEC, Capgemini, 2022.
- [37] P. Saint-Aubin, « La Dépendance aux métaux stratégiques : quelles solutions pour l'économie ? », CESE, 2019.
- [38] « Hydrogen: A renewable energy perspective », IRENA, 2019.
- [39] « Futurs énergétiques 2050 », RTE, 2022.
- [40] F. C. Campbell, *Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials*. Elsevier, 2006. doi: 10.1016/B978-1-85617-495-4.X5000-8.
- [41] W. Jemioło, « Life cycle assessment of current and future passenger air transport in Switzerland », University of Nordland, Bodø, Norway, 2015.
- [42] J. Vasco de Oliveira, « Life Cycle Assessment of the Airbus A330-200 Aircraft », Universidade Técnica de Lisboa, Lisbonne, Portugal, 2010.
- [43] S. Howe, « Environmental impact assessment and optimisation of commercial aviation », Cranfield University, Cranfield, UK, 2011.
- [44] D. Monfort *et al.*, « Inventaires des besoins en matière, énergie, eau et sols des technologies de la transition énergétique - Projet SURFER », ADEME, 2020.
- [45] « Schéma décennal de développement du réseau », RTE, 2019.
- [46] Hart, D *et al.*, « Scenarios for deployment of hydrogen in contributing to meeting carbon budgets and the 2050 target », E4Tech, 2015.
- [47] G. Zhao *et al.*, « Life cycle assessment of H2O electrolysis technologies », *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, n° 43, p. 23765-23781, sept. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.05.282.
- [48] P. Bihouix et B. de Guillebon, *Quel futur pour les métaux ? Raréfaction des métaux : un nouveau défi pour la société*, EDP Sciences. 2010.
- [49] « Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020) Final Report », European Commission, 2020.
- [50] « Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study, 2020 », European Commission, 2020.

- [51] « Study on data for a raw material system analysis: Roadmap and test of the fully operational MSA for raw Materials », BIO by Deloitte, 2015.
- [52] « Study on the review of the list of critical raw materials », European Commission, 2017.
- [53] B. Barreau, G. Hossie, et S. Lutfalla, « Approvisionnements en métaux critiques : un enjeu pour la compétitivité des industries française et européenne ? », Commissariat général à la stratégie et à la prospective, La Note d'analyse n°03, 2013.
- [54] R. Danino-Perraud, « La criticité des matières premières stratégiques pour l'industrie de défense », IRSEM, Etude N°72, 2019.
- [55] « Methodology for establishing the EU list of critical raw materials », European Commission, 2017.
- [56] B. Goffé, P. Christmann, et O. Vidal, « La recherche pour l'utilisation durable des ressources minérales », Géosciences, BRGM, 2012.
- [57] L. S. Lauri, P. Eilu, T. Brown, G. Gunn, P. Kalvig, et H. Sievers, « SCRREEN - D3.1 - Identification and quantification of primary CRM resources in Europe », 2020.
- [58] L. J. Sonter, M. C. Dade, J. E. M. Watson, et R. K. Valenta, « Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity », *Nat Commun*, vol. 11, n° 1, p. 4174, déc. 2020, doi: 10.1038/s41467-020-17928-5.
- [59] European Commission. Joint Research Centre., *Material flow analysis of aluminium, copper, and iron in the EU-28*. LU: Publications Office, 2018. Consulté le: 22 juin 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/1079>
- [60] F. Fizaine, « Les métaux rares: opportunité ou menace ? enjeux et perspectives associés à la transition énergétique », Éditions Technip, Paris, 2021.
- [61] European Commission. Joint Research Centre., *Towards recycling indicators based on EU flows and raw materials system analysis data: supporting the EU 28 raw materials and circular economy policies through RMIS*. LU: Publications Office, 2018. Consulté le: 22 juin 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/092885>
- [62] « Mineral commodity summaries 2022 », USGS, 2022.
- [63] E. van der Voet, R. Salminen, M. Eckelman, G. Mudd, T. Norgate, et R. Hischier, « Environmental risks and challenges of anthropogenic metals flows and cycles - A report of the working group on the global metal flows to the International Resource Panel », UNEP, 2013.
- [64] H. Sievers et L. Tercero Espinoza, « POLINARES Consortium - European dependence on and concentration tendencies of the material production », European Commission, 2012.
- [65] M. Samouhos *et al.*, « SCRREEN - D6.4 - Roadmap and innovation pathways for technology development in CRMs value chains to unlock primary and secondary unexploited resources and introduce substitution solutions in industry », NTUA, VTT, CEA, SWERIM, 2020.
- [66] J. Huisman *et al.*, « Prospecting secondary raw materials in the urban mine and mining wastes (ProSUM) - Final Report », 2017.
- [67] S. Downes *et al.*, « Prospecting secondary raw materials in the urban mine and mining wastes (ProSUM) - Recommendations Report », 2017.
- [68] A. Geldron, « Métaux stratégiques : la mine urbaine française », *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, vol. N° 82, n° 2, p. 67-73, avr. 2016, doi: 10.3917/re1.082.0067.
- [69] R. Danino-Perraud, « La mine urbaine, une ressource stratégique pour l'Union européenne ? », *Revue internationale et stratégique*, vol. N° 113, n° 1, p. 199, 2019, doi: 10.3917/ris.113.0199.
- [70] G. A. Blengini, F. Mathieux, L. Mancini, M. Nyberg, et H. M. Viegas, « Recovery of critical and other raw materials from mining waste and landfills: state of play on existing practices », European Commission, Luxembourg, 2019.

- [71] J.-F. Labbé, « Les limites physiques de la contribution du recyclage à l’approvisionnement en métaux: », *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, vol. N° 82, n° 2, p. 45-56, avr. 2016, doi: 10.3917/re1.082.0045.
- [72] C. Hagelüken et C. E. M. Meskers, « Complex Life Cycles of Precious and Special Metals », in *Linkages of Sustainability*, T. E. Graedel et E. van der Voet, Éd. The MIT Press, 2009, p. 163-197. doi: 10.7551/mitpress/9780262013581.003.0010.
- [73] B. Mezei et N. Boros, « Raw material usage and waste recycling challenges in aircraft industry », *IRASE*, vol. 7, n° 2, p. 121-128, déc. 2016, doi: 10.1556/1848.2016.7.2.8.
- [74] D. Raabe, C. C. Tasan, et E. A. Olivetti, « Strategies for improving the sustainability of structural metals », *Nature*, vol. 575, n° 7781, p. 64-74, nov. 2019, doi: 10.1038/s41586-019-1702-5.
- [75] S. P. Michaux, « Assessment of the extra capacity required of alternative energy electrical power systems to completely replace fossil fuels », GTK, 2021.
- [76] L. Gregoir et K. van Acker, « Metals for clean energy: Pathways to solving Europe’s raw materials challenge », KU Leuven, 2022.
- [77] L. A. Tercero Espinoza, L. Loibl, S. Langkau, A. de Koning, E. van der Voet, et S. Michaux, « SCRREEN - D2.3 - Report on the future use of critical raw materials », Fraunhofer ISI, Leiden University, GTK, 2020.
- [78] I. Duhamel-Achin, « Le secteur minier en pleine évolution pour faire face à la demande actuelle et aux enjeux de demain », présenté à Séminaire thématique LIED UMR 8236, « Matériaux pour l’énergie géopolitique », Université Paris Diderot, 11 février 2020.
- [79] T. Brown, G. Gunn, H. Sievers, M. Liedtke, D. Huy, et D. Homberg, « SCRREEN - D3.3 - Challenges of locating, mining and extracting CRM resources », BGS, BGR, 2020.
- [80] N. T. Nassar, G. W. Lederer, J. L. Brainard, A. J. Padilla, et J. D. Lessard, « Rock-to-Metal Ratio: A Foundational Metric for Understanding Mine Wastes », *Environ. Sci. Technol.*, vol. 56, n° 10, p. 6710-6721, mai 2022, doi: 10.1021/acs.est.1c07875.
- [81] A. H. Epstein et S. M. O’Flarity, « Considerations for Reducing Aviation’s CO2 with Aircraft Electric Propulsion », *Journal of Propulsion and Power*, vol. 35, n° 3, p. 572-582, mai 2019, doi: 10.2514/1.B37015.
- [82] C. A. Louis, C. Bouvet, et G. Martin, « Climat : Pouvons-nous (encore) prendre l’avion ? - Analyse et modélisation de l’impact climatique du transport aérien actuel et à venir en France », BL Evolution, 2020.
- [83] « Crise(s), climat : préparer l’avenir de l’aviation », The Shift Project, 2020.
- [84] « L’industrie ouvre ses portes à la nature », Techniques de l’Ingénieur, 2020.
- [85] M. Leguérinel, G. Lefebvre, et P. Christmann, « Compétition entre secteurs industriels pour l’accès aux matières premières », présenté à Séminaire COMES, 30 novembre 2018.
- [86] C. Dijkema, *Ressources naturelles stratégiques, fossiles et minières. Publié dans « Géographie des conflits non armés »*. Paris: Ellipses, 2011.
- [87] « Résilience des matières premières critiques : la voie à suivre pour un renforcement de la sécurité et de la durabilité », European Commission, Communication de la Commission au Parlement Européen, au Conseil, au Comité Economique et Social Européen et au Comité des Régions COM(2020) 474 final, 2020.
- [88] « Global material resources outlook to 2060: Economic drivers and environmental consequences », OECD, 2019.
- [89] C. Apaza, « La pertinence des « indicateurs mondiaux de la gouvernance » : un débat scientifique en cours », *Revue française d’administration publique*, vol. 127, n° 3, p. 591, 2008, doi: 10.3917/rfap.127.0591.
- [90] K. Bru, P. Christmann, J.-F. Labbé, et G. Lefebvre, « Panorama 2014 du marché des Terres Rares », BRGM, BRGM/RP-65330-FR, 2015.

Annexe A : Construction des scénarios de décarbonation du trafic aérien établis par le CORAC

Pour construire ses scénarios de décarbonation, le CORAC s'est appuyé sur différentes hypothèses qui sont synthétisées ci-dessous [1]. Ces scénarios sont au nombre de deux et se projettent jusqu'à l'horizon 2050. Ils diffèrent par la vitesse de pénétration de l'avion à hydrogène dans la flotte d'appareils mondiale.

La première étape a consisté à définir les technologies futures qui seront utilisées en fonction des types d'appareils :

- Le recours aux batteries, éventuellement aux piles à combustible, ne sera possible que pour les petits appareils, sur de courtes distances, pour des raisons de rapport poids / puissance. Le CORAC privilégie plutôt des solutions hybrides-électriques pour lesquelles le moteur électrique ne serait soit qu'un à-point de puissance utilisé lors du décollage, soit remplacerait la turbomachine lors des phases de roulage ;
- Pour les courts et moyens courriers, le développement d'une configuration d'appareils ultra-sobres devrait débuter vers 2025. L'objectif est ici d'atteindre un gain de 30% par rapport à la génération d'aéronefs actuelle, en combinant aux progrès de motorisation (moteurs à très grands taux de dilution, fans lents de très grand diamètre, moteurs à cycle optimisé ...) ⁸ des améliorations de l'aérodynamique des appareils et une réduction de leur masse. Sur cette base, deux scénarios sont examinés en parallèle avec une prise de décision vers 2025 pour le choix du futur SMR européen : (i) soit par l'incorporation de 100% de bio- ou électro-carburants, (ii) soit en choisissant l'option hydrogène. Dans ce dernier cas, il est envisagé une configuration d'avion « en rupture » (à hydrogène liquide cryogénique) ⁹ avec une entrée en service vers 2035, mais dont la faisabilité technologique n'a pas encore été complètement démontrée ;
- Pour l'aviation régionale, comme pour l'avion SMR la feuille de route porte simultanément sur l'ultra-sobriété (-20% en consommation unitaire) et sur une entrée en service d'un avion hydrogène vers 2035 ;
- Pour les longs courriers, la stratégie actuelle consiste à développer un avion ultra-sobre (technologies similaires à celles développées pour le SMR) et à promouvoir l'incorporation de carburants alternatifs durables (bio- et électro-carburants). Pour les longs courriers, l'hydrogène n'est pas envisagé pour des raisons d'encombrement des réservoirs qui seraient nécessaires afin de pouvoir assurer des vols

⁸ Safran a annoncé en juin 2021 le lancement du programme CFM RISE (Revolutionary Innovation for Sustainable Engines) ayant pour objectif une réduction de plus de 20 % de la consommation unitaire des moteurs.

⁹ Airbus travaille sur le programme ZEROe avec trois configurations (<https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe>): un SMR à turbo fan utilisant un moteur ultra-sobre, un régional à turbopropulseurs (100 passagers, rayon d'action 1800 km), une configuration « aile volante » SMR (environ 200 passagers) plus révolutionnaire mais qui aurait la capacité d'atteindre un rayon d'action plus important.

longs courriers, même si des travaux de recherche sont menés afin de voir si cette limitation pourrait être levée à terme.

Le calcul des émissions sur la période 2019-2050 est effectué sur une flotte simplifiée, *via* la création de quatre à six catégories d'avions du régional au long courrier pour tenir compte de certaines particularités régionales dans la composition des flottes d'appareils. On tient compte notamment des différentes générations d'appareils selon leur date d'entrée en service. Cette flotte évolue ensuite en fonction du renouvellement et de la croissance du trafic. Pour chaque catégorie, le nombre d'appareils, de vols annuels et la distance moyenne parcourue sont initialement déterminés pour l'année 2018, considérée comme année de référence, à partir de la base de données du trafic aérien mondial de l'ATAG (*Air Transport Action Group*, http://aviationbenefits.org/media/167187/w2050_full.pdf). Par la suite, la flotte évolue en fonction du renouvellement et de la croissance du trafic. Les calculs d'émissions de CO₂ sont effectués en tenant compte des émissions sur l'ensemble du cycle de vie des carburants (combustion mais aussi extraction, raffinage et transport des carburants, ou leur fabrication dans le cas de carburants de synthèse). En revanche, ils ne prennent pas en compte la fabrication des flottes d'avions, l'extraction des ressources nécessaires, ni même le démantèlement / recyclage des avions en fin de vie.

Concernant les hypothèses d'évolution du trafic aérien, suite à la pandémie de la Covid 19, il a été supposé un retour du trafic au niveau de 2019 vers 2024-2025. Au-delà, une croissance du trafic de 3,5% par an jusqu'en 2050 a été considérée. Il s'agit d'une croissance moyenne par rapport à celle considérée dans d'autres études [2], [9], [10].

Pour la prise en compte du renouvellement des appareils en fonction de leur âge, il a été considéré une durée de vie en service moyenne de 20 ans. Lorsqu'un avion de la flotte atteint cet âge limite, il disparaît l'année suivante et réapparaît dans la catégorie des avions âgés de 0 à 1 an mais en tenant compte des nouvelles performances de l'appareil en termes de consommation de carburants. Cet âge de mise à la retraite est au final un peu plus faible que l'âge réel moyen de mise à la retraite des aéronefs, qui se situe plutôt autour de 24 ans (données IATA, *International Air Transport Association*), les avions de passagers ayant souvent une seconde vie en tant qu'avions cargos. Du point de vue de la consommation de carburants, raccourcir la durée de vie des aéronefs est une bonne idée pour permettre une pénétration plus rapide des avions de nouvelle génération plus frugaux. Néanmoins, pour éviter des effets contreproductifs en termes de consommation de ressources et d'émissions de CO₂ associées à la fabrication des appareils, cela doit s'accompagner du développement d'une filière de recyclage des matériaux aéronautiques performante comme cela a été évoqué dans cette étude.

Concernant les gains pouvant être espérés d'une amélioration des opérations au sol et en vol, ils sont difficiles à évaluer car fortement dépendants des procédures en vigueur pour le contrôle aérien dans chaque pays. Par défaut, les hypothèses d'amélioration des opérations retenues sont proches de celles proposées par l'OACI, soit 0,5 % par an en moyenne.

Les évolutions technologiques sont quant à elles introduites selon deux scénarios qui diffèrent principalement par la date de mise en service d'un SMR fonctionnant à l'hydrogène :

- Le scénario S1 prévoit l'arrivée d'un nouvel avion régional en 2035, 20% plus efficient que le représentant le plus performant de la génération actuelle. Dans la catégorie des SMR, un nouvel avion ultra-sobre utilisant un mix kérosène / carburants alternatifs doit entrer en service en 2033, avec un gain en consommation de 30% vis-à-vis de la génération précédente équivalente. De plus, une nouvelle génération de longs courriers doit entrer en service en 2037, présentant des performances 20% supérieures à la précédente, alimentée par le même mix kérosène / carburants alternatifs. Enfin, un SMR à hydrogène doit entrer en service en 2045 dans ce scénario ;
- Le scénario S2 prévoit quant à lui l'arrivée d'un SMR ultra-sobre, fonctionnant à l'hydrogène, en 2035. Les évolutions des autres catégories demeurent les mêmes que dans le scénario S1.

Pour comparaison, un scénario virtuel nommé « Technologie 2018 » est proposé pour référence. Il part du principe qu'il n'y a aucune amélioration des performances énergétiques des futurs aéronefs par rapport aux technologies de 2018. Il n'y a donc pas de gains de consommation de carburants une fois que tous les avions mis en service antérieurement à 2018 ont été mis à la retraite. Il s'agit d'un scénario purement contrefactuel, destiné à mesurer l'impact de la recherche technologique.

Concernant l'incorporation des bio- et électro-carburants, les hypothèses faites sont ambitieuses car du point de vue technologique leur utilisation ne nécessite aucun changement de configuration des aéronefs même avec un taux d'incorporation de 100%, contrairement à l'hydrogène. Le choix a donc été fait d'un schéma de substitution supposant l'abandon complet des carburants fossiles pour l'aviation en 2050. En parallèle du taux d'incorporation, le bénéfice en carbone des carburants non fossiles doit être pensé en termes de baisses des émissions de CO₂ par rapport au kérosène sur l'ensemble du cycle de vie. Actuellement (technologie 2018 de référence), ce gain est estimé à 70% mais il est possible de tabler sur une amélioration progressive de ce taux de réduction jusqu'à 80% en 2050, grâce à l'amélioration des rendements des procédés et à l'utilisation d'énergies décarbonées. Néanmoins, une incorporation aussi massive de carburants alternatifs est discutée par d'autres scénarios [83], car elle repose sur un usage prioritaire de ces carburants pour le secteur aérien, ce qui n'est pas forcément acquis, surtout en regard du caractère local de la biomasse utilisée pour les bio-carburants pouvant entraîner des tensions sur les usages.

Le Tableau 20, issu de [1], synthétise l'ensemble des hypothèses des deux scénarios considérés. Il s'appuie sur différents schémas de substitution du kérosène par les carburants alternatifs qui sont illustrés Figure 16.

	Technologie 2018 (référence)	Scénario S1	Scénario S2
Fréquence de renouvellement des avions	20 ans		
Croissance du trafic	+3,5% par an à partir de 2024 (soit +3% par an lissés sur 2018-2050 en tenant compte de « l'effet Covid 19 »)		
Hydrogène	Sans Objet	Régional 2035 SMR 2045 avec H ₂ (réduction CO ₂ de 95%)	Régional 2035 SMR 2035 avec H ₂ (réduction CO ₂ de 95%)
Carburants alternatifs (hors hydrogène)	Pas d'incorporation	Selon Figure 16 (partie gauche) Bio-carburants : réduction CO ₂ progressive de 70 à 80% Electro-carburants : réduction CO ₂ progressive de 90 à 95%	
Technologies : gain vs. génération précédente et date d'entrée en service sur différents segments	Pas d'amélioration	Régional -20% en 2035 SMR -30% en 2033 H ₂ en 2045 Long courrier -20% en 2037	Régional -20% en 2035 SMR -30% en 2035 avec H ₂ Long courrier -20% en 2037
Opérations	Pas d'amélioration	Gain CO ₂ en progression constante de 0,5% par an jusqu'en 2050	

Tableau 20: Hypothèses retenues par le CORAC pour les scénarios de décarbonation du trafic aérien [1].

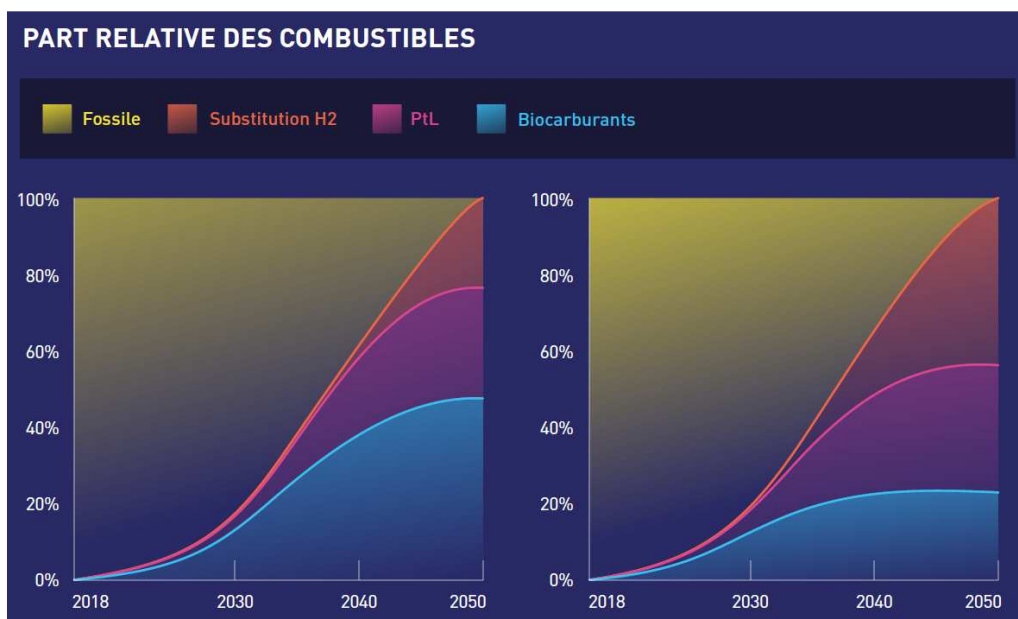


Figure 16 : Schémas de substitution du kérosène par les carburants alternatifs décarbonés, bio-carburants, électro-carburants (PtL) et hydrogène. Schéma de gauche dans le cas du scénario S1 et schéma de droite dans le cas du scénario S2 [1].

Annexe B : Tableau périodique des éléments

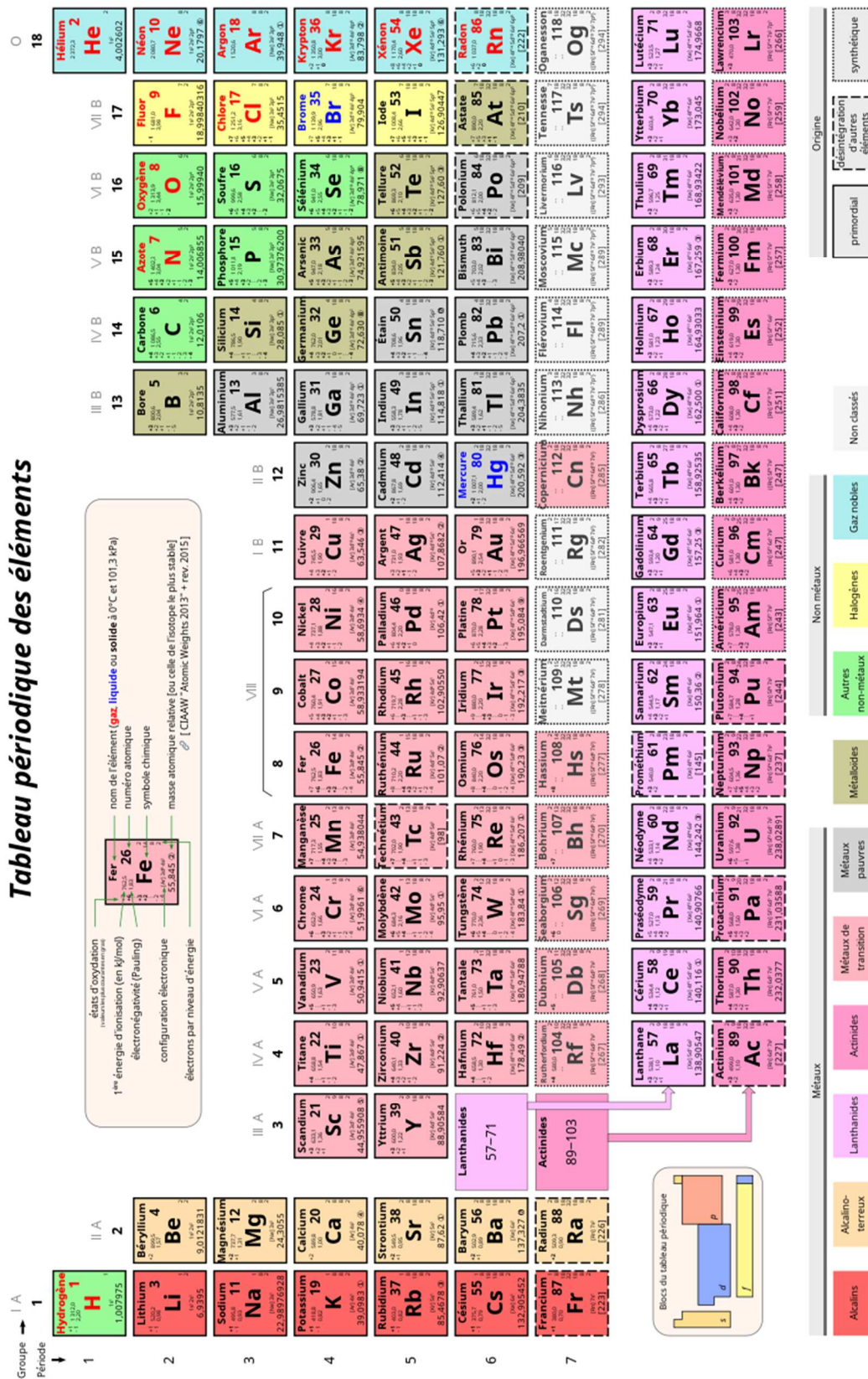


Figure 17 : Classification périodique des éléments.

Avec le scandium et l'yttrium, les lanthanides composent la famille dite des terres rares (*Rare-Earth Elements*, REE). Elles ont été nommées ainsi car lors de leur découverte récente (19^{ème} siècle) on a d'abord pensé qu'elles étaient peu répandues sur Terre. Ce n'est finalement pas le cas mais leurs très bonnes propriétés électro-magnétiques les rendent indispensables aujourd'hui pour de nombreuses technologies électroniques et numériques. Ces éléments présentent aussi des propriétés physico-chimiques relativement proches qui autorisent de possibles substitutions entre eux.

Il existe aussi un autre groupe d'éléments qui présentent une certaine interchangeabilité, c'est celui dit des platinoïdes (*Platinum Group Metals*, PGM). Il comprend le platine, le palladium, le ruthénium, le rhodium, l'osmium et l'iridium.

Annexe C : Alliages aéronautiques et méthodologie de définition de compositions modèles

L'objet de cette annexe est de préciser la méthodologie utilisée pour la définition d'une composition modèle pour chaque grande famille d'alliages utilisés dans les avions. En effet, lorsque l'on parle alliages aéronautiques, dans la réalité ce sont différentes nuances d'alliages qui sont utilisées en fonction des zones considérées. Même si le métal de base est le même, la composition d'une nuance à une autre change en termes d'éléments d'alliage et de teneurs de ces éléments en fonction des propriétés thermo-mécaniques recherchées [40]. Le but d'établir des compositions modèles est, d'un point de vue proportions massiques, de rendre compte de l'empreinte matières des alliages aéronautiques et de leur variété.

Par exemple, dans le cas des alliages d'aluminium, ceux majoritairement utilisés dans l'aéronautique sont ceux des séries 2XXX et 7XXX, ainsi que quelques-uns des séries 6XXX et 8XXX. Ces alliages présentent une très bonne résistance à la rupture rapportée à leur masse volumique, comparés aux alliages de titane ou aux aciers (base fer) qui sont plus lourds. Les alliages des séries 2XXX et 7XXX présentent aussi la particularité d'avoir une bonne tenue mécanique en température et d'être soudables, ainsi que de résister à la corrosion dans le cas des 7XXX. De plus, dans l'optique d'un éventuel développement de l'avion à hydrogène liquide [31], les alliages d'aluminium, en particulier ceux de la série 2XXX, voient leur tenue mécanique à très basses températures s'améliorer sans perte significative de ductilité (*i.e.* caractère d'un matériau à pouvoir se déformer plastiquement sans rompre).

Il en est de même dans le cas des aciers qui sont généralement des aciers *maraging* ou à haute résistance sélectionnés pour leurs propriétés mécaniques élevées, y compris en température, et leur résistance à la corrosion. Concernant les alliages de titane (Ti-6-4 majoritairement), ils sont principalement utilisés dans des parties froides de la structure, soumises à des chargements mécaniques très sévères (jonctions entre le fuselage et les ailes, trains d'atterrissage, parties froides des moteurs). Les superalliages base nickel (Inconel 718 très majoritairement, 70-75% [21]) et base cobalt sont quant à eux utilisés dans les parties les plus chaudes des turbomachines (parois des chambres de combustion, disques et aubes de turbines).

Alliages d'aluminium

Le Tableau 21 liste les différents alliages d'aluminium utilisés dans l'industrie aéronautique. Compte tenu de la variété de ces alliages, pour définir une composition modèle nous avons décidé de retenir quatre alliages de la série 2XXX (les 2014, 2024, 2091 et 2519) et quatre de la série 7XXX (les 7049, 7055, 7079 et 7178). Nous avons ensuite calculé des teneurs moyennes pour chaque élément d'alliage sur la base d'une moyenne arithmétique. Le choix des huit alliages s'est effectué en panachant les teneurs en éléments d'alliage les plus fortes (ici le zinc, le manganèse et le cuivre), et en écartant les alliages perçus comme plus exotiques afin de ne pas donner trop de poids à certains éléments utilisés en très petites quantités (par exemple l'alliage 2020 est le seul à contenir du cadmium). La composition résultante est fournie dans le Tableau 22. Les teneurs en éléments d'alliage sont exprimées en % et le complément à 100% est l'aluminium lui-même, elles sont arrondies à la décimale près.

<i>Alloy</i>	<i>Zn</i>	<i>Mg</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Zr</i>	<i>Fe</i>	<i>Si</i>	<i>Li</i>	<i>O</i>	<i>Other</i>
1420@	–	5.2	–	–	–	0.1	–	–	2.0	–	–
2004	–	–	6.0	–	–	0.4	–	–	–	–	–
2014	–	0.5	4.4	0.8	–	–	0.7*	0.8	–	–	–
2017	–	0.6	4.0	0.7	–	–	0.7*	0.5	–	–	–
2020	–	–	4.5	0.55	–	–	0.4*	0.4*	1.3	–	0.25 Cd
2024	–	1.5	4.4	0.6	–	–	0.5*	0.5*	–	–	–
X2080	1.85	3.7	–	–	0.2	0.20*	0.10*	–	0.2	–	–
2090	–	–	2.7	–	–	0.1	0.12*	0.10*	2.2	–	–
2091	–	1.5	2.1	–	–	0.1	0.30*	0.20*	2.0	–	–
X2095	0.25*	0.4	4.2	–	–	0.1	0.15*	0.12*	1.3	–	0.4 Ag
2219	–	–	6.3	0.3	–	0.2	0.3*	0.2*	–	–	0.1 V
2224	–	1.5	4.1	0.6	–	–	0.15*	0.12*	–	–	–
2324	–	1.5	4.1	0.6	–	–	0.12*	0.10*	–	–	–
2519	–	0.2	5.8	–	–	0.2	0.3*	0.2*	–	–	0.1 V
6013	–	1.0	0.8	0.35	–	–	0.30*	0.8	–	–	–
6113	–	1.0	0.8	0.35	–	–	0.30*	0.8	–	0.2	–
7010	6.2	2.35	1.7	–	–	0.1	0.15*	0.12*	–	–	–
7049	7.7	2.45	1.6	–	0.15	–	0.35*	0.25*	–	–	–
7050	6.2	2.25	2.3	–	–	0.1	0.15*	0.12*	–	–	–
7055	8.0	2.05	2.3	–	–	0.1	0.15*	0.1*	–	–	–
7075	5.6	2.5	1.6	–	0.23	–	0.4*	0.4*	–	–	–
7079	4.3	3.2	0.6	0.2	0.15	–	0.4*	0.3*	–	–	–
X7093	9.0	2.5	1.5	–	–	0.1	0.15*	0.12*	–	0.2	–
7150	6.4	2.35	2.2	–	–	0.1	0.15*	0.12*	–	–	–
7178	6.8	2.8	2.0	–	0.23	–	0.5*	0.4*	–	–	–
7475	5.7	2.25	1.6	–	0.21	–	0.12*	0.10*	–	–	–
8009	–	–	–	–	–	–	8.65	1.8	–	0.30*	1.3 V
X8019	–	–	–	–	–	–	8.3	0.2*	–	0.2	4.0 Ce
8090	–	0.9	1.3	–	–	0.1	0.30*	0.20*	2.4	–	–

* Maximum.

Most ingot metallurgy aluminum alloys contain about 0.05–0.1% Ti to refine the ingot grain size.

@ Not an Aluminum Association Designation.

Tableau 21 : Compositions des différents alliages d'aluminium utilisés dans l'aéronautique [40].

	Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Zr	Fe	Si	Li	V
Alliage d'aluminium modèle	3,3	1,8	2,9	0,2	0,1	0,1	0,4	0,3	0,2	0,1

Tableau 22 : Composition de l'alliage d'aluminium modèle.

Aciers pour l'aéronautique

Pour définir la composition modèle d'un acier aéronautique, nous avons procédé comme précédemment pour les alliages d'aluminium en sélectionnant six nuances parmi celles listées dans le Tableau 23 (aciers AF1410, 18Ni(250), 18Ni(350), PH 14-8Mo, 15-5Ph et Custom 465). En revanche, compte tenu des très faibles teneurs en carbone de ces aciers, ce qui est généralement souhaité afin de minimiser les défauts microstructuraux pouvant entraîner une chute des propriétés mécaniques, nous avons négligé cet élément dans notre composition idéale. Cette composition est fournie dans le Tableau 24. Les teneurs sont exprimées en % et le complément à 100% est le fer lui-même, elles sont arrondies à la décimale près.

<i>Alloy</i>	<i>C</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>Ni</i>	<i>Other</i>
Medium Carbon Low Alloy Steels					
4130	0.28–0.33	0.80–1.10	0.15–0.25	–	0.40–0.60 Mn, 0.20–0.35 Si
4140	0.38–0.43	0.80–1.10	0.15–0.25	–	0.75–1.00 Mn, 0.20–0.35 Si
4340	0.38–0.43	0.70–0.90	0.20–0.30	1.65–2.00	0.60–0.80 Mn, 0.20–0.35 Si
300M	0.40–0.46	0.70–0.95	0.30–0.45	1.65–2.00	0.65–0.90 Mn, 1.45–1.80 Si, 0.05 min V
High Fracture Toughness Steels					
AF1410	0.13–0.17	1.80–2.20	0.90–1.10	9.50–10.50	0.10 max Mn, 0.10 max Si, 13.50–14.50 Co
AerMet 100	0.23	3.1	1.2	11.1	13.4 Co
HP 9-4-30	0.29–0.34	0.90–1.10	0.90–1.0	7.0–8.0	0.10–0.35 Mn, 0.20 max Si, 4.25–4.75 Co, 0.06–0.12 V
Maraging Steels					
18Ni(200)	0.03 max	–	3.3	18	8.5 Co, 0.2 Ti, 0.1 Al
18Ni(250)	0.03 max	–	5.0	18	8.5 Co, 0.4 Ti, 0.1 Al
18Ni(300)	0.03 max	–	5.0	18	9.0 Co, 0.7 Ti, 0.1 Al
18Ni(350)	0.03 max	–	4.2	18	12.5 Co, 1.6 Ti, 0.1 Al
Semiaustenitic Precipitation Hardening Stainless Steels					
17-7PH	0.09	16.0–18.0	–	6.50–7.75	1.0 Mn, 1.0 Si, 0.75–1.50 Al
PH 15-7Mo	0.09	14.0–16.0	2.0–3.0	6.50–7.75	1.0 Mn, 1.0 Si, 0.75–1.50 Al
PH 14-8Mo	0.05	13.75–15.0	2.0–3.0	7.50–8.75	1.0 Mn, 1.0 Si, 0.75–1.50 Al
AM-350	0.07–0.11	16.0–17.0	2.50–3.25	4.0–5.0	0.50–1.25 Mn, 0.50 Si, 0.07–0.13 N
AM-355	0.10–0.15	15.0–16.0	2.50–3.25	4.0–5.0	0.50–1.25 Mn, 0.50 Si, 0.07–0.13 N
Martensitic Precipitation Hardening Stainless Steels					
17-4PH	0.07	15.0–17.5	–	3.0–5.0	1.0 Mn, 3.0–5.0 Cu, 1.00 Si, 0.15–0.45 Nb
15-5PH	0.07	14.0–15.5	–	3.5–5.5	1.0 Mn, 2.5–4.5 Cu, 1.00 Si, 0.15–0.45 Nb
PH 13-8Mo	0.05	12.3–13.3	2.0–2.5	7.5–8.5	0.10 Mn, 0.90–1.35 Al, 0.10 Si
Custom 450	0.05	14.0–16.0	0.5–1.0	5.0–7.0	1.0 Mn, 1.25–1.75 Cu, 1.00 Si, 8×%C min Nb
Custom 455	0.05	11.0–12.5	0.5	7.5–9.5	0.50 Mn, 1.5–2.5 Cu, 0.50 Si, 0.8–1.4 Ti, 0.1–0.50 Nb
Custom 465	0.02	11.0–12.5	0.75–1.25	10.75–11.25	0.25 Mn, 0.25 Si, 1.50–1.80 Ti

Tableau 23 : Compositions des différents aciers utilisés dans l'aéronautique [40].

	Cr	Mo	Ni	Mn	Si	Al	Cu	Ti	Nb	Co
Acier aéronautique modèle	7,2	2,2	11,6	0,4	0,4	0,2	0,6	0,7	0,1	5,8

Tableau 24 : Composition de l'acier modèle.

Alliages de titane

Pour définir la composition modèle d'un alliage de titane aéronautique, nous avons procédé comme précédemment pour les alliages d'aluminium et les aciers, en sélectionnant quatre nuances parmi celles listées dans le Tableau 25 (les alliages Ti-8-1-1, Ti-6-4, Ti-6-22-22S et Ti-10-2-3). Cette composition est fournie dans le Tableau 26. Les teneurs sont exprimées en % et le complément à 100% est le titane lui-même, elles sont arrondies à la décimale près.

<i>Alloy</i>	<i>Nominal Composition</i>	<i>Condition</i>	<i>UTS (ksi)</i>	<i>YS (ksi)</i>	<i>E (Msi)</i>	<i>Elong. (%)</i>	<i>Reduction in Area (%)</i>
Commercially Pure							
Grade 1	0.03N, 0.20Fe, 0.18O	Annealed	35	25	14.9	30	55
Grade 4	0.05N, 0.50Fe, 0.40O	Annealed	80	70	14.9	20	40
Alpha and Near-Alpha							
Ti-5-2.5	Ti-5Al-2.5Sn	Annealed	115	110	16.0	16	40
Half 6-4	Ti-3Al-2.5V	Annealed	90	75	15.5	20	–
Ti-6242S	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.25Si	Annealed	130	120	16.5	15	35
Ti-8-1-1	Ti-8Al-1Mo-1V	Annealed	130	120	18.0	15	28
Alpha-Beta							
Ti-6-4	Ti-6Al-4V	Annealed	130	120	16.5	14	30
		STA	170	160	16.5	10	25
Ti-6-4 ELI	Ti-6Al-4V	Annealed	120	110	16.5	15	35
Ti-6-6-2	Ti-6Al-6Sn-2V	Annealed	150	145	16.0	14	30
		STA	185	170	16.0	10	20
Ti-6246	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	STA	189	170	16.5	10	23
Ti-6-22-22S	Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0.25Si	Annealed	150	140	17.7	–	–
		STA	185	165	17.7	11	33
Beta							
Ti-10-2-3	Ti-10V-2Fe-3Al	STA	170	160	16.2	10	19
Ti-15-3	Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn	Annealed	114	112	–	22	–
		STA	159	143	–	12	–

Tableau 25 : Compositions des différents alliages de titane utilisés dans l'aéronautique [40].

	Al	V	Mo	Cr	Si	Zr	Sn	Fe
Alliage de titane modèle	5,8	3,8	2,8	0,7	0,3	0,7	0,5	0,5

Tableau 26 : Composition de l'alliage de titane modèle.

Superaliages

Pour définir la composition modèle d'un superalliage, nous avons procédé comme pour les compositions modèles précédentes en sélectionnant quatre nuances parmi celles listées dans le Tableau 27. Cependant, un superalliage supplémentaire non mentionné dans la liste ci-dessous a été pris en compte ; il s'agit du CMSX-4 Plus (<https://cannonmuskegon.com/wp-content/uploads/2018/08/Improved-3rd-Generation-Single-Crystal-Superalloy-CMSX-4%2%AE-Plus-SLS.pdf>). Cette famille de superalliages base Ni monocristallins était initialement utilisée dans les moteurs militaires, mais elle commence à être utilisée dans les moteurs civils. Il a donc semblé opportun de les considérer dans notre approche car l'extension de leur usage à l'aéronautique civil pourrait fortement impacter la demande sur certains des éléments d'alliage qui les composent. Cela pourrait être le cas tout particulièrement pour le rhénium dont environ 80% de la production mondiale est destinée aux superalliages pour turbomachines [48]. Dans les faits, c'est pour l'instant plutôt le CMSX-4, avec une teneur légèrement plus faible en rhénium que celle du CMSX-4 Plus, qui équipe déjà les moteurs vendus. Mais le CMSX-4 Plus commence à le remplacer ; sa composition est fournie dans le Tableau 28.

Alloy	Composition										
	Cr	Ni	Co	Mo	W	Nb	Ti	Al	Fe	C	Other
Nickel Based											
Solid Solution Hardened											
Hasteloy X	22.0	49.0	<1.5	9.0	0.6	–	–	2.0	15.8	0.15	–
Inconel 625	21.5	61.0	–	9.0	–	3.6	–	0.2	2.5	0.05	–
Nimonic 75	19.5	75.0	–	–	–	–	0.4	0.15	2.5	0.12	<0.25 Cu
Precipitation Hardened											
Astrolloy	15.0	56.5	15.0	5.25	–	–	3.5	4.4	<0.3	0.06	0.03 B, 0.06 Zr
Inconel 100	10.0	60.0	15.0	3.0	–	–	4.7	5.5	<0.6	0.15	1.0 V, 0.06 Zr, 0.015 B
Inconel 706	16.0	41.5	–	–	–	–	1.75	0.2	37.5	<0.08	2.9 (Nb + Ta), <0.15 Cu
Nimonic 95	19.5	53.5	18.0	–	–	–	2.9	2.0	<5.0	<0.15	+B + Zr
René 95	14.0	61.0	8.0	3.5	3.5	3.5	2.5	3.5	<0.3	0.16	0.01 B, 0.5 Zr
Waspaloy	19.5	57.0	13.5	4.3	–	–	3.0	1.4	<2.0	0.07	0.006 B, 0.09 Zr
Iron–Nickel Based											
Solid Solution Hardened											
19-9 DL	19.0	9.0	–	1.25	1.25	0.4	0.3	–	66.8	0.30	1.10 Mn, 0.60 Si
Haynes 556	22.0	21.0	20.0	3.0	2.5	0.1	0.1	0.3	29.0	0.10	0.50 Ta, 0.02 La, 0.002 Zr
Incoloy 802	21.0	32.5	–	–	–	–	–	0.58	44.8	0.36	–
Precipitation Hardened											
A-286	15.0	26.0	–	1.25	–	–	2.0	0.2	55.2	0.04	0.005 B, 0.3 V
Inconel 718	19.0	52.5	–	3.0	–	5.1	0.91	0.5	18.5	<0.08	<0.15 Cu
Incoloy 903	<0.1	38.0	15.0	0.1	–	3.0	1.4	0.7	41.0	0.04	–
Cobalt Based											
Solid Solution Hardened											
Haynes 25 (L605)	20.0	10.0	50.0	–	15.0	–	–	–	3.0	0.10	1.5 Mn
Haynes 188	22.0	22.0	37.0	–	14.5	–	–	–	<3.0	0.10	0.90 La
MP35-N	20.0	35.0	35.0	10.0	–	–	–	–	–	–	–

Tableau 27 : Compositions des différents superalliages utilisés dans l'aéronautique [40].

	Ni	Cr	Co	W	Mo	Ta	Re	Al	Ti	Hf
CMSX-4 Plus	60,45	3,5	10,0	6,0	0,6	8,0	4,8	5,7	0,85	0,1

Tableau 28 : Composition du superalliage CMSX-4 Plus.

Dans le cas particulier des superalliages, pour tenir compte du fait que l'Inconel 718 représente de l'ordre de 70-75% [21] des superalliages utilisés, un poids de huit lui a été affecté afin qu'il représente les 2/3 des quantités utilisées par rapport aux quatre autres superalliages considérés. Comme pour les aciers, le carbone a été négligé, ainsi que le bore et le hafnium qui sont utilisés dans certains alliages mais à des teneurs souvent très faibles, ou qui concernent des alliages majoritairement utilisés dans les moteurs militaires et non civils. La composition modèle résultante est fournie dans le Tableau 29.

	Cr	Ni	Co	Mo	W	Nb	Ti	Al	Fe	Cu	Zr	La	Re	Ta
Superalliage modèle	17,8	51,1	4,7	3,1	2,1	3,7	0,9	1,3	13,9	0,1	0,1	0,1	0,4	0,7

Tableau 29 : Composition du superalliage modèle.

Les teneurs en éléments d'alliage sont exprimées en %. Ces teneurs moyennes sont arrondies à la décimale près et ont été calculées à partir des cinq superalliages Hasteloy X, René 95, Inconel 718, Haynes 188 et CMSX-4 Plus.

Empreintes matières des alliages aéronautiques

Les compositions des différents alliages aéronautiques modèles définis précédemment sont synthétisées dans le Tableau 30 ci-dessous. Elles sont cette fois-ci exprimées en kg de chaque élément par kg d'alliage.

Alliage d'Al modèle	Al	Fe	Ti	Ni	Co	Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Zr	Si
	0,906	0,004	-	-	-	0,033	0,018	0,029	0,002	0,001	0,001	0,003
Acier modèle	Li	V	W	Mo	Sn	Nb	La	Re	Ta			
	0,002	0,001	-	-	-	-	-	-	-			
Alliage de Ti modèle	Al	Fe	Ti	Ni	Co	Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Zr	Si
	0,002	0,708	0,007	0,116	0,058	-	-	0,006	0,004	0,072	-	0,004
Superalliage modèle	Li	V	W	Mo	Sn	Nb	La	Re	Ta			
	-	-	-	0,022	-	0,001	-	-	-			
Alliage de Ti modèle	Al	Fe	Ti	Ni	Co	Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Zr	Si
	0,058	0,005	0,849	-	-	-	-	-	-	0,007	0,007	0,003
Superalliage modèle	Li	V	W	Mo	Sn	Nb	La	Re	Ta			
	-	0,038	-	0,028	0,005	-	-	-	-			
Superalliage modèle	Al	Fe	Ti	Ni	Co	Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Zr	Si
	0,013	0,139	0,009	0,511	0,047	-	-	0,001	-	0,178	0,001	-
Superalliage modèle	Li	V	W	Mo	Sn	Nb	La	Re	Ta			
	-	-	0,021	0,031	-	0,037	0,001	0,004	0,007			

Tableau 30 : Compositions retenues pour les alliages aéronautiques modèles utilisés dans la suite de cette étude. Les teneurs sont exprimées en kg pour 1 kg d'alliage.

A la lecture de ce tableau, on notera d'emblée que, en plus de métaux très couramment utilisés comme l'aluminium et le cuivre, les alliages aéronautiques utilisent un certain nombre de métaux en lien avec l'électrification des modes de vie. C'est le cas du nickel, du lithium, du cobalt, du silicium et du zinc, ou encore du lanthane qui est une terre rare. Même s'ils n'apparaissent pas dans ce tableau car utilisés de façon beaucoup plus marginale, une analyse détaillée des tableaux précédents révèle que l'argent, le cadmium et

une autre terre rare, le cérium, sont aussi utilisés. Des conflits d'usage pourraient donc apparaître dans le contexte de la transition énergétique avec d'autres secteurs industriels, comme l'automobile.

En plus de ces principaux alliages métalliques, certains alliages de magnésium et de béryllium peuvent aussi être utilisés [40], mais dans des quantités négligeables à l'échelle des grandes masses que nous avons cherché à caractériser dans cette étude.

Annexe D : Méthodologie de détermination de l’empreinte matières d’un aéronef

Le contenu de cette annexe présente l’approche qui a été retenue pour déterminer l’empreinte matières d’un aéronef à partir de son bilan de masses. Sont précisées aussi les hypothèses qui ont été faites, en particulier concernant le choix de ne pas considérer les matériaux composites à matrice polymère dans la liste des matériaux et ressources étudiés.

Bilan de masses d’un aéronef

En ce qui concerne les aéronefs, nous avons considéré une vision simplifiée se focalisant sur les différents éléments structuraux et fonctionnels des appareils (Figure 18), que l’on a l’habitude de regrouper en six grands sous-ensembles (Figure 19) : les ailes, le fuselage, les turbomachines (ensemble moteur-nacelle-mât), les trains d’atterrissage (avant et principaux), les stabilisateurs horizontaux, et les stabilisateurs verticaux. Il s’agit d’une décomposition souvent prise comme référence dans les approches d’ACV des aéronefs [21], [41]–[43]. Il s’agit d’une vision structurale qui ne tient pas compte des aménagements et habillages intérieurs des appareils. Ces parties sont principalement constituées de plastiques, mousses et tissus et, si du point de vue ACV il serait nécessaire de les considérer, du point de vue des ressources minérales mobilisées nous avons pris le parti de les négliger.

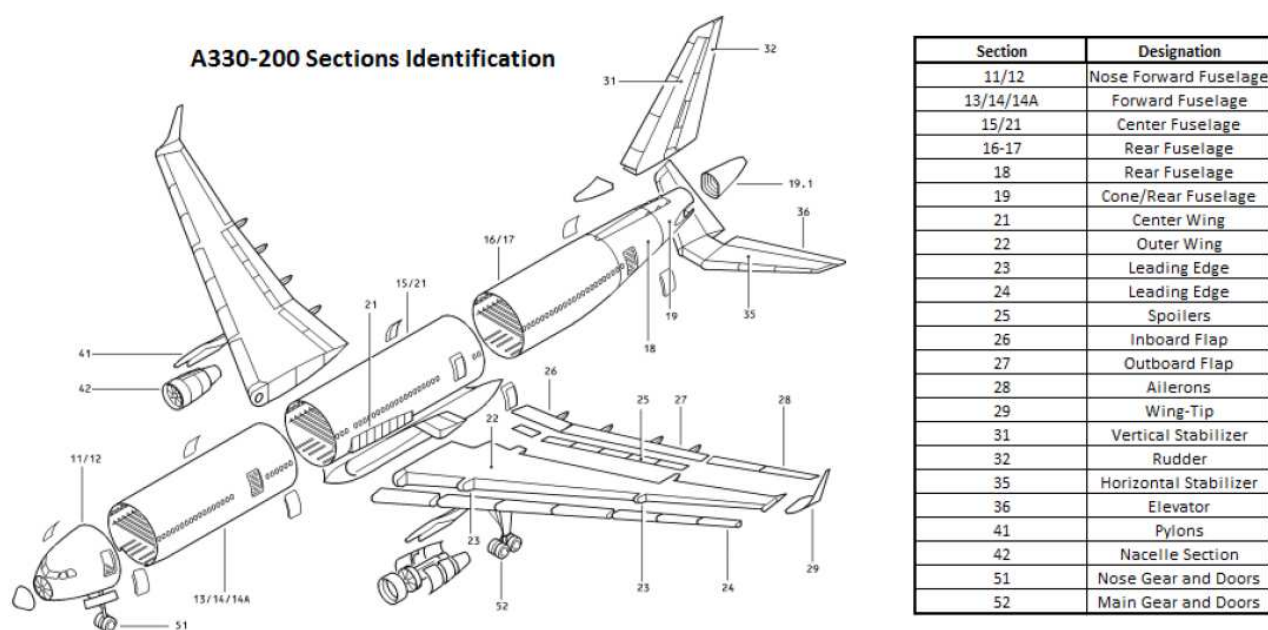


Figure 18 : Vue éclatée d’un aéronef tube and wings classique, ici un Airbus A320 [42].

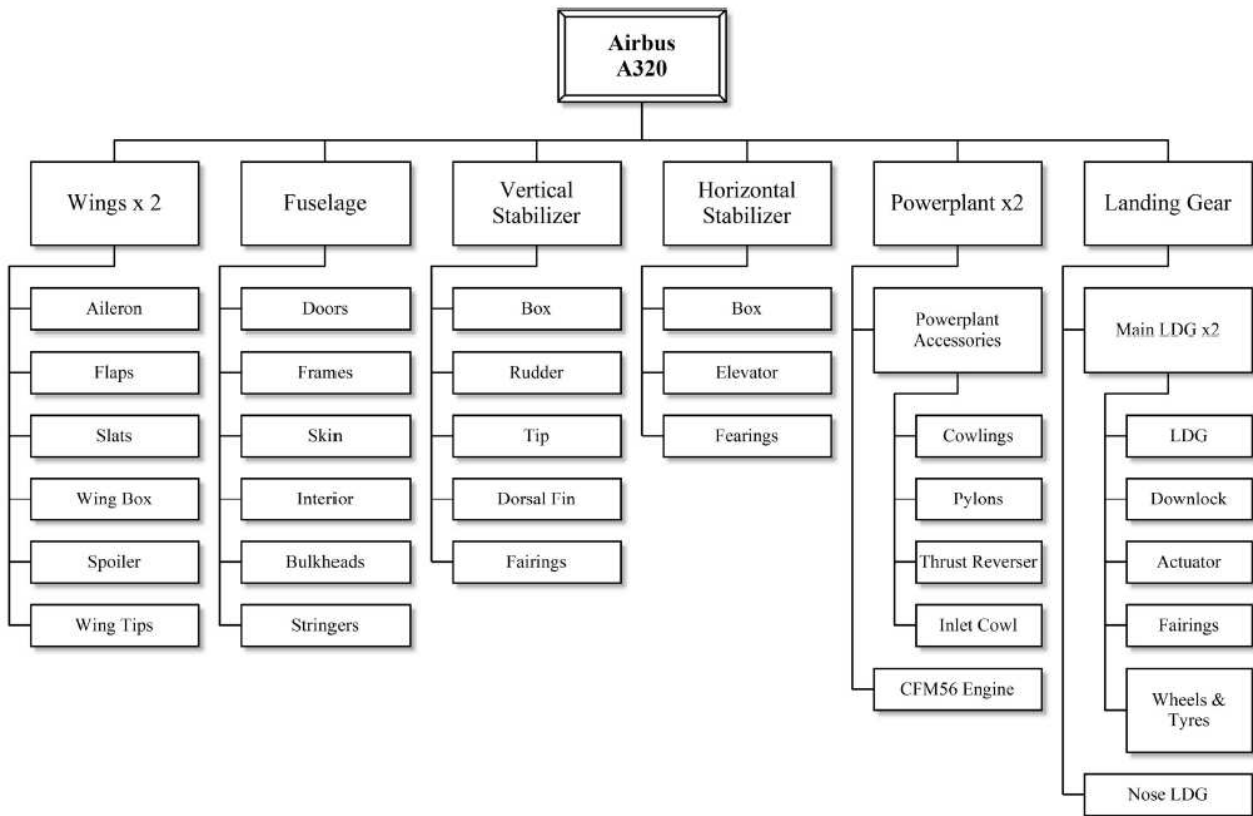


Figure 19 : Grands ensembles structuraux des aéronefs et leurs sous-ensembles, ici un Airbus A320 [43].

La partie avionique est aussi absente des travaux que nous avons pu trouver dans la littérature. Cette partie regroupe l'ensemble des capteurs, calculateurs et équipements électroniques que l'on trouve dans les avions, mais aussi les écrans qui équipent les sièges passagers des avions longs courriers, ainsi que les câblages. Dans les faits, lorsque l'on s'intéresse aux grandes masses des appareils dans l'optique d'optimiser leur configuration, la partie avionique est supposée être répartie de façon diffuse dans toute la structure et est estimée en proportion de la masse de l'appareil. Il est aussi très difficile d'avoir une vue précise des équipements utilisés, et donc des matériaux et ressources qui les composent. Lors d'échanges avec des personnes de chez Thalès et Airbus, il est apparu que les acteurs du domaine commencent tout juste à essayer de lister et quantifier les ressources concernées. Il est aussi ressorti de ces échanges que, sauf à de très rares exceptions, les équipements électroniques utilisés dans les avions (composants et cartes électroniques, écrans, capteurs ...) sont les mêmes que ceux utilisés pour l'ensemble des objets électroniques et informatiques ; la demande aéronautique représente donc une part négligeable à l'échelle de la demande mondiale. Qui plus est, ces équipements mobilisent des ressources très spécifiques [37]. Ces éléments ne faisant pas partie des sous-ensembles structuraux des appareils, et afin de ne pas rallonger la liste des ressources concernées dans notre étude, la décision a été prise de ne pas prendre en compte la partie avionique dans ces travaux.

A partir de la décomposition exposée ci-dessus, il est possible de lister les différentes classes de matériaux utilisés lors de la fabrication d'un aéronef, comme indiqué dans le Tableau 31. Par la suite, en utilisant les compositions modèles définies précédemment dans l'Annexe C (cf. Tableau 30) il est alors possible de

quantifier l’empreinte matières d’un aéronef, c’est-à-dire d’avoir une vue d’ensemble des différentes ressources immobilisées par avion, et dans quelles quantités.

	Alliages d’Al	Aciers	CFRP	Alliages de Ti	Superalliages
Fuselage (kg)	8827	200	823	300	0
Ailes (kg)	10890	500	1097	1240	0
Stabilisateur horizontal (kg)	47	0	1128	0	0
Stabilisateur vertical (kg)	12	0	1163	0	0
Trains d’atterrissage (kg)	177	2949	78	277	0
Moteurs (kg)	772	1730	667	1989	2848
Masse totale par matériau (kg)	20725	5379	4956	3806	2848
Masse totale aéronef (kg)	37714				
% masse aéronef	54,9	14,3	13,1	10,1	7,6

Tableau 31 : Grandes masses des différents matériaux utilisés dans un aéronef, ici un Airbus A320 [21].

Cas particulier des composites à matrice polymère

Dans le cadre de cette étude, il a été décidé de ne pas prendre en compte les composites à matrices polymères dans les calculs d’empreinte matières des aéronefs. Pourtant, ces matériaux (composites à fibres de carbone pour l’essentiel, de verre ou de Kevlar, [40]) sont de plus en plus présents dans les aéronefs de nouvelle génération où ils tendent à remplacer en partie les alliages d’aluminium et les aciers pour des parties du fuselage et de la voilure surtout. Ils représentaient de l’ordre de 10% de la masse des aéronefs mis en service à la fin des années 90 et au début des années 2000 (Tableau 31), contre environ 50% pour la nouvelle génération d’aéronefs qui entre en service [40]–[43] (Figure 20). Cette tendance pourrait se poursuivre pour les aéronefs futurs en raison de très bonnes propriétés mécaniques et d’une masse volumique plus faible que celle des alliages métalliques [21], [26], [40].

Afin de justifier ce choix, nous avons considéré qu’il y aurait une forme de contradiction à étudier d’éventuelles tensions sur les ressources fossiles (sur les hydrocarbures à la base de la pétrochimie et donc des polymères) dans une étude sur des enjeux de décarbonation et de réduction drastique de leur usage. De plus, si on se focalise sur le naphta, qui est le principal sous-produit raffiné issu des hydrocarbures utilisé pour la pétrochimie, en 2021 sa production n’a représenté que 145 millions de barils pour une production mondiale de 2,5 milliards de barils d’huiles et de pétrole brut (<https://www.trafigura.com/products-and-services/oil-and-petroleum-products/>), soit de l’ordre de 5,8% de la production. Dans l’optique d’une décarbonation des énergies, il est donc discutable d’envisager une tension sur la ressource pétrolière du point de vue des matériaux issus de la pétrochimie.

Contrairement aux minéraux, la question pour les matériaux composites si on s’intéresse à leur empreinte environnementale semble surtout être celle de leur éco-conception, là où pour les minéraux peut aussi se poser la question de leur disponibilité à court ou moyens terme. En outre, s’il est vrai que pour l’instant les

matériaux composites se recyclent plutôt mal, en particulier ceux dits thermoplastiques qui sont les plus résistants, des recherches sont menées sur les polymères biosourcés dont les chaînes carbonées dériveraient de la biomasse et non plus des hydrocarbures [84]. De la même manière, dans le cas des composites à renforts fibreux, des travaux sont conduits dans le but de remplacer les fibres industrielles par des fibres naturelles (<https://cimap.ensicaen.fr/spip.php?article166>). Le recyclage des composites issus de la pétrochimie fait lui aussi l'objet de nouveaux développements telle la résine *Elium*® développée par la société ARKEMA (<https://www.arkema.com/global/fr/resources/post/elium-resin-a-disruptive-innovation-in-the-world-of-composites/>). Les enjeux sont d'autant plus importants que l'usage des matériaux composites fibreux est un sujet de controverse important lorsque l'on parle par exemple énergie éolienne.

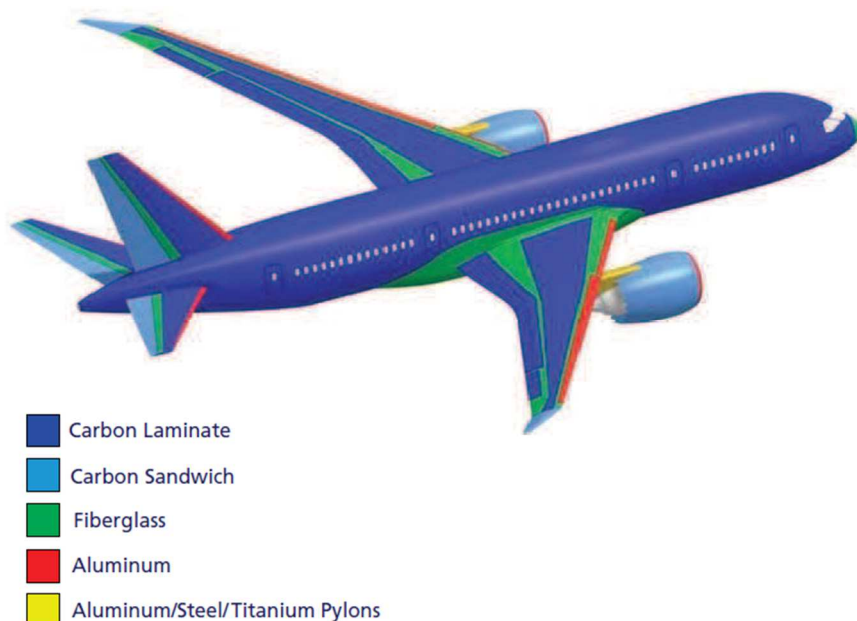


Figure 20 : Répartition des composites à fibres de carbone dans le Boeing 787 Dreamliner [40].

Par ailleurs, si les matériaux composites à matrice polymère dérivent des hydrocarbures, contrairement aux énergies fossiles il faut penser ces matériaux comme des chaînes carbonées immobilisées pendant deux à trois décennies environ dans le cas présent (durée de vie d'un aéronef ou d'une éolienne), voire davantage à terme en cas de développement du recyclage de ces matériaux. En termes d'ACV, les émissions de CO₂ à considérer sont donc celles classiques de tout matériau manufacturé et ne peuvent être assimilées à des émissions directes de combustion de chaînes carbonées comme dans le cas des carburants.

Si la prise en compte des matériaux composites serait indispensable dans l'optique d'une étude d'ACV des aéronefs, dans le cadre de cette mission sur les besoins en ressources minérales associées aux trajectoires de décarbonation du transport aérien, leur principal intérêt est indirect et réside dans le fait que leur utilisation aboutit à une moindre utilisation des ressources minérales liées aux alliages d'aluminium et aux aciers aéronautiques.

Annexe E : Empreintes matières des infrastructures de production, d’acheminement et de stockage d’électricité décarbonée

Cette annexe a pour objet de répertorier les données des empreintes matières (ou intensités matières) des différentes infrastructures des filières de production d’énergie électrique considérées pour la décarbonation des carburants alternatifs aéronautiques, que sont les électro-carburants et l’hydrogène. L’ensemble des données présentées ci-dessous est issu du projet SURFER [44], porté par l’ADEME en collaboration avec le BRGM et le CNRS-ISTerre. L’objet de ce projet était de quantifier les empreintes matières des différentes infrastructures et réseaux impliqués dans la transition énergétique, tant pour la production d’énergie électrique que pour la production d’énergie thermique. Ces travaux, basés sur l’exploitation de très nombreuses données issues de la littérature, présentent donc une base de données très riche en termes d’empreinte matières de différents dispositifs allant de la centrale nucléaire à la chaudière au gaz du particulier en passant par le serveur informatique d’une entreprise. Les contributeurs à ces travaux sont même allés jusqu’à quantifier des empreintes matières des objets finaux tels que la voiture ou le compteur électrique intelligent.

Dans certains des tableaux suivants sont mentionnés différents types d’aciers utilisés dans la construction des infrastructures. Afin de simplifier la quantité de données à traiter, des compositions modèles ont été définies pour ces aciers. Les compositions modèles des différents aciers retenues sont disponibles dans le Tableau 32 ci-dessous.

	% dans les alliages de l’acier											
	Fe	C	Mn	Cu	Ni	Si	Cr	P	S	N	Mo	Zn
Acier de construction (reinforcing steel)	97.568	0.17	1.4	0.55		0.28		0.35	0.35	0.12		
Acier faiblement allié	96.38	0.1	0.5		1		1	0.011	0.010		1	
Acier inoxydable (chromium steel)	70.21	0.12	2		8	1	18	0.04	0.03		0.6	
Acier galvanisé	97.55	0.01	0.3			0.1		0.035				2 ⁵

Tableau 32 : Compositions modèles des aciers de construction utilisées dans le projet SURFER [44].

On notera que pour ces aciers moins haut de gamme que ceux aéronautiques, les teneurs en carbone, azote, phosphore et soufre ont été quantifiées. Par souci de cohérence avec les travaux effectués sur les aciers aéronautiques, nous avons également négligé ces éléments dans les aciers de construction.

Electricité nucléaire

Concernant l’empreinte matières des centrales nucléaires, davantage de précisions à propos de la méthodologie de construction des données récapitulées dans le Tableau 33 sont fournies dans [44]. On précisera juste ici que ces données ont été construites à partir de données de la littérature contenant des informations sur la composition de 25 installations nucléaires différentes, afin de tenir compte des différentes technologies pouvant exister en fonction de la génération des réacteurs, de l’existence ou non d’aéroréfrigérants, ou encore de la taille des installations (des effets d’échelle peuvent en effet exister en termes de consommation des matériaux de construction). Même si nous n’exploitons pas ces données ici, on notera que d’autres matériaux de construction comme les bétons sont pris en compte. En revanche, les besoins en combustible nucléaire n’ont pas été considérés.

Substance ou matériau	Priorité	IM en t/MW	Commentaire
Aciers sans alliage	1	30,5	Moyenne de tous les aciers : 50 t/MW, avec 2 valeurs exclues <10 t/MW. Hypothèse (*): 61% sans alliage, 8% faiblement allié et 31% inox tiré de Dones et al.
Aciers, faiblement alliés	1	4	
Aciers, inox	1	15.5	
Béton (agrégats et ciment)	1	388	Moyenne de toutes les centrales sauf 3 valeurs exclues (< 80 t/MW): Yasuwaka et al., valeur pour le ciment uniquement ; Lecoite et al. (EPR), valeur jugée très faible par rapport aux autres) ; Ricardo-AEA, (Sizewell) également jugée trop faible. Selon Folz (Flamanville): 242 t/MW.
Aluminium	1	0,12	Moyenne de 16 valeurs, tous types de réacteurs confondus. Les valeurs entre 0,1 et 0,3 t/MW dominent.
Cuivre	1	1,4	Moyenne de 16 valeurs, tous types réacteurs confondus. Une référence d’EPR indique 0,2 t/MW.
Nickel	1	-	Métal d’alliage, déjà inclus dans la catégorie des aciers.
Manganèse	1	-	Métal d’alliage, déjà inclus dans la catégorie des aciers.
Zinc	2	0,1	Usage présumé dans la galvanisation de l’acier. Valeur max. de 7 références (dont 2 indiquent 0,1t/MW).
Plomb	2	0,48	Moyenne de 5 valeurs.
Argent	2	0,001	Valeur citée par 3 références.
Magnésium	2	0,36	Moyenne de 7 valeurs, tous types réacteur
Chrome	2	-	Métal d’alliage, déjà inclus dans la catégorie des aciers.
Molybdène	2	-	Métal d’alliage, déjà inclus dans la catégorie des aciers.
Cadmium	-	0,001	Métal d’alliage pour l’acier galvanisé. Valeur citée par 3 références.
Zirconium	3	0,9	Valeur max. de 4 références. Les écarts sont importants entre références ; 2 centrales avec valeurs très faibles : Sizewell et Torness (Ricardo-AEA, n.d.).
Titane	3	1,66	Moyenne de 3 valeurs, tous types réacteurs.
Etain	-	0,00175	Valeurs indiquées par Moss et al. (2011)
Hafnium	-	0,00048	
Indium	-	0,0016	
Niobium	2	0,002	
Vanadium	2	0,0006	
Yttrium	-	0,0005	
Tungstène	2	0,005	

Tableau 33 : Empreinte matières (ou intensité matières, IM) de la production d’énergie nucléaire en tonnes par MW de puissance installée [44].

Electricité éolienne

Dans le cadre du projet SURFER [44] le choix a été fait de quantifier séparément les empreintes matières de l'éolien terrestre et de l'éolien en mer car ces technologies présentent certaines différences. Dans les faits, en termes d'empreintes matières, celles-ci diffèrent surtout par les quantités de béton utilisées (les éoliennes en mer sont plus grandes et plus puissantes que celles terrestres et nécessitent des ancrages plus imposants lorsqu'elles ne sont pas flottantes). Les compositions des transformateurs et des générateurs changent aussi, l'éolien en mer utilisant davantage de cuivre tandis que l'éolien terrestre utilise davantage de terres rares, les générateurs utilisant le cuivre nécessitant moins de maintenance que ceux à base de terres rares. Comme pour les données présentées pour les installations nucléaires, les données ci-dessous sont donc issues d'une compilation de données de la littérature obtenues sur différents parcs éoliens *on-shore* et *off-shore* (cf. Tableau 34 et Tableau 35, respectivement).

Composant	Type	Substance ou matériau	Priorité	IM	Commentaire
Fondations	Gravitaires	Béton	1	450 t/MW	Moyenne des références. Tendance à augmenter avec des éoliennes plus hautes.
		Aciers sans alliage	1	20 t/MW	Hypothèse d'un acier sans alliage pour le béton armé, d'après (S. Carrara et al. 2020). Moyenne des références. Valeur plus élevée dans les études d'impact (33 t/MW).
Tour	En acier	Aciers, faiblement alliés	1	75 t/MW	Hypothèse d'un acier faiblement allié majoritaire pour la tour, d'après (S. Carrara et al. 2020). Moyenne des références.
	En béton	Béton	1	386 t/MW	Moyenne 10 tours entre 80 et 175 m (Engström et al. 2010)
Nacelle + moyeu	En acier	Aciers, faiblement alliés	1	15 t/MW	Moyenne des références : 30 t/MW. Hypothèse de répartition entre types d'acier adaptée de (S. Carrara et al. 2020).
		Aciers, inox	1	15 t/MW	
Générateur	Synchrone avec aimant	Cuivre	1	1,6 t/MW	D'après (I CARE ENVIRONNEMENT and ADEME 2015) 0,16 t/MW d'aimant d'après (ADEME 2017b) contenant 22,5 % Nd ; 7,5 % Pr et 4,5 % Dy d'après (Blagoeva et al. 2016).
		Néodyme	1	36 kg/MW	
		Praséodyme	1	12 kg/MW	
		Dysprosium	2	7,2 kg/MW	
	Synchrone à rotor bobiné	Cuivre	1	5,1 t/MW	D'après (I CARE ENVIRONNEMENT and ADEME 2015).
Asynchrone	Cuivre	1	1,9 t/MW		
Transformateur		Cuivre	1	0,5 t/MW	Moyenne des valeurs issues des études d'impact.
		Aciers, faiblement alliés	1	2 t/MW	
Câbles		Cuivre	1	1,7 t/MW	Moyenne d'une sélection de 6 références, associées à des données de constructeurs. Très dépendant de la localisation par rapport au réseau existant.
		Aluminium	1	5 t/MW	
Sous-station		Béton	1	8 t/MW	Moyenne de 2 références.
		Aciers, faiblement allié	1	0,5 t/MW	
		Cuivre	1	0,3 t/MW	
		Aluminium	1	0,15 t/MW	

Tableau 34 : Empreinte matières (ou intensité matières, IM) de la production d'énergie éolienne *on-shore* en tonnes (ou kg pour les terres rares) par MW de puissance installée [44].

Composant	Type	Substance ou matériau	Priorité	IM	Commentaire
Fondations	Monopile	Béton	1	20 t/MW	70 t/MW en béton et 85 t/MW en acier (projet de parc au large de Saint-Nazaire)
		Blocs roche		800 t/MW	Acier entre 80 et 280 t/MW, grouting (mortier) entre 10-20 t/MW et enrochements entre 600 et 1200 t/MW selon (Energinet.DK 2014)
		Aciers	1	190 t/MW	
	Gravitaires	Béton	1	450 t/MW	1 valeur (correspondant au projet de parc au large de Fécamp). Béton (450 t/MW) et remblais ~500 t/MW selon (Energinet.DK 2014)
		Blocs		500 t/MW	
		Aciers sans alliage	1	110 t/MW	
Jacket	Acier		100 t/MW	Entre 80 et 125 t/MW (Energinet.DK 2014)	
Tour	En acier	Aciers, inox	1	67 t/MW	Moyenne de deux valeurs (correspondant aux projets de parc au large de Saint-Nazaire et de Fécamp). Hypothèse d'un acier inox car exposé à la corrosion.
Nacelle + moyeu	En acier	Aciers, inox	1	60 t/MW	
Générateur	Synchrone avec aimant	Cuivre	1	1,6 t/MW	D'après (I CARE ENVIRONNEMENT and ADEME 2015)
		Néodyme	1	129 kg/MW	0,575 t/MW d'aimant d'après (Pavel et al. 2017) contenant 22,5 % Nd ; 7,5 % Pr et 4,5 % Dy d'après (Blagoeva et al. 2016).
		Praséodyme	1	43 kg/MW	
		Dysprosium	2	28 kg/MW	
Transformateur		Cuivre	1	1,7 t/MW	Moyenne de deux valeurs (correspondant aux projets de parc au large de Saint-Nazaire et de Fécamp).
Sous-station	Aciers, inox	1	5 t/MW		
	Cuivre	1	1,8 t/MW		
Câbles		Cuivre	1	5,2 t/MW	1 valeur
		Aluminium	1	2,8 t/MW	

Tableau 35 : Empreinte matières (ou intensité matières, IM) de la production d'énergie éolienne off-shore en tonnes (ou kg pour les terres rares) par MW de puissance installée [44].

Electricité photovoltaïque

Contrairement aux installations nucléaires ou éoliennes qui sont déjà en elles-mêmes des infrastructures de grandes dimensions et complexes, les champs de production d'électricité photovoltaïques sont quant à eux un assemblage de petits modules unitaires. Ce sont les mêmes que ceux qui sont utilisés par les particuliers à part qu'au lieu d'installer une dizaine ou une vingtaine de modules on en installe plusieurs dizaines de milliers. De plus, il existe plusieurs technologies en fonction de s'il s'agit de panneaux rigides (cellules photovoltaïques à base de silicium métallique amorphe ou polycristallin, 90% du marché des panneaux solaires, <https://www.photovoltaique.info/fr/realiser-une-installation/choix-du-materiel/caracteristiques-des-panneaux-photovoltaiques/technologies-de-cellules-solaires-photovoltaiques/>), ou s'il s'agit de couches minces. Cette seconde technologie est beaucoup plus complexe et utilise une plus grande variété de ressources minérales, mais elle est surtout réservée pour des applications à très forte valeur ajoutée comme le spatial.

Aux cellules photovoltaïques, il est nécessaire d'ajouter l'ensemble des matériaux qui sont communs à tous les modules, ainsi que des onduleurs qui servent à transformer le courant continu produit par les cellules photovoltaïques en courant alternatif utilisable sur le réseau électrique. En théorie, il serait aussi nécessaire

de prendre en compte les supports de fixation des modules mais nous les négligeons ici devant la variété des installations possibles.

On notera par ailleurs que, dans le cas des installations photovoltaïques, on parle de puissance « crête » installée en watts « crête » (Wc), ou en kilowatts crête (kWc = 10^3 Wc) et mégawatts crête (MWc = 10^6 Wc) pour ses multiples les plus courants. Cette puissance crête désigne bien la puissance nominale ou maximale que l'installation peut délivrer au réseau électrique. Cette notion est introduite pour tenir compte du fait que, en plus des questions d'intermittence de cette source d'électricité qui dépendent de l'ensoleillement d'une région, au sein d'une même région deux installations de même puissance crête pourront au final produire des quantités d'électricité différentes en fonction de la configuration de l'installation (orientation et inclinaison des panneaux par rapport au rayonnement solaire).

Les données obtenues dans le cadre de SURFER [44] sont fournies ci-dessous (cf. Tableau 36 à Tableau 38). Les chiffres entre parenthèses illustrent le fait que les empreintes matières sont parfois difficiles à déterminer avec précision et que des écarts peuvent être observés d'une étude à l'autre.

	Mono sc-Si	Poly mc-Si	CdTe	CIGS	Pérovskite	Commentaire
Si	1.7 (4)	2 (4)				Valeurs selon Jean et al. (2015). Jusqu'à 8 selon (JA Solar 2018d; PEF 2019). (S. Carrara et al. 2020; CGDD 2020) proposent une valeur de 4.
Cu				0.01 (0.02)		Cuivre dans les cellules CIGS selon Jean et al. (2015). 0.02 selon Valero et al. (2018).
Cd			0.05			CdTe, entre 0.05 et 0.08 selon la revue de (Valero et al. 2018). Jean et al. 0.03, JRC (2020) 0.055
Te			0.05			CdTe, entre 0.05 et 0.1 selon la revue de (Valero et al. 2018). Jean et al. 0.03 et JRC (2020) 0.06
In				0.016 (0.015)		CIGS selon Jean et al. (2015) et JRC (2020). ~0.02 selon Valero et al. (2018)
Ga				0.011 (0.004)		CIGS selon Jean et al. (2015). Entre 0.02 et 0.075 selon Valero et al. (2018)
Se				0.02 (0.03)		CIGS selon Jean et al. (2015). Entre 0.1 et 0.045 selon Valero et al. (2018) et JRC (2020)
Pb					0.016	Pérovskite, moyenne 2 sources (Celik et al. 2016; Jean et al. 2015)
C					0.001	
Ag	0.02 (0.02)					Valeur selon (CGDD 2020). 0.06 selon (Miquel and Gaiddon 2009). Valero et al. (2018) observent entre 0.02 et 0.35. (Lo Piano, Saltelli, and van der Sluijs 2019; CGDD 2020; Nassar, Wilburn, and Goonan 2016) prévoient une réduction progressive.

Tableau 36 : Empreinte matières (en g.Wc⁻¹) des différentes technologies de cellules photovoltaïques [44].

Matériau	IM retenue	Discussion
Aluminium (cadre)	9 g/Wc	~50 g/Wc selon (JA Solar 2018b; 2018d) pour des panneaux sur toit (correspond à une moyenne de valeurs issues de plusieurs auteurs). 1846 g/m ² selon (Stoppato 2008) ~30 g/Wc entre cadre et structure selon (Miquel and Gaiddon 2009) 7.5 g/Wc (Jean et al. 2015; S. Carrara et al. 2020) mais ne distinguent pas entre cadre ou structure autre 9.2 g/Wc (CGDD 2020)
Cuivre (câblages)	0.85 g/Wc	~5 g/Wc selon (JA Solar 2018d; 2018b) pour des panneaux sur toit (correspond à une moyenne de valeurs issues de plusieurs auteurs). 28 g/m ² selon (Stoppato 2008) 0,8-0,9 g/Wc selon (CGDD 2020; Miquel and Gaiddon 2009) 4.6 g/Wc (Jean et al. 2015; S. Carrara et al. 2020)
Verre pour module PV	45 g/Wc	45g/Wc est la valeur retenue pour un état actuel de la technologie (CGDD 2020) cohérente avec d'autres sources (Jean et al. 2015; S. Carrara et al. 2020). En général 45 à 250 g/Wc selon auteurs, selon modules de type verre-verre ou verre-blacksheet (Perpiñan et al. 2009; Stoppato 2008; M Raugei, Bargigli, and Ulgiati 2007; Miquel and Gaiddon 2009; JA Solar 2018d).

Tableau 37 : Empreinte matières (en g.Wc⁻¹) des pièces communes à l'ensemble des panneaux photovoltaïques, indépendamment de la technologie des cellules [44].

Classe d'onduleurs	Cu	Al	Acier
onduleurs 2.5 kW	1900	5000	900
onduleurs 5 kW	3100	8000	1500
onduleurs 10 kW	4900	12800	2300
onduleurs 20 kW	7900	20500	3700
onduleurs > 20 kW	15000	45000	7500

Tableau 38 : Empreinte matières des onduleurs en fonction de leur puissance (en g par onduleur) [44].

Réseaux électriques

En lien avec la quantification de l'empreinte matières des installations de production d'électricité, les travaux réalisés dans le cadre du projet SURFER [44] ont aussi eu pour objet de quantifier l'empreinte matières des réseaux qui serviront à transporter cette électricité. Ces réseaux vont effectivement être amenés à évoluer selon les scénarios de RTE [39] afin de répondre à l'électrification des modes de vie envisagée dans les scénarios de la transition énergétique [3], [11]–[14].

Dans le cadre de SURFER [44] cette quantification s'est étendue jusqu'à la basse tension, aux compteurs électriques chez les particuliers et aux serveurs informatiques associés à la numérisation des modes de vie.

Cependant, dans le cadre de cette étude nous nous sommes restreints aux réseaux de haute tension qui concernent la production et le transport de l'électricité sur de longues distances, ainsi que les usages industriels. L'empreinte matières des transformateurs a elle aussi été prise en compte (cf. Tableau 39).

Classification lignes transport et distribution		IM Al t/km	IM Zn t/km	IM acier t/km	IM Cu t/km	IM béton & gravier t/km	IM Pb t/km	Source intensités
Aérien	400 kV	18.4	1.600	61.650		289	14.2	Jorge et al. 2012, Harrison et al pour le béton
	225 kV	11.2	0.800	32.126		209	14	Moyenne entre 150 et 400kV
	150 kV	7.30	0.280	27.882		129	13.9	Jorge et al. 2012
	90 kV	1		Présent		?		Sans données de Jorge et al. (2012). Selon IMACAB ⁶¹ ~1t/km câble ACR alliage acier-aluminium.
	63 kV							
	<45 kV							
	MT 11kV	?		0.8	1.487			Moyenne 3 val. Jones & McManus
BT	1.4			Présent			Déduit à partir fabricant NEXANS ⁶²	
Souterrain	400 kV			3.4	14.7	160	14.2	Jorge et al. 2012 pour THT
	225kV			15.87 offshore		0 offshore		Même que Jorge et al. pour THT
	150 kV							Même que Jorge et al. pour THT
	90kV							Même que Jorge et al. pour THT
	63kV	2.75 4		0.021	2.784	53		Medium voltage Itten
	45 kV	2.75		0.021	2.784	53		Comme 63kV
	MT 11kV	1.08			0.96	72		Moyenne 2 val. Jones & McManus
	BT				4.6	53	2.1	IMs selon Itten et al.
			2.6	Présent	Présent			Présent
En t/transformateur								
Transformateur	400 kV			153.258	39.960	1686		Jorge et al. Données 500 MVA et Harrison et al
	225 kV			35.679	18.360	1686		Jorge et al. Données 63 MVA et Harrison et al
	150 kV	0.09		35.908	9.031	475		Jorge et al. Données 40-50 MVA et Harrison et al
	90 kV	0.09		35.908	9.031	475		Jorge et al. Données 40-50 MVA et Harrison et al
	63 kV	0.09		20.417	8.673	475		Jorge et al. Données 16-20 MVA et Harrison et al
	BT-HTA	0.20		0.857		475		Jorge et al. Données 315 kVA et Harrison et al

Tableau 39 : Empreinte matières des réseaux de transport d'électricité et des transformateurs [44].

Stockage stationnaire

Les derniers éléments à considérer dans l'optique d'un déploiement des énergies solaire et éolienne sont les systèmes de stockage de l'électricité, afin de pallier l'intermittence et le caractère non pilotable de la production d'énergie électrique *via* ces technologies. Même s'il existe différentes technologies de batteries de type Li-ion permettant d'assurer cette fonction à des échelles industrielles, toutes n'ont pas le même niveau de TRL ni la même utilisation. De plus, selon [44], la littérature sur l'empreinte matières de ces systèmes est pour l'instant peu abondante. Le Tableau 40 fournit donc l'empreinte matières d'une technologie particulière, celle à base d'oxyde de manganèse, qui est celle qui commence à être utilisée pour le stockage stationnaire en remplacement des batteries au plomb. Dans leur rapport, les contributeurs au projet SURFER mettent ainsi l'accent sur la nécessité de consolider les données qu'ils ont obtenues dans le cas des batteries de stockage. Ils partent aussi du principe que, les technologies utilisant du nickel et du cobalt permettant d'obtenir des batteries de plus grande densité énergétique, elles seront plutôt réservées à la mobilité électrique pour des raisons évidentes de minimisation de la masse des véhicules.

Matériau/substance	Kruger et al. 2018 (LiMn) en t/MW
Lithium	0.102
Nickel	-
Cobalt	-
Manganèse	0.774
Aluminium	1.57
Cuivre	1.19
Acier	18
Graphite	1.18
Béton	192
Charbon	0.166

Tableau 40 : Empreinte matières d'une batterie de stockage Li-ion basée sur la technologie oxyde de manganèse [44].

Annexe F : Synthèse des besoins en ressources minérales nécessaires à la mise en œuvre des scénarios de décarbonation du trafic aérien mondial

Cette annexe présente les données brutes des besoins en ressources minérales qui seront nécessaires pour la mise en œuvre des scénarios de décarbonation du trafic aérien. Ces données ont été calculées à partir des chiffres clés des scénarios de décarbonation et des empreintes matières des différentes technologies envisagées, cf. Section 2.4.3 et Chapitre 3, respectivement. Afin de permettre une comparaison avec l'existant, un bilan des ressources immobilisées actuellement dans la flotte des aéronefs est aussi fourni. La méthodologie utilisée pour obtenir l'ensemble de ces données est explicitée dans la Section 3.4.1. Pour plus de lisibilité, les unités vont des tonnes aux mégatonnes en fonction de la taille des marchés considérés pour chacune de ces ressources, qui varient de plusieurs ordres de grandeur entre les ressources minérales dites majeures ou de base et celles dites mineures ou rares, voire précieuses (cf. Annexe G).

Tableau 41 : Besoins en ressources minérales nécessaires à la décarbonation du trafic aérien.

Voir pages suivantes pour le tableau.

Le symbole * indique que ces éléments sont des terres rares et ** qu'ils appartiennent au groupe des platinoïdes (cf. Annexe B). Les éléments grisés sont ceux identifiés comme critiques à l'échelle de l'UE (cf. Section 4.1, Annexe H, [49], [50]). Les proportions en italique correspondent aux pourcentages du total pour les aéronefs (Aéro.) et pour la production des carburants (Carb.), quand la ressource est commune aux deux sous-ensembles du système avion étudié.

	Flotte actuelle (référentiel)	Besoins cumulés à l'horizon 2035		Besoins cumulés sur la période 2036-2050		Besoins cumulés à l'horizon 2050	
		S1	S2	S1	S2	S1	S2
Aluminium	0,6 Mt	Tot. : 3,9 Mt Aéro. : 0,2 Mt Carb. : 3,7 Mt	Tot. : 6,4 Mt Aéro. : 0,2 Mt Carb. : 6,2 Mt	Tot. : 13,9 Mt Aéro. : 0,4 Mt Carb. : 13,5 Mt	Tot. : 17,9 Mt Aéro. : 0,4 Mt Carb. : 17,5 Mt	Tot. : 17,8 Mt Aéro. : 0,6 Mt (3,4%) Carb. : 17,2 Mt (96,6%)	Tot. : 24,3 Mt Aéro. : 0,6 Mt (2,5%) Carb. : 23,7 Mt (97,5%)
Argent	-	Tot. : 4,4 kt Aéro. : - Carb. : 4,4 kt	Tot. : 7,2 kt Aéro. : - Carb. : 7,2 kt	Tot. : 15,7 kt Aéro. : - Carb. : 15,7 kt	Tot. : 20,5 kt Aéro. : - Carb. : 20,5 kt	Tot. : 20,1 kt Aéro. : - Carb. : 20,1 kt	Tot. : 27,7 kt Aéro. : - Carb. : 27,7 kt
Cadmium	-	Tot. : 0,6 kt Aéro. : - Carb. : 0,6 kt	Tot. : 1,1 kt Aéro. : - Carb. : 1,1 kt	Tot. : 2,3 kt Aéro. : - Carb. : 2,3 kt	Tot. : 3,0 kt Aéro. : - Carb. : 3,0 kt	Tot. : 3,0 kt Aéro. : - Carb. : 3,0 kt	Tot. : 4,1 kt Aéro. : - Carb. : 4,1 kt
Chrome	31,3 kt	Tot. : 2,4 Mt Aéro. : 24,3 kt Carb. : 2,4 Mt	Tot. : 4,0 Mt Aéro. : 24,3 kt Carb. : 4,0 Mt	Tot. : 8,7 Mt Aéro. : 41,9 kt Carb. : 8,7 Mt	Tot. : 11,4 Mt Aéro. : 41,9 kt Carb. : 11,4 Mt	Tot. : 11,3 Mt Aéro. : 66,2 kt (0,6%) Carb. : 11,2 Mt (99,4%)	Tot. : 15,5 Mt Aéro. : 66,2 kt (0,4%) Carb. : 15,4 Mt (99,6%)
Cobalt	14,9 kt	Tot. : 8,9 kt Aéro. : 8,9 kt Carb. : -	Tot. : 8,9 kt Aéro. : 8,9 kt Carb. : -	Tot. : 15,4 kt Aéro. : 15,4 kt Carb. : -	Tot. : 15,4 kt Aéro. : 15,4 kt Carb. : -	Tot. : 24,3 kt Aéro. : 24,3 kt Carb. : -	Tot. : 24,3 kt Aéro. : 24,3 kt Carb. : -
Cuivre	21,2 kt	Tot. : 1,9 Mt Aéro. : 7,3 kt Carb. : 1,9 Mt	Tot. : 3,1 Mt Aéro. : 7,3 kt Carb. : 3,1 Mt	Tot. : 6,7 Mt Aéro. : 12,6 kt Carb. : 6,7 Mt	Tot. : 8,7 Mt Aéro. : 12,6 kt Carb. : 8,7 Mt	Tot. : 8,6 Mt Aéro. : 19,9 kt (0,2%) Carb. : 8,6 Mt (99,8%)	Tot. : 11,8 Mt Aéro. : 19,9 kt (0,2%) Carb. : 11,8 Mt (99,8%)
Dysprosium*	-	Tot. : 2,6 kt Aéro. : - Carb. : 2,6 kt	Tot. : 4,2 kt Aéro. : - Carb. : 4,2 kt	Tot. : 9,2 kt Aéro. : - Carb. : 9,2 kt	Tot. : 12,0 kt Aéro. : - Carb. : 12,0 kt	Tot. : 11,7 kt Aéro. : - Carb. : 11,7 kt	Tot. : 16,2 kt Aéro. : - Carb. : 16,2 kt
Etain	633,7 t	Tot. : 1,0 kt Aéro. : 0,9 kt Carb. : 80,9 t	Tot. : 1,0 kt Aéro. : 0,9 kt Carb. : 133,0 t	Tot. : 1,8 kt Aéro. : 1,5 kt Carb. : 291,0 t	Tot. : 1,9 kt Aéro. : 1,5 kt Carb. : 379,1 t	Tot. : 2,7 kt Aéro. : 2,3 kt (85,2%) Carb. : 371,9 t (14,8%)	Tot. : 2,8 kt Aéro. : 2,3 kt (82,1%) Carb. : 512,1 t (17,9%)
Fer	0,1 Mt	Tot. : 30,1 Mt Aéro. : 67,6 kt Carb. : 30,2 Mt	Tot. : 49,9 Mt Aéro. : 67,6 kt Carb. : 49,8 Mt	Tot. : 109,0 Mt Aéro. : 116,9 kt Carb. : 108,9 Mt	Tot. : 141,9 Mt Aéro. : 116,9 kt Carb. : 141,8 Mt	Tot. : 139,3 Mt Aéro. : 184,5 kt (0,1%) Carb. : 139,1 Mt (99,9%)	Tot. : 191,8 Mt Aéro. : 184,5 kt (0,1%) Carb. : 191,6 Mt (99,9%)
Gallium	-	Tot. : 1,3 kt Aéro. : - Carb. : 1,3 kt	Tot. : 2,2 kt Aéro. : - Carb. : 2,2 kt	Tot. : 4,8 kt Aéro. : - Carb. : 4,8 kt	Tot. : 6,2 kt Aéro. : - Carb. : 6,2 kt	Tot. : 6,1 kt Aéro. : - Carb. : 6,1 kt	Tot. : 8,4 kt Aéro. : - Carb. : 8,4 kt
Graphite	-	Tot. : 30,2 kt Aéro. : - Carb. : 30,2 kt	Tot. : 49,6 kt Aéro. : - Carb. : 49,6 kt	Tot. : 108,6 kt Aéro. : - Carb. : 108,6 kt	Tot. : 141,5 kt Aéro. : - Carb. : 141,5 kt	Tot. : 138,8 kt Aéro. : - Carb. : 138,8 kt	Tot. : 191,1 kt Aéro. : - Carb. : 191,1 kt
Hafnium	7,9 t	Tot. : 30,4 t Aéro. : 8,2 t Carb. : 22,2 t	Tot. : 44,7 t Aéro. : 8,2 t Carb. : 36,5 t	Tot. : 94,0 t Aéro. : 14,2 t Carb. : 79,8 t	Tot. : 118,2 t Aéro. : 14,2 t Carb. : 104,0 t	Tot. : 124,3 t Aéro. : 22,3 t (17,9%) Carb. : 102,0 t (82,1%)	Tot. : 162,8 t Aéro. : 22,3 t (13,7%) Carb. : 140,5 t (86,3%)

	Flotte actuelle (référentiel)	Besoins cumulés à l'horizon 2035		Besoins cumulés sur la période 2036-2050		Besoins cumulés à l'horizon 2050	
		S1	S2	S1	S2	S1	S2
Indium	-	Tot : 2,0 kt Aéro. : - Carb. : 2,0 kt	Tot : 3,3 kt Aéro. : - Carb. : 3,3 kt	Tot : 7,2 kt Aéro. : - Carb. : 7,2 kt	Tot : 9,4 kt Aéro. : - Carb. : 9,4 kt	Tot : 9,2 kt Aéro. : - Carb. : 9,2 kt	Tot : 12,6 kt Aéro. : - Carb. : 12,6 kt
Iridium**	-	Tot : 3,1 t Aéro. : - Carb. : 3,1 t	Tot : 5,1 t Aéro. : - Carb. : 5,1 t	Tot : 12,0 t Aéro. : - Carb. : 12,0 t	Tot : 16,0 t Aéro. : - Carb. : 16,0 t	Tot : 15,0 t Aéro. : - Carb. : 15,0 t	Tot : 21,1 t Aéro. : - Carb. : 21,1 t
Lantane*	71,1 t	Tot : 73,6 t Aéro. : 73,6 t Carb. : -	Tot : 73,6 t Aéro. : 73,6 t Carb. : -	Tot : 127,4 t Aéro. : 127,4 t Carb. : -	Tot : 127,4 t Aéro. : 127,4 t Carb. : -	Tot : 201,0 t Aéro. : 201,0 t Carb. : -	Tot : 201,0 t Aéro. : 201,0 t Carb. : -
Lithium	1,7 kt	Tot : 3,2 kt Aéro. : 0,6 kt Carb. : 2,6 kt	Tot : 4,9 kt Aéro. : 0,6 kt Carb. : 4,3 kt	Tot : 10,4 kt Aéro. : 1,0 kt Carb. : 9,4 kt	Tot : 12,2 kt Aéro. : 1,0 kt Carb. : 12,2 kt	Tot : 13,6 kt Aéro. : 1,6 kt (11,8%) Carb. : 12,0 kt (88,2%)	Tot : 18,1 kt Aéro. : 1,6 kt (8,5%) Carb. : 16,5 kt (91,5%)
Magnésium	12,2 kt	Tot : 20,7 kt Aéro. : 4,1 kt Carb. : 16,6 kt	Tot : 31,5 kt Aéro. : 4,1 kt Carb. : 27,4 kt	Tot : 67,1 kt Aéro. : 7,2 kt Carb. : 59,9 kt	Tot : 85,2 kt Aéro. : 7,2 kt Carb. : 78,0 kt	Tot : 87,8 kt Aéro. : 11,3 kt (13,2%) Carb. : 76,5 kt (86,8%)	Tot : 116,8 kt Aéro. : 11,3 kt (9,7%) Carb. : 105,3 kt (90,3%)
Manganèse	2,1 kt	Tot : 0,5 Mt Aéro. : 0,8 kt Carb. : 0,5 Mt	Tot : 0,9 Mt Aéro. : 0,8 kt Carb. : 0,9 Mt	Tot : 1,9 Mt Aéro. : 1,3 kt Carb. : 1,9 Mt	Tot : 2,4 Mt Aéro. : 1,3 kt Carb. : 2,4 Mt	Tot : 2,4 Mt Aéro. : 2,1 kt (0,1%) Carb. : 2,4 Mt (99,9%)	Tot : 3,3 Mt Aéro. : 2,1 kt (0,1%) Carb. : 3,3 Mt (99,9%)
Molybdène	10,5 kt	Tot : 161,3 kt Aéro. : 9,4 kt Carb. : 151,9 kt	Tot : 259,1 kt Aéro. : 9,4 kt Carb. : 249,7 kt	Tot : 562,9 kt Aéro. : 16,3 kt Carb. : 546,6 kt	Tot : 728,2 kt Aéro. : 16,3 kt Carb. : 711,9 kt	Tot : 724,2 kt Aéro. : 25,8 kt (3,6%) Carb. : 698,4 kt (96,4%)	Tot : 987,4 kt Aéro. : 25,8 kt (2,6%) Carb. : 961,6 kt (97,4%)
Néodyme*	-	Tot : 11,8 kt Aéro. : - Carb. : 11,8 kt	Tot : 19,5 kt Aéro. : - Carb. : 19,5 kt	Tot : 42,6 kt Aéro. : - Carb. : 42,6 kt	Tot : 55,5 kt Aéro. : - Carb. : 55,5 kt	Tot : 54,4 kt Aéro. : - Carb. : 54,4 kt	Tot : 75,0 kt Aéro. : - Carb. : 75,0 kt
Nickel	69,1 kt	Tot : 1,2 Mt Aéro. : 58,6 kt Carb. : 1,1 Mt	Tot : 1,9 Mt Aéro. : 58,6 kt Carb. : 1,8 Mt	Tot : 4,1 Mt Aéro. : 101,4 kt Carb. : 4,0 Mt	Tot : 5,4 Mt Aéro. : 101,4 kt Carb. : 5,3 Mt	Tot : 5,4 Mt Aéro. : 160,1 kt (3,0%) Carb. : 5,2 Mt (97,0%)	Tot : 7,3 Mt Aéro. : 160,1 kt (2,2%) Carb. : 7,1 Mt (97,8%)
Niobium	3,6 kt	Tot : 3,8 kt Aéro. : 3,7 kt Carb. : 92,4 t	Tot : 3,8 kt Aéro. : 3,7 kt Carb. : 152,0 t	Tot : 6,6 kt Aéro. : 6,3 kt Carb. : 332,6 t	Tot : 6,7 kt Aéro. : 6,3 kt Carb. : 433,2 t	Tot : 10,4 kt Aéro. : 10,0 kt (96,2%) Carb. : 425,1 t (3,8%)	Tot : 10,6 kt Aéro. : 10,0 kt (94,3%) Carb. : 585,2 t (5,7%)
Platine**	-	Tot : 10,1 t Aéro. : - Carb. : 10,1 t	Tot : 16,9 t Aéro. : - Carb. : 16,9 t	Tot : 39,5 t Aéro. : - Carb. : 39,5 t	Tot : 52,9 t Aéro. : - Carb. : 52,9 t	Tot : 49,7 t Aéro. : - Carb. : 49,7 t	Tot : 69,8 t Aéro. : - Carb. : 69,8 t
Plomb	-	Tot : 0,7 Mt Aéro. : - Carb. : 0,7 Mt	Tot : 1,2 Mt Aéro. : - Carb. : 1,2 Mt	Tot : 2,6 Mt Aéro. : - Carb. : 2,6 Mt	Tot : 3,4 Mt Aéro. : - Carb. : 3,4 Mt	Tot : 3,4 Mt Aéro. : - Carb. : 3,4 Mt	Tot : 4,6 Mt Aéro. : - Carb. : 4,6 Mt

	Flotte actuelle (référentiel)	Besoins cumulés à l'horizon 2035		Besoins cumulés sur la période 2036-2050		Besoins cumulés à l'horizon 2050	
		S1	S2	S1	S2	S1	S2
Praséodyme*	-	Tot : 3,9 kt Aéro. : - Carb. : 3,9 kt	Tot : 6,5 kt Aéro. : - Carb. : 6,5 kt	Tot : 14,2 kt Aéro. : - Carb. : 14,2 kt	Tot : 18,5 kt Aéro. : - Carb. : 18,5 kt	Tot : 18,1 kt Aéro. : - Carb. : 18,1 kt	Tot : 25,0 kt Aéro. : - Carb. : 25,0 kt
Rhénium	379,3 t	Tot : 392,7 t Aéro. : 392,7 t Carb. : -	Tot : 392,7 t Aéro. : 392,7 t Carb. : -	Tot : 679,3 t Aéro. : 679,3 t Carb. : -	Tot : 679,3 t Aéro. : 679,3 t Carb. : -	Tot : 1072,0 t Aéro. : 1072,0 t Carb. : -	Tot : 1072,0 t Aéro. : 1072,0 t Carb. : -
Sélénium	-	Tot : 0,2 kt Aéro. : - Carb. : 0,2 kt	Tot : 0,4 kt Aéro. : - CARB. : 0,4 kt	Tot : 0,9 kt Aéro. : - CARB. : 0,9 kt	Tot : 1,1 kt Aéro. : - CARB. : 1,1 kt	Tot : 1,1 kt Aéro. : - CARB. : 1,1 kt	Tot : 1,5 kt Aéro. : - CARB. : 1,5 kt
Silicium	3,5 kt	Tot : 11,4 Mt Aéro. : 1,4 kt Carb. : 11,4 Mt	Tot : 18,7 Mt Aéro. : 1,4 kt Carb. : 18,7 Mt	Tot : 41,0 Mt Aéro. : 2,4 kt Carb. : 41,0 Mt	Tot : 53,4 Mt Aéro. : 2,4 kt Carb. : 53,4 Mt	Tot : 52,4 Mt Aéro. : 3,8 kt (0,1%) Carb. : 52,4 Mt (99,9%)	Tot : 72,1 Mt Aéro. : 3,8 kt (0,1%) Carb. : 72,1 Mt (99,9%)
Tantale	632,2 t	Tot : 654,6 t Aéro. : 654,6 t Carb. : -	Tot : 654,6 t Aéro. : 654,6 t Carb. : -	Tot : 1132,2 t Aéro. : 1132,2 t Carb. : -	Tot : 1132,2 t Aéro. : 1132,2 t Carb. : -	Tot : 1786,7 t Aéro. : 1786,7 t Carb. : -	Tot : 1786,7 t Aéro. : 1786,7 t Carb. : -
Tellure	-	Tot : 0,6 kt Aéro. : - Carb. : 0,6 kt	Tot : 1,0 kt Aéro. : - Carb. : 1,0 kt	Tot : 2,2 kt Aéro. : - Carb. : 2,2 kt	Tot : 2,8 kt Aéro. : - Carb. : 2,8 kt	Tot : 2,8 kt Aéro. : - Carb. : 2,8 kt	Tot : 3,8 kt Aéro. : - Carb. : 3,8 kt
Titane	109,7 kt	Tot : 226,3 kt Aéro. : 147,3 kt Carb. : 79,0 kt	Tot : 277,0 kt Aéro. : 147,3 kt Carb. : 130,0 kt	Tot : 539,8 kt Aéro. : 254,8 kt Carb. : 285,0 kt	Tot : 626,3 kt Aéro. : 254,8 kt Carb. : 371,5 kt	Tot : 766,1 kt Aéro. : 402,1 kt (52,5%) Carb. : 364,0 kt (47,5%)	Tot : 903,6 kt Aéro. : 402,1 kt (44,5%) Carb. : 501,5 kt (55,5%)
Tungstène	1,9 kt	Tot : 2,5 kt Aéro. : 2,0 kt Carb. : 0,5 kt	Tot : 2,8 kt Aéro. : 2,0 kt Carb. : 0,8 kt	Tot : 5,2 kt Aéro. : 3,5 kt Carb. : 1,7 kt	Tot : 5,7 kt Aéro. : 3,5 kt Carb. : 2,2 kt	Tot : 7,6 kt Aéro. : 5,5 kt (72,4%) Carb. : 2,1 kt (27,6%)	Tot : 8,4 kt Aéro. : 5,5 kt (65,5%) Carb. : 2,9 kt (34,5%)
Vanadium	4,8 kt	Tot : 6,5 kt Aéro. : 6,5 kt Carb. : 27,7 t	Tot : 6,5 kt Aéro. : 6,5 kt Carb. : 45,6 t	Tot : 11,3 kt Aéro. : 11,2 kt Carb. : 99,8 t	Tot : 11,3 kt Aéro. : 11,2 kt Carb. : 130,0 t	Tot : 17,7 kt Aéro. : 17,7 kt (0,7%) Carb. : 127,5 t (99,3%)	Tot : 17,8 kt Aéro. : 17,7 kt (1,0%) Carb. : 175,6 t (99,0%)
Yttrium*	-	Tot : 23,1 t Aéro. : - Carb. : 23,1 t	Tot : 38,0 t Aéro. : - Carb. : 38,0 t	Tot : 83,2 t Aéro. : - Carb. : 83,2 t	Tot : 108,3 t Aéro. : - Carb. : 108,3 t	Tot : 106,3 t Aéro. : - Carb. : 106,3 t	Tot : 146,3 t Aéro. : - Carb. : 146,3 t
Zinc	23,1 kt	Tot : 40,3 kt Aéro. : 7,8 kt Carb. : 32,5 kt	Tot : 61,3 kt Aéro. : 7,8 kt Carb. : 53,5 kt	Tot : 130,5 kt Aéro. : 13,5 kt Carb. : 117,0 kt	Tot : 165,9 kt Aéro. : 13,5 kt Carb. : 152,4 kt	Tot : 170,8 kt Aéro. : 21,3 kt (12,5%) Carb. : 149,5 kt (87,5%)	Tot : 227,1 kt Aéro. : 21,3 kt (9,4%) Carb. : 205,8 kt (90,6%)
Zirconium	1,3 kt	Tot : 43,0 kt Aéro. : 1,4 kt Carb. : 41,6 kt	Tot : 69,8 kt Aéro. : 1,4 kt Carb. : 68,4 kt	Tot : 152,2 kt Aéro. : 2,5 kt Carb. : 149,7 kt	Tot : 197,5 kt Aéro. : 2,5 kt Carb. : 195,0 kt	Tot : 195,2 kt Aéro. : 3,9 kt (2,0%) Carb. : 191,3 kt (98,0%)	Tot : 267,2 kt Aéro. : 3,9 kt (1,5%) Carb. : 263,3 kt (98,5%)

Annexe G : Notions fondamentales de l'exploitation minière des ressources minérales

De la roche au minerai

En minéralogie, un minéral est un matériau solide et inorganique, formé d'un ou plusieurs éléments chimiques mais possédant une structure cristalline bien déterminée. Les minéraux sont ainsi classés selon leur forme, leur structure cristalline et leur composition chimique. Ils sont le plus souvent facilement identifiables grâce à leur aspect ou leur couleur. L'argent, le plomb, le diamant, le quartz ou la pyrite par exemple sont des minéraux. Du point de vue géologique, ces minéraux se retrouvent agglomérés dans des roches.

Contrairement aux minéraux, les roches peuvent se présenter sous différentes formes (solides, huileuses, ou meubles par exemple), ou contenir des matériaux organiques comme le tuf. Les roches sont classées selon leur mode de formation (sédimentaire, volcanique, métamorphique, *etc.*), leur composition chimique ou minéralogique, ou encore leurs propriétés mécaniques comme leur texture, leur porosité ou leur dureté. La bauxite, le basalte, la houille, le gypse, le grès, ou encore le pétrole, sont des roches.

On appelle minerai toute roche suffisamment riche en minéraux pour être exploitable. Par extension, on utilise le terme minerai pour désigner les minéraux exploités (or, cuivre, fer, nickel, phosphore, *etc.*). Il s'agit donc plus d'un terme économique que géologique. Il faut par exemple quatre tonnes de bauxite pour obtenir deux tonnes d'alumine, desquelles on extrait une tonne d'aluminium. Lorsque l'on décide d'exploiter une mine¹⁰ on va donc, au sein d'une roche particulière, exploiter certains minéraux desquels on pourra extraire différents minerais, le gisement étant plus ou moins riche en teneur de chaque minerai.

Néanmoins, toutes les combinaisons de minerais ne sont pas possibles au sein d'un même minéral ni même d'une même roche. L'exploitation minière fait donc apparaître des minerais de base, ou majeurs, ceux présents en quantités principales dans les minéraux et utilisés en très grandes quantités, le fer bien sûr présent dans l'ensemble des roches, mais aussi le plomb, le cuivre, le nickel, l'aluminium, le zinc et l'étain. Ce sont très majoritairement les produits qui permettent la rentabilité économique de l'exploitation d'une mine. *A contrario*, sont appelés minerais mineurs ou rares¹¹ les minerais qui sont présents en plus faibles teneurs dans les minéraux exploités, parfois quelques ppm (parties par million), et dont les volumes des marchés économiques sont plus faibles, voire parfois de plusieurs ordres de grandeur en termes de tonnages produits annuellement. On parle alors de sous-produits de l'extraction minière (Figure 21), voire de sous-sous-produit dans le cas du rhénium.

¹⁰ Une mine et une carrière ne se différencient pas par la méthode d'exploitation (souterraine pour les mines et à ciel ouvert pour les carrières par exemple). Ce qui caractérise une mine ou une carrière, ce sont les substances extraites selon une classification définie à l'article L111-1 du code minier.

¹¹ Le terme de minerais, ou métaux, rares ne doit pas être confondu avec les terres rares qui sont une famille d'éléments particuliers de la classification périodique des éléments (*cf.* Annexe B), même si les terres rares sont effectivement des minerais mineurs ou rares en termes de taille de leur marché économique.

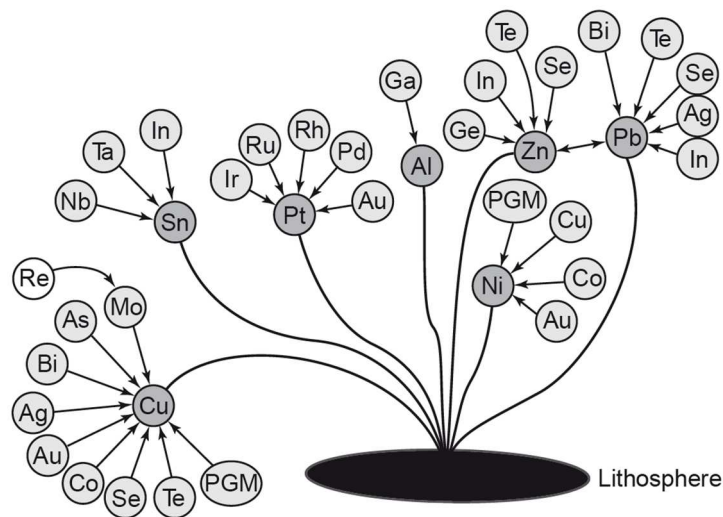


Figure 21 : Métaux (minerais) de base et leurs sous-produits [72].

Grâce à la Figure 21, on comprend aisément que la production d'un minerai mineur est totalement liée à celles du ou des minerais de base dont il est un sous-produit. Par exemple les marchés du cobalt, du cuivre et du nickel sont liés et, de manière générale, si la croissance de la demande pour le sous-produit est plus élevée que celle du ou des minerais de base une tension peut apparaître en termes de disponibilité pour le sous-produit. Cela explique pourquoi, dans la liste des CRM établis par l'UE (cf. Section 4.1, Annexe H, [49], [50]), ce sont les sous-produits qui ressortent comme les plus critiques ; le cobalt fait partie des CRM mais pas le nickel ni le cuivre. Tout aussi emblématique est la bauxite, qui est la principale roche permettant d'obtenir de l'aluminium. Elle a été rajoutée à la liste des CRM lors de sa mise à jour en 2020 en raison du gallium, très utilisé pour l'électronique et la production d'électricité, et non de l'aluminium. Pour donner un ordre de grandeur, les métaux majeurs représentent 72% en termes de valeur marchande et 98% en termes de tonnages du marché annuel tous métaux confondus [60] ; l'évolution du marché des métaux majeurs comme le cuivre est souvent un très bon indicateur de l'évolution de la croissance économique mondiale.

Concernant les métaux rares, on observera que, bien qu'utilisés dans de très petites quantités, ils sont souvent indispensables pour nombre de technologies à très forte valeur ajoutée ; on utilise donc aussi le terme de métaux spéciaux pour les définir. Ces métaux font ainsi l'objet de nombreuses études concernant les technologies du numérique et la transition énergétique [16], [32], [35], [36], [52], [54], et sont aussi au centre d'enjeux géopolitiques importants [15], [60], [86], [87]. Quelques métaux rares sont aussi exploités pour eux-mêmes et non en tant que sous-produits ; c'est par exemple le cas du lithium et des terres rares, ces dernières étant présentes ensemble au sein des gisements. *Idem* pour le tantale et le niobium exploités sous forme de coltan (contraction de colombium, ancien nom du niobium, et tantale) en plus d'être des sous-produits de l'étain. De même, les platinoïdes forment un groupe présent ensemble au sein des gisements exploités pour lui-même, en plus d'être un sous-produit du nickel et du cuivre.

Pour finir, on notera le cas particulier des métaux précieux, qui contient les platinoïdes susmentionnés ainsi que l'or et l'argent, et qui est un sous-groupe des métaux mineurs. En raison de leur très grande rareté ou de leur caractère de valeur monétaire refuge, ces métaux ont une valeur marchande qui leur permet de s'affranchir de la logique minerai de base vs. sous-produits.

Ressources, réserves et flux miniers

Lorsque l'on parle exploitation minière, deux autres notions reviennent constamment, celles de ressources et de réserves minières. On notera que le terme de ressource est fréquemment utilisé tout au long de ce rapport mais dans son acception générale, là où le terme de ressource minière à une signification bien précise.

Au sens minier du terme, une ressource minière est une concentration naturelle d'un minéral solide, incluant des métaux (ou minerais) de base ainsi que des sous-produits et des métaux précieux. Cette ressource est d'une teneur ou d'une qualité telle qu'elle présente des perspectives raisonnables d'extraction rentable. La localisation, la quantité, la teneur, les caractéristiques géologiques et la continuité d'une ressource minière sont connues, estimées ou interprétées à partir d'analyses géologiques des roches. Les ressources minières sont généralement découvertes lors de phases d'exploration puis de mise en valeur permettant de préciser les caractéristiques et le potentiel de la ressource. En fonction du degré de certitude, une ressource minière peut être considérée comme présumée, indiquée, ou mesurée grâce à la réalisation de prélèvements et de leur échantillonnage.

Les réserves au sens minier du terme désignent quant à elles la partie économiquement exploitable des ressources minières mesurées ou indiquées ; le caractère exploitable doit avoir été démontré par au moins une étude préliminaire de faisabilité. L'étude doit inclure les renseignements adéquats sur l'exploitation minière, le traitement, la métallurgie, les aspects économiques et les autres facteurs pertinents démontrant qu'il est possible, au moment de la rédaction du rapport, de justifier le caractère rentable économiquement de l'extraction. La notion de réserve minière est donc évolutive en fonction de l'évolution de la demande et des prix d'achats des minerais considérés, mais aussi en fonction de l'amélioration des procédés d'extraction de ces minerais. On notera que les gisements exploités en premier sont forcément les plus rentables économiquement, donc les plus faciles d'accès et ceux dont les teneurs en minerais sont les plus élevées.

Si les notions de ressources et de réserves d'un minerai sont des notions de stocks, la dernière notion à prendre en compte est une notion de flux associée aux capacités de production. En effet, même s'il n'est pas question de laisser penser que les réserves minières sont infinies du point de vue de l'accessibilité illimitée à une ressource bon marché, de plus en plus, les questions de disponibilité des ressources se posent en termes de capacités de production vs. prévisions de croissance de la demande [50], [88]. De plus, même si, moyennant une augmentation du prix du minerai, une partie des ressources minières pourrait être transformée en réserves, ouvrir une nouvelle mine nécessite de l'ordre de 10 à 15 ans [19], [78], [79], sans parler des enjeux environnementaux et sociaux que cela soulève. Si les capacités de production actuelles permettent de répondre dans une certaine mesure à la croissance de la demande, à l'horizon 2050, pour certaines ressources très critiques, ce sont des augmentations de plusieurs centaines de pourcents de la production annuelle qu'il va falloir opérer afin de pouvoir répondre aux prévisions de croissance de la demande [20], [33], [77]. Les capacités de production de certaines ressources pourraient donc devenir des facteurs limitants en vue du déploiement massif et rapide de certaines technologies qui en dépendent.

Annexe H : Ressources critiques et dépendance de l'UE

Cette annexe apporte quelques précisions sur la façon dont est évaluée la criticité d'une ressource, mais on se réfèrera à [55] pour les détails méthodologiques de cette évaluation. Elle aborde aussi la problématique de la dépendance de l'UE à un certain nombre de ressources identifiées comme telles.

Quantification de la criticité d'une ressource

A l'échelle macroscopique, la quantification de la criticité d'une ressource se base sur l'utilisation de deux critères principaux que sont le HHI (*Herfindahl-Hirschman Index*) et les WGI (*Worldwide Governance Indicators*) [64]. Le HHI est un indicateur classiquement utilisé en économie pour quantifier la concentration d'un marché. Pour une ressource minérale, il se calcule donc de la façon suivante :

$$HHI = \sum_{i=1}^n s_i^2$$

Équation 1 : Calcul du HHI.

ou n représente le nombre de pays producteurs de la ressource et s_i la part de marché du pays i dans la production mondiale de la ressource en question, exprimée en % ; plus un marché est concentré, plus le HHI est élevé. Si une ressource est produite par un seul pays elle a donc un HHI de 10000. Si, au contraire, la production mondiale de cette ressource se répartit entre 100 pays à parts égales son HHI vaut 100. On notera qu'il existe d'autres formules de calcul du HHI permettant de le normer entre 0 et 1.

Lorsque l'on parle des ressources minérales, la géologie fait que ces ressources sont très inégalement réparties sur Terre dans l'ensemble, la production minière d'un minerai est donc souvent concentrée en quelques pays seulement. Pour cette raison on utilise souvent le HHI5 qui représente le HHI mais tronqué aux cinq premiers pays producteurs de la ressource. On remarquera par ailleurs que l'on peut définir un HHI associé à l'extraction d'un minerai et un HHI associé à la production du métal purifié semi-fini qui sera ensuite utilisé pour la production industrielle, certains métaux n'étant pas forcément raffinés dans leur pays d'extraction. De même, les pays qui exploitent le plus leurs gisements ne sont pas toujours ceux qui possèdent les réserves ou les ressources minières les plus importantes, cela dépend des choix politiques des états et des secteurs d'activité qui supportent leur économie.

Les WGI regroupent quant à eux six indicateurs qui ont été créés par la Banque Mondiale en 1996 afin de mesurer les performances d'un pays selon six dimensions de « bonne gouvernance » :

- Voix citoyenne et responsabilité : dans quelle mesure les citoyens participent réellement au choix de leurs gouvernants, que ce soit par l'étendue de leur liberté d'expression, d'association, ou celle des médias ;
- Stabilité politique et absence de violence : perception de la probabilité selon laquelle le gouvernement pourrait être déstabilisé, renversé soit par des moyens inconstitutionnels, soit par la violence (violence politique ou terrorisme) ;

- Efficacité des pouvoirs publics : qualité des services publics, des fonctionnaires, et leur degré d'indépendance vis-à-vis des pressions politiques ; qualité des politiques publiques, aussi bien dans leur définition que dans leur application, mais aussi la responsabilité effective du gouvernement quant à ces politiques publiques ;
- La qualité de la réglementation : capacité du gouvernement à formuler et appliquer des politiques et des réglementations adaptées qui favorisent le développement du secteur privé ;
- L'État de droit : dans quelle mesure les citoyens ont-ils confiance dans les règles posées par la société, et les respectent-ils ? Et, en particulier, qualité du contrat social, à travers la police et les juridictions, mais aussi le taux de criminalité et la violence ;
- La maîtrise de la corruption : si et dans quelle mesure la puissance publique est exercée à des fins privées en incluant à la fois petites et grandes formes de corruption, de même que la façon dont l'État a été « capté » par les élites et les intérêts privés.

Même si la pertinence de ces indicateurs peut être critiquée, notamment en raison du caractère subjectif et interprétable de certains critères en regard des pratiques culturelles des différents pays [89], la Banque mondiale propose ainsi une notation régulièrement actualisée de 200 pays dans le monde pour chacun de ces six indicateurs (<https://databank.worldbank.org/reports.aspx?source=worldwide-governance-indicators>). En dépit de leur perfectibilité, l'utilisation de ces indicateurs permet d'apporter une dimension supplémentaire au HHI. En effet, un HHI très élevé n'aura pas forcément la même signification en termes d'enjeux géopolitiques si le principal pays producteur de la ressource a des WGI bas ou au contraire élevés ; plus les WGI sont bas, plus les pratiques de gouvernance du pays sont considérées comme démocratiques et respectueuses des institutions et des citoyens. Dans le premier cas, la problématique sera surtout donc essentiellement une question de prix de la ressource en raison d'un manque de concurrence, alors que dans le second cas pourront aussi s'ajouter des questions d'éthique et de RSE à l'échelle d'une entreprise. Même en cas de HHI faible, si tous les producteurs de la ressource présentent des WGI élevés ces questions demeurent. En revanche, si certains des fournisseurs présentent des WGI bas il sera intéressant de les privilégier tant du point de vue éthique, ou RSE, que du point de vue de la consolidation des chaînes d'approvisionnement.

A l'échelle plus locale d'un pays ou d'un groupement de pays, la criticité d'une ressource est caractérisée plutôt selon deux axes que sont la disponibilité de la ressource et son importance économique. Ces indicateurs, dont la méthodologie de calcul pour l'UE est donnée dans [55], se basent en partie sur les HHI et WGI mais en prenant en plus en compte des notions d'importance économique de ces ressources, à la fois en termes de volumes mais aussi de nature des secteurs concernés. Sont aussi pris en compte les caractères plus ou moins substituables ou recyclables de ces ressources. Par ailleurs, on notera qu'il existe une différence entre une ressource dite stratégique car indispensable à la politique économique d'un État, à sa défense, à sa politique énergétique ou à celle d'un acteur industriel spécifique (exemple : métaux pour la transition énergétique), et une ressource dite critique car ayant des propriétés remarquables pouvant entraîner des impacts industriels ou économiques négatifs importants liés à un approvisionnement difficile, sujet à des aléas. Une ressource stratégique n'est donc pas forcément critique et le fait pour une ressource d'être identifiée comme critique peut évoluer dans le temps.

UE et dépendance aux CRM

Cette section fournit quelques illustrations complémentaires concernant la dépendance de l'UE aux ressources critiques [49]–[52]. Parmi les 83 ressources considérées (cf. Tableau 42), réparties en 63 ressources individuelles et trois groupes de métaux (les platinoïdes, les terres rares de masse molaire élevée et celles de faible masse molaire, l'yttrium ayant pourtant une faible masse molaire, cf. Annexe B), 30 ressources dont les trois groupes de métaux ont été identifiées comme critiques (cf. Figure 22). Cette criticité s'explique par le fait que plus de 80% de l'économie de l'UE dépend de ces ressources qui, aux rares exceptions près que sont le hafnium, le germanium et le strontium, sont majoritairement voire très majoritairement importées (cf. Figure 23 à Figure 25).

Industrial and construction minerals	aggregates, baryte, bentonite, borates, diatomite, feldspar, fluorspar, gypsum, kaolin clay, limestone, magnesite, natural graphite, perlite, phosphate rock, phosphorus, potash, silica sand, sulphur, talc
Iron and ferro-alloy metals	chromium, cobalt, manganese, molybdenum, nickel, niobium, tantalum, titanium, tungsten, vanadium
Precious metals	gold, silver, and Platinum Group Metals (iridium, palladium, platinum, rhodium, ruthenium)
Rare earths	Heavy rare earths (dysprosium, erbium, europium, gadolinium, holmium, lutetium, terbium, thulium, ytterbium, yttrium); Light rare earths (cerium, lanthanum, neodymium, praseodymium and samarium); and scandium
Other non-ferrous metals	aluminium, antimony, arsenic, beryllium, bismuth, cadmium, copper, gallium, germanium, gold, hafnium, indium, lead, lithium, magnesium, rhenium, selenium, silicon metal, silver, strontium, tellurium, tin, zinc, zirconium
Bio and other materials	natural cork, natural rubber, natural teak wood, sapele wood, coking coal, hydrogen and helium

Tableau 42 : Liste des ressources stratégiques surveillées par l'UE [49].

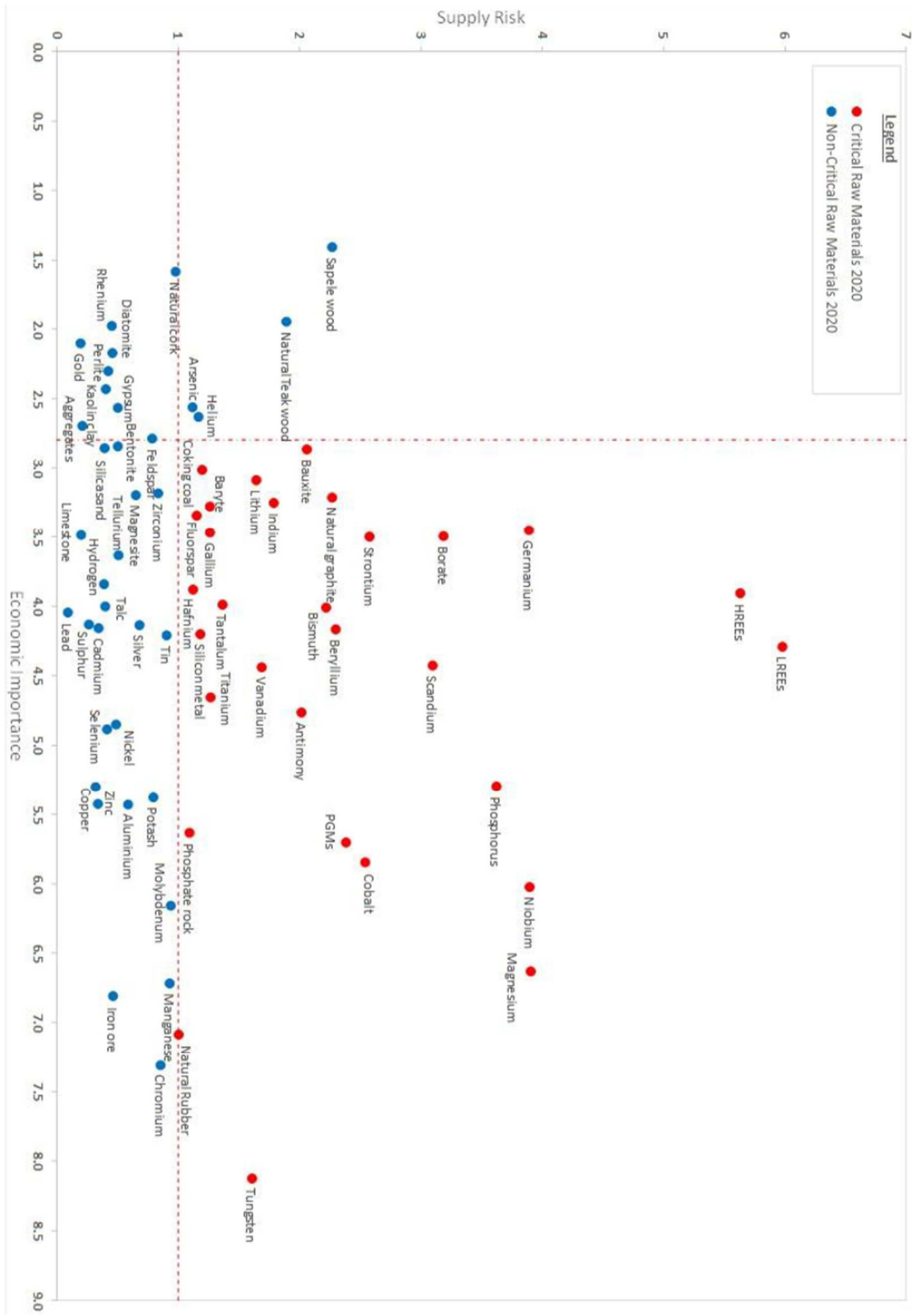


Figure 22 : Liste des ressources suivies par l'UE, dont en rouge celles considérées comme critiques (CRM, Critical Raw Materials) [49].

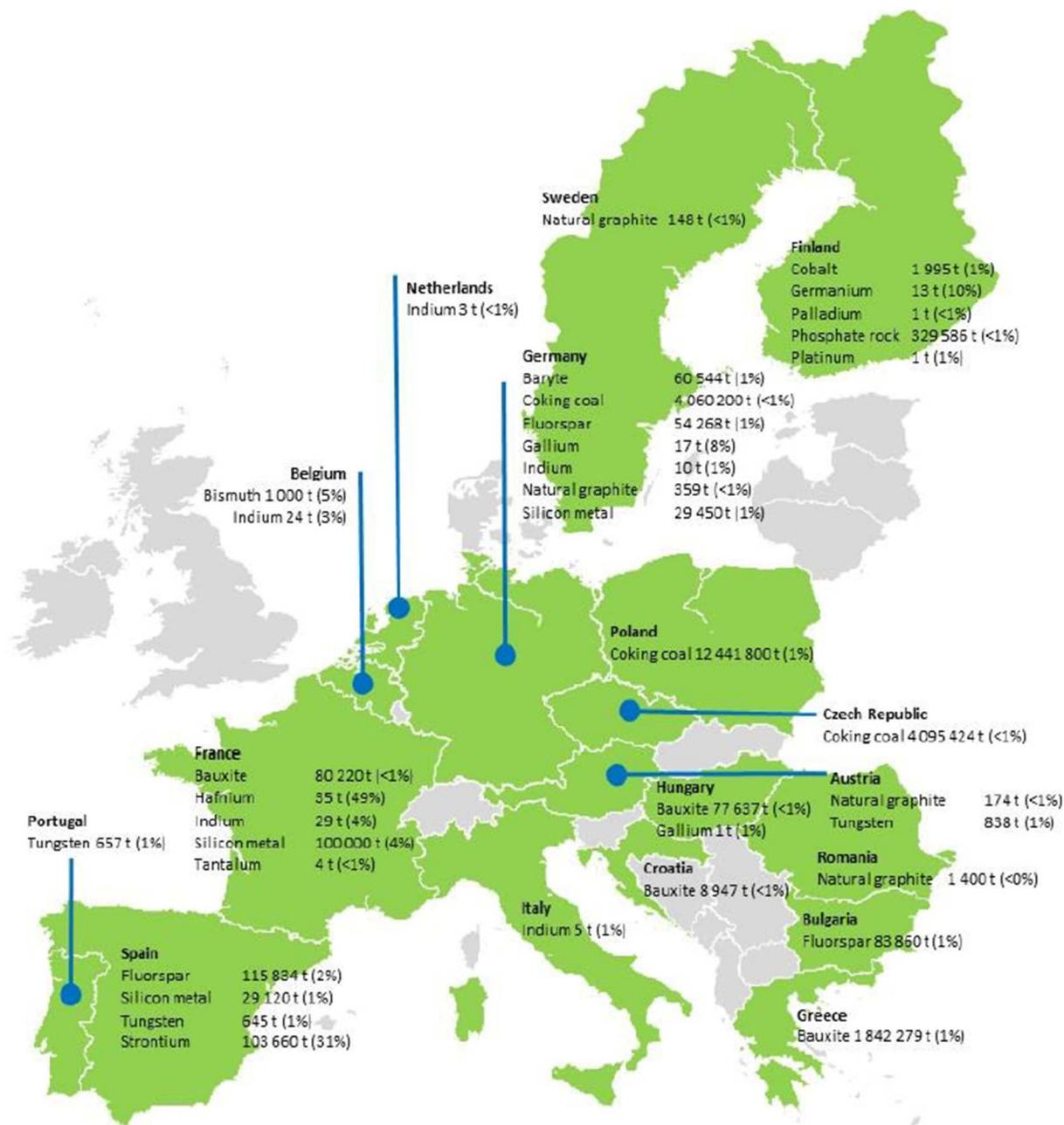


Figure 23 : CRM produites en UE (entre parenthèses, part de cette production par rapport à la production mondiale sur la période 2012-2016) [49].

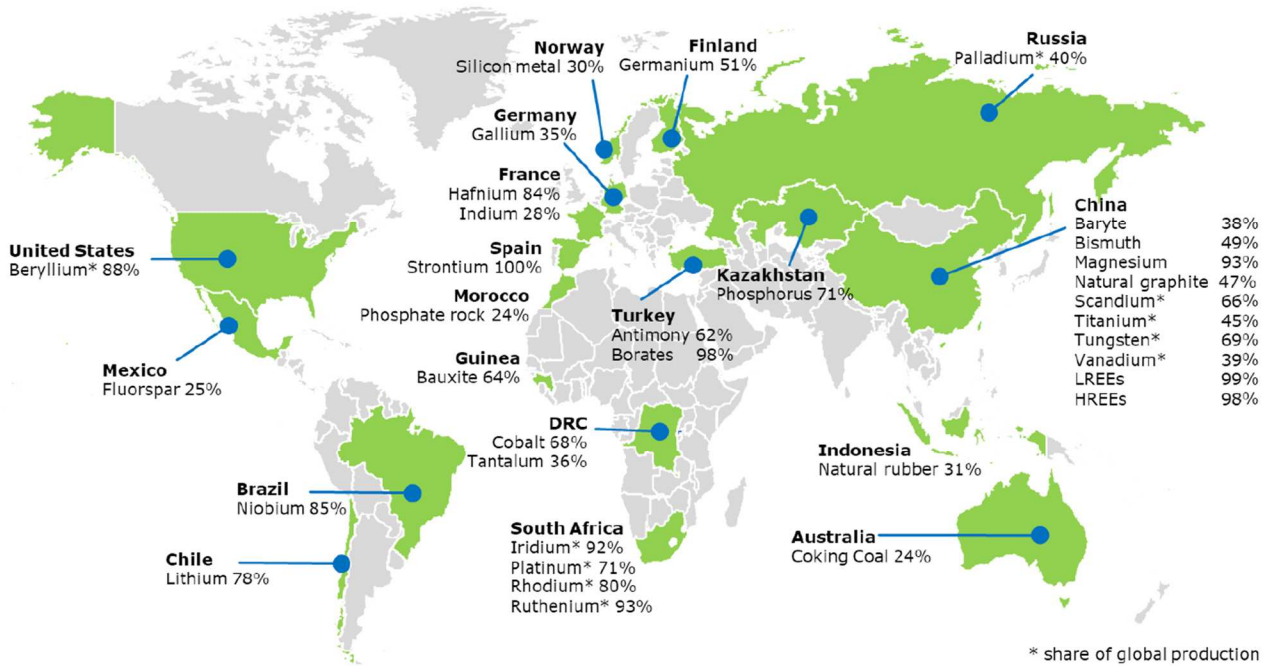


Figure 24 : Principaux pays d'approvisionnement des CRM pour l'UE [49].

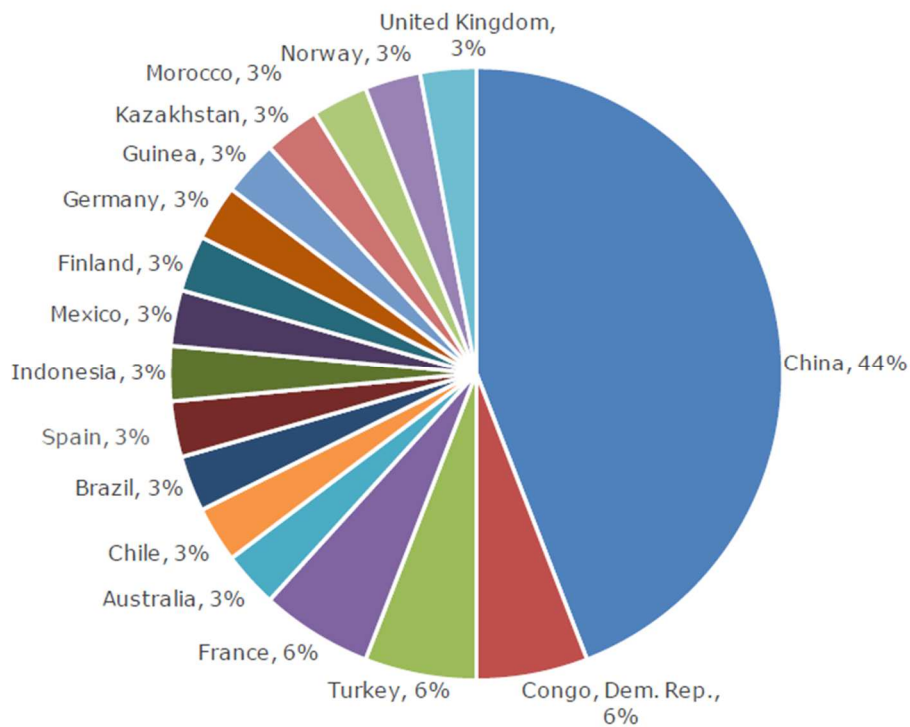


Figure 25 : Principaux pays fournisseurs de CRM à l'UE [49].

Annexe I : Données de production, consommation, criticité, substituabilité et recyclabilité des ressources nécessaires à la décarbonation du trafic aérien

L'objet de cette annexe est de synthétiser l'ensemble des données concernant le prix, les productions minérale et métallurgique, les réserves et ressources minières des 36 différents minerais que nous avons identifiés comme indispensables à la mise en œuvre des trajectoires de décarbonation du trafic aérien. Sont aussi précisés les indices HHI et WGI (cf. Annexe H) pour chacune de ces ressources, ainsi que leurs principales utilisations en plus de celles concernées par cette étude. L'ensemble des informations collectées a ainsi permis de discuter de la criticité de chacune des ressources étudiées en termes de possibilité ou non de déployer les technologies nécessaires à la décarbonation du trafic aérien dans les délais et les proportions envisagées. Les capacités de substitution des ressources entre elles et leur recyclabilité ont aussi été regardées.

Pour construire cette base de données, nous nous sommes appuyés sur les données disponibles sur les sites du BRGM (<https://www.mineralinfo.fr/fr/securite-des-approvisionnements-pour-leconomie/substances-critiques-strategiques#les-analyses-par-substance>) et de l'USGS (<https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/commodity-statistics-and-information>), ainsi que sur celles disponibles sur le site <https://lelementarium.fr>. Différentes études et ouvrages ont aussi été utilisés [52], [60]–[63]. On notera que, pour les terres rares, seul le dysprosium et le néodyme font l'objet de fiches détaillées. Pour les autres terres rares les informations individuelles ne sont que très parcellaires et souvent traitées globalement avec l'ensemble des oxydes de terres rares (formes minérales sous lesquelles on les extrait) [90].

Il a été décidé de privilégier les données fournies pour l'année 2019, afin de ne pas tenir compte de la déstabilisation du marché des matières premières consécutive à la pandémie de la Covid 19. Ce travail de recoupage des informations a été nécessaire car, en fonction des sources utilisées, les données n'étaient que partiellement disponibles, ou l'étaient mais pour des années différentes (les années sont précisées entre parenthèses), voire affichaient des différences parfois entre les sources. Il s'agissait donc de fournir les données les plus fiables possibles. Dans le cas des quelques minerais cotés en bourse, les prix moyens actuels calculés sur la période de mai à juillet 2022 ont aussi été considérés pour comparaison avec les prix des années antérieures (données issues du site du *London Metal Exchange*, <https://www.lme.com/>).

En ce qui concerne le Taux de Croissance Annuel Moyen (TCAM) de la production minière, il a été analysé dans le but d'estimer la croissance de la production sur le moyen terme ; dans les bases de données consultées il était calculé sur une décennie avec un lissage des données sur deux ans. Il a parfois été difficile de savoir si on parlait de la production minière, de celle métallurgique ou de la consommation. On fera donc l'hypothèse que, pour ne pas faire s'effondrer les prix, le marché n'a pas intérêt à laisser se constituer des stocks trop importants. En prenant un TCAM sur 10 ans lissé sur deux ans, il semble raisonnable de considérer que les mécanismes de rééquilibrage du marché font que les taux de croissance des productions minière et métallurgique, ainsi que celui de la consommation sont sensiblement les mêmes. En outre, lorsque l'on analyse les productions minière et métallurgique annuelles, ainsi que la consommation annuelle, il peut parfois y avoir des écarts significatifs entre les valeurs mentionnées, la production minière n'étant pas

toujours la plus élevée. Les écarts observés peuvent s'expliquer par la contribution du recyclage au travers de la ressource secondaire (EOL-RIR, *End-Of-Life Recycling Input Rate*), ainsi que par la présence d'éventuels stocks dus à la constitution de réserves ou à une surproduction l'année précédente, en lien avec les mécanismes de rééquilibrage des marchés, l'évolution des prix et l'anticipation éventuelle de certaines pénuries ponctuelles.

On notera par ailleurs que les HHI présentés dans le tableau sont des HHI5 (*cf.* Annexe H). Ils ont été arrondis à la centaine près afin de permettre une comparaison plus facile avec les chiffres de la littérature parfois normés entre 0 et 1. De plus, le HHI est un indicateur qui peut fluctuer d'une année sur l'autre en fonction des productions respectives des différents pays producteurs, c'est donc plus l'ordre de grandeur que la valeur précise qui compte. Quand, dans les données, il n'y avait pas les 5 premiers producteurs, le HHI a été calculé en ne considérant que les pays renseignés. N'ont aussi été pris en compte que les pays contribuant à plus de 1% de la production mondiale.

Les valeurs fournies pour les WGI sont quant à elles des valeurs moyennées pour chaque pays sur les six indicateurs concernés. Ces valeurs sont celles qui ont été utilisés dans les rapports de la Commission Européenne en 2020 pour mettre à jour sa liste des CRM (*cf.* Section 4.1, Annexe H et [49]–[52], [55]). Certaines ont peut-être été réévaluées depuis compte tenu des tensions internationales actuelles.

Pour plus de lisibilité, le Tableau 43, synthétisant l'ensemble de ces données et fourni dans les pages suivantes, est présenté sous forme de doubles pages permettant d'avoir ainsi l'ensemble des données regroupées pour une même ressource minérale. Le symbole * indique que ces éléments sont des terres rares et ** qu'ils appartiennent au groupe des platinoïdes (*cf.* Annexe B). Les éléments grisés sont ceux identifiés comme CRM à l'échelle de l'UE.

Tableau 43 : Synthèse des données des productions minière et métallurgique des différentes ressources considérées dans cette étude, ainsi que leurs utilisations principales, leur caractère plus ou moins substituable et leur recyclabilité.

Voir pages suivantes pour le tableau.

	Usages principaux	Prix US\$/t	Consommation mondiale	Production minière	Production métallurgique	TCAM sur 10 ans	Prévisions de croissance	HHIS	
								Minerai	Métal
Aluminium	95% de la bauxite est utilisée pour faire de l'alumine, dont 90% servent à produire l'Al utilisé dans le bâtiment 34%, les transports 30%, les équipements électriques	3700 (2020)	65 Mt/an (2018)	130 Mt/an Alumine	60 Mt/an (2018)	6%/an	Poursuite de la croissance de la demande	3300 Chine 55% Australie 15% Brésil 6% Inde 5% Russie 2%	3100 Chine 55% Russie 6% Inde 6% Canada 5% Emirats Arabes Unis 4%
Argent	52% fabrication industrielle (dont électronique, photovoltaïque, brasures et soudures), 20% joaillerie, 19% pièces et lingots	817857 (2020)	29 kt/an (2019)	26,5 kt/an	26,5 kt/an (4,8 kt/an pour la production secondaire)	1,9%/an	Stabilité de la consommation	1000 Mexique 23% Pérou 14% Chine 13% Russie 8% Australie 5%	Idem minerai
Cadmium	80% batteries, 18% pigments	2730 (2019)	16,2 kt/an (2011)	cf. Zn	26,4 kt/an	3%/an	Décroissance à moyen terme	cf. Zn	1500 Chine 31% Corée du Sud 19% Kazakhstan 10% Japon 8% Canada 7%
Chrome	96% ferrochrome utilisé par la suite pour différents aciers inoxydables, aciers au Cr et alliages au Cr (tous secteurs industriels dont transport et énergie)	2855 ferrochrome, 8066 Cr métal (2014)	8,4 Mt/an (2015)	8,4 Mt/an	7 Mt/an (dont 46 kt/an de Cr pour les alliages hautes performances)	4,2%/an	4%/an	3300 Afrique du Sud 54% Kazakhstan 14% Inde 11% Turquie 5% Finlande 3%	2500 Cr métal Russie 35% Chine 26% France 20% RU 15%
Cobalt	58% batteries, 15% superalliages, 7% carbures métalliques	31176 (2020) 50460 (été 2022)	123 kt/an (2019)	137,8 kt/an	125,9 kt/an	7,4%/an	7-10%/an 200 kt en 2025	5200 RDC 72% Philippines 4% Cuba 4% Russie 3% Australie 3%	4300 Chine 64% Finlande 11% Canada 5% Belgique 5% Norvège 4%
Cuivre	31% matériels électriques et électroniques, 29% bâtiment, puis infrastructures industrielles et transport générant ou utilisant l'électricité	6166 (2016) 7917 (été 2022)	23,4 Mt/an (2016)	20,2 Mt/an	19,4 Mt/an	2,8%/an	2-3%/an	1100 Chili 28% Pérou 12% Chine 9% USA 7% Australie 5%	1500 Chine 36% Chili 11% Japon 7% USA 5% Russie 4%
Dysprosium*	98% aimants permanents	290000 (2016)	854 t/an (2014)	1264 t/an	1000 t/an (estimée)	3,2%/an	6-8%/an	9400 Chine 97% Australie 1%	> 9000 Monopôle de la Chine
Etain	48% soudures pour applications électroniques et industrielles, alliages Ti-Al marginaux	18006 (2014) 25047 (été 2022)	359-394 kt/an (2013)	295 kt/an +/- 10 kt/an	398 kt/an +/- 20 kt/an	1,2%/an	1,7%/an	2000 Chine 33% Indonésie 26% Brésil 9% Birmanie 9% Pérou 8%	2600 Chine 47% Indonésie 16% Malaisie 9% Pérou 6% Brésil 6%
Fer	98% pour la métallurgie	120 minerai de Fe (2019) le prix des aciers varie fortement en fonction des nuances d'aciers	1900 Mt/an	1500 Mt/an	1900 Mt/an (liée directement aux aciers et aux fontes)	1%/an pour le minerai (forte croissance au début des années 2010 qui tend à stagner), mais 3,5%/an pour les aciers sur la même décennie	Reprise de la croissance de la production minière pour être en phase avec la croissance de la production d'aciers ?	2100 Australie 39% Brésil 17% Chine 15% Inde 9% Russie 4%	3000 Chine 54% Inde 6% Japon 5% USA 4% Russie 4%
Gallium	87% pour l'électronique et l'opto-électronique, 5% pour les cellules photovoltaïques	1280 (2014)	250-300 t/an (2013)	435 t/an	435 t/an	21%/an	Production excédentaire actuellement	Issu de la bauxite à 95%	6200 Chine 86% puis Allemagne, Japon, Russie, Ukraine (proportions non précisées)

	WGI		Réserves	Années de consommation restantes	HHIS des Réserves	Ressources (mesurées)	Substitutions possibles	Taux de recyclage	EOL-RIR
	Minerai	Métal							
Aluminium	Chine 5,83 Australie 2,36 Brésil 5,08 Inde 5,45 Russie 6,20	Chine 5,83 Russie 6,20 Inde 5,45 Canada 2,26 Emirats Arabes Unis 3,94	30000 Mt (bauxite)	>230 ans	Afrique 32% Océanie 23% Amérique du Sud 21% Asie 18% (non détaillé par pays)	55000-75000 Mt (bauxite)	Composites pour le transport et le bâtiment, bois pour le bâtiment, Mg et Ti dans les alliages, Cu pour les applications électriques	50-70%	12%
Argent	Mexique 5,33 Pérou 5,30 Chine 5,83 Russie 6,20 Australie 2,36	Idem minerai	503 kt	19 ans	1000 Pérou 18% Australie 18% Pologne 14% Russie 9% Chine 8%	Pas de données car l'Ag est exploité seul mais aussi en sous-produit du Pb, du Zn, du Cu et de l'Al	Cu et Al éventuellement pour les brasures et conducteurs électriques, mais performances moindres, Au mais plus cher	>50%	55%
Cadmium	cf. Zn	Chine 5,83 Corée du Sud 3,74 Kazakhstan 5,90 Japon 2,77 Canada 2,26	690 kt	26 ans	cf. Zn	cf. Zn (0,03% de Cd en moyenne dans le minerai de Zn)	Technologies Li-ion pour les batteries et Si pour le photovoltaïque, difficilement substituable sinon dans les usages qui concernent l'aéronautique	20% (batteries 80-85%)	20-25%
Chrome	Afrique du Sud 4,65 Kazakhstan 5,90 Inde 5,45 Turquie 5,34 Finlande 1,98	Cr métal Russie 6,20 Chine 5,83 France 3,11 RU 2,60	145 Mt	17 ans	4100 Kazakhstan 48% Afrique du Sud 41% Inde 11% Turquie 2%	12000 Mt	Non substituable car assure la résistance à l'oxydation des aciers	90% (surtout chutes de production des aciers inoxydables)	21%
Cobalt	RDC 7,60 Philippines 5,49 Cuba 5,87 Russie 6,20 Australie 2,36	Chine 5,83 Finlande 1,98 Canada 2,26 Belgique 2,81 Norvège 2,03	7 Mt	50 ans	2900 RDC 50% Australie 18% Cuba 7% Philippines 4% Canada 4%	120 Mt	Ni et Mn pour les batteries, Mo, Nb et Re pour les superalliages	35% UE 58% UNEP (surtout chutes de production)	35%
Cuivre	Chili 3,11 Pérou 5,30 Chine 5,83 USA 2,92 Australie 2,36	Chine 5,83 Chili 3,11 Japon 2,77 USA 2,92 Russie 6,20	777 Mt	39 ans	900 Chili 25% Pérou 11% Russie 8% USA 7% Mexique 7%	2100 Mt	Très difficile à substituer sans pertes de performances, éventuellement l'Al	55%	32%
Dysprosium*	Chine 5,83 Australie 2,36	Chine 5,83	601286 t	>700 ans (mais 56 ans si croissance de la demande de 6%/an)	7800 Chine 88% Australie 3% USA 2% Groënland 2%	>140 Mt tous oxydes de terres rares cumulés	Non substituable, sauf terbium tout aussi critique ou avec des technologies d'aimants beaucoup plus chères	<1%	<1%
Etain	Chine 5,83 Indonésie 5,47 Brésil 5,08 Birmanie 6,95 Pérou 5,30	Chine 5,83 Indonésie 5,47 Malaisie 4,39 Pérou 5,30 Brésil 5,08	2,1-4,8 Mt	7-16 ans	1600 Chine 31% Indonésie 17% Brésil 14% Bolivie 8% Australie 8%	11,2 Mt	Résines époxy éventuellement à la place de certaines soudures électroniques, mais peu substituable pour les usages concernés ici	>50%	32%
Fer	Australie 2,36 Brésil 5,08 Chine 5,83 Inde 5,45 Russie 6,20	Chine 5,83 Inde 5,45 Japon 2,77 USA 2,92 Russie 6,20	84 Mt (notion de réserves n'a pas beaucoup de sens en raison de l'abondance du minerai de Fe dans l'écorce terrestre et de son faible coût d'exploitation)	Aucun sens à la calculer	1500 Australie 28% Brésil 19% Russie 18% Chine 9% Inde 4%	230000 Mt	Base de tous les aciers, non substituable. Aciers peuvent être remplacés par le bois dans la construction, par les composites, alliages d'Al ou de Ti dans des applications à forte valeur ajoutée (plus légers mais plus chers), par les superalliages à très hautes températures	60%	31%
Gallium	Issu de la bauxite à 95%	Chine 5,83 Allemagne 2,47 Japon 2,77 Russie 6,20 Ukraine 6,23	1,35 Mt	>3000 ans	1400 bauxite Guinée 27% Australie 22% Brésil 9% Vietnam 8%, mais en pratique raffineries d'alumine 6000 Chine 74% Australie 19% Brésil 10% USA 4%	cf. Al, et Zn aussi, mais seul 10% du Ga présent (à 50 ppm) peut être exploité	Substitution possible dans le photovoltaïque par le silicium, mais peu substituable dans l'aéronautique	>40% uniquement les chutes de fabrication, <1% déchets en fin de vie	<1%

	Usages principaux	Prix US\$/t	Consommation mondiale	Production minière	Production métallurgique	TCAM sur 10 ans	Prévisions de croissance	HHIS	
								Minerai	Métal
Graphite	66 % fonderie pour les moules et creusets, 8% stockage de l'énergie	415-827 si paillettes ou amorphe (2016), 7000-20000 pour le synthétique	1 Mt/an	1 Mt/an	Pas de production métallurgique	7,4%/an	Poursuite de la croissance	6300 Chine 79% Brésil 8% Canada 3% Corée du Nord 3%	Pas de production métallurgique
Hafnium	45% superalliages, 26% machinerie (dont nucléaire)	887000 (2018)	70 t/an	Non renseignée, production métallurgique uniquement lors de la purification du Zr métal	70-80 t/an	Petits volumes et fortes incertitudes donc non quantifié	<i>a priori</i> tirée à la hausse par la croissance du trafic aérien et la construction de centrales nucléaires, mais sans être chiffrée	cf. Zr	3700 France 43% USA 41% Chine 8% Ukraine 8% éventuellement la Russie
Indium	56% écrans, 8% photovoltaïque, 5% batteries, 8% autres dont barres de contrôle pour le nucléaire	194000 (2016)	1,5 kt/an	cf. Zn	0,8 kt/an (2015)	5,1%/an	5,1%/an, portée surtout par le numérique	cf. Zn	3000 ressource primaire Chine 46% Corée du Sud 26%, Japon 9% Canada 9% France 5% 4200 ressource secondaire Japon 59% Chine 25% Belgique 8% Corée du Sud 7%
Iridium**	30% industrie électrique et électronique, 26% électrochimie, 16% autres (dont alliages et superalliages)	52250000 (2020)	8,2 t/an	8-8,5 t/an	Marginale	6-7%/an	A la hausse (électrolyseurs numérique et électronique)	Afrique du Sud Zimbabwe Russie USA Canada (pas de chiffres précis)	Afrique du Sud Russie (pas de chiffres précis)
Lantane*	44% catalyse chimique, 26% batteries, 10% alliages	6000 (2015)	36,5 kt/an (2012)	143 kt/an (tous oxydes de terres rares confondus)	Non renseignée	5,5%/an	Poursuite de la croissance de la demande	7800 tous oxydes de terres rares confondus Chine 88% Australie 5% USA 4% Russie 2%	Non renseigné
Lithium	37% batteries, 30% verres et céramiques, 10% autres dont alliages d'Al	13500 (2017) carbonate de Li	33 kt/an	36,5 kt/an	Li métal très minoritaire	6,3%/an	6,4-14,4%/an	2900 Australie 39% Chili 33% Argentine 16% Chine 6%	Non renseigné
Magnésium	55% pour le moulage de pièces industrielles, 28% dans les alliages notamment d'Al	2700 (2019)	1 Mt/an	Non précisée car sources multiples et pas que minérales (eau de mer)	1,1 Mt/an	5%/an	Poursuite de la croissance de la demande, voire augmentation	Non précisé car sources multiples et pas que minérales	6800 Chine 82% Russie 7% Kazakhstan 2% Israël 2% Brésil 1%
Manganèse	91% sidérurgie 4% alliages non ferreux 3% batteries	1000 (2019) ferroMn	18,2 Mt/an	19 Mt/an	21,5 Mt/an silicoMn et ferroMn (inclue donc les masses de Si et de Fe)	6%/an	Poursuite de la croissance de la demande, voire augmentation	1400 Afrique du Sud 29% Australie 17% Gabon 17% Ghana 7% Chine 7%	Pas de produit métallurgique pur, s'exploite sous la forme de silicomanganèse ou surtout de ferromanganèse
Molybdène	72% pour les aciers, 3% pour les superalliages	21600 (2020) ferroMo, 34700 Mo métal	265 kt/an (2018)	270 kt/an	248 kt/an (estimée)	2,3%/an	Croissance stable	2300 Chine 37% Chili 23% USA 15% Pérou 10% Mexique 8%	Chili USA Chine (% non spécifiés)

Vincent Marcadon, Tensions sur les ressources minérales : pourraient-elles impacter les trajectoires de décarbonation du trafic aérien mondial ?

	WGI		Réserves	Années de consommation restantes	HHIS des Réserves	Ressources (mesurées)	Substitutions possibles	Taux de recyclage	EOL-RIR
	Minerai	Métal							
Graphite	Chine 5,83 Brésil 5,08 Canada 2,26 Corée du Nord 7,74	Pas de production métallurgique	230 Mt	230 ans	3100 Turquie 39% Brésil 31% Chine 24%	800 Mt	Graphite synthétique pour les batteries de stockage, mais beaucoup plus cher	<1%	<1%
Hafnium	cf. Zr	France 3,11 USA 2,92 Chine 5,83 Ukraine 6,23 Russie 6,20	1,1 Mt (estimation sur la base des réserves de Zr)	15000 ans	cf. Zr	2 Mt pas d'évaluation précise, mais estimation possible à partir du Zr (1/50 pour le Hf)	Mg, Nb, Ta, Co, Cr pour les superalliages, composé Ag-Cd-In pour le nucléaire, Zr aussi partiellement sauf pour le nucléaire	<1%	<1%
Indium	cf. Zn	Ressource primaire Chine 5,83 Corée du Sud 3,74 Japon 2,77 Canada 2,26 France 3,11 ressource secondaire Japon 2,77 Chine 5,83 Belgique 2,81 Corée du Sud 3,74	380 kt (estimées)	500 ans mais 65 ans si poursuite croissance	500 estimé à partir des réserves de Zn riches en In Australie 13% Canada 12% Russie 11% Chine 7% Pérou 7%	cf. ressources Zn ou l'In est présent à des teneurs de 1-100 ppm	Oxydes de Zn ou Sn pour les écrans (moins chers mais moins performants), ou nano-tubes de C ou d'Ag, mais beaucoup plus chers, technologies CdTe ou silicium pour les panneaux photovoltaïques	70% uniquement les chutes de fabrication, sinon <1%	<1%
Iridium**	Afrique du Sud 4,65 Zimbabwe 7,17 Russie 6,20 USA 2,92 Canada 2,26	Afrique du Sud 4,65 Russie 6,20	1500 t	<175 ans	>9200 Afrique du Sud 96% Zimbabwe <1% Russie <1%	>100000 t (totalité des platinoïdes)	Autres platinoïdes (Pt et Ru), Mo, Nb, W et Re pour les superalliages, Mo, Ni, Ti, Zr pour la résistance à la corrosion	25-30% (estimé)	14%
Lantane*	Tous oxydes de terres rares confondus Chine 5,83 Australie 2,36 USA 2,92 Russie 6,20	Non renseigné	137000-375000 kt tous oxydes de terres rares confondus	Non renseigné	>2600 Chine 47% Russie 17% Groënland 8% Canada 6% Vietnam 5% mais incertitude possible > 4000 Chine > 63%	>140 Mt tous oxydes de terres rares cumulés	Très faible substituabilité sans augmentation des coûts ou pertes de performances, sauf éventuellement par d'autres terres rares aussi critiques	<1%	<1%
Lithium	Australie 2,36 Chili 3,11 Argentine 5,47 Chine 5,83	Non renseigné	8,3-14 Mt	277-384 ans mais seulement 44-52 ans si poursuite de la croissance de la demande	3500 Chili 52% Chine 22% Argentine 21% Australie 11%	89 Mt	Peu de substitutions possibles sans diminution significative des performances	1% (usages très dispersifs)	<1%
Magnésium	Chine 5,83 Russie 6,20 Kazakhstan 5,90 Israël 3,83 Brésil 5,08	Non précisé car sources multiples et pas que minérales	Non précisées car sources multiples et pas que minérales	Non précisé car sources multiples et pas que minérales	Non précisé car sources multiples et pas que minérales	> 13000 Mt (estimé compte tenu des différentes ressources possibles)	Al et Zn pour le moulage car moins chers, mais peu substituables dans l'ensemble	26-50%	13%
Manganèse	Afrique du Sud 4,65, Australie 2,36, Gabon 5,97, Ghana 4,94, Chine 5,83	Pas de produit métallurgique pur, s'exploite sous la forme de silicomanganèse ou surtout de ferromanganèse	810 Mt	43 ans	1800 Afrique du Sud 32% Brésil 17% Ukraine 17% Australie 12% Ghana 8%	Non précisées	Peu substituable	>50%	12%
Molybdène	Chine 5,83 Chili 3,11 USA 2,92 Pérou 5,30 Mexique 5,33	Chili 3,11 USA 2,92 Chine 5,83	18 Mt	67 ans	2700 Chine 46% Pérou 16% USA 15% Chili 8% Russie 5%	25 Mt	En théorie oui par Cr, V, Nb dans les aciers et W, Ni et Co pour les superalliages, mais dans les faits non car entraînerait des coûts plus élevés ou des baisses de performances, on joue plutôt sur les nuances d'alliages	25-50% (dont les 2/3 en boucle courte lors à la production des aciers, déchets de production)	30%

Vincent Marcadon, Tensions sur les ressources minérales : pourraient-elles impacter les trajectoires de décarbonation du trafic aérien mondial ?

	Usages principaux	Prix US\$/t	Consommation mondiale	Production minière	Production métallurgique	TCAM sur 10 ans	Prévisions de croissance	HHIS	
								Minerai	Métal
Néodyme*	89% aimants permanents	49900 (2013) 69300 Nd pur	19,9 kt/an (2012)	20 kt/an	Absence de données	3,2%/an	7%/an	6600 Chine 87% Australie 5% USA 3% Russie 2%	Chine Japon USA Malaisie France (% non spécifiés)
Nickel	67% aciers inoxydables, 11% superalliages, 7% alliages ferreux au Ni, 7% autre dont batteries	9488 (2016) 23619 (été 2022)	1,9 Mt/an (2015)	2,1 Mt/an	2,0 Mt/an	4,7%/an	Corrélée au développement économique mondial 2-3%/an	900 Philippines 22% Russie 12% Canada 11% Australie 10% Nouvelle-Calédonie 9%	1300 Chine 30% Russie 12% Japon 10% Canada 8% Australie 7%
Niobium	90% ferroniobium pour les aciers, 3% superalliages	32800 (2016)	55 kt/an (2015)	58 kt/an	80-85 kt/an	18,1%/an	7-8% / an (peut-être légèrement optimiste en raison de la surcapacité du marché actuel)	7700 Brésil 89% Canada 9% Russie 1%	8200 Brésil 90% Canada 10%
Platine**	40% catalyse automobile, 2% industrie électrique et électronique, 6% autres dont piles à combustible	34071429 (2017)	256 t/an (2016)	190 t/an	190 t/an	-1%/an	Reprise de la croissance suivant la production économique 2-3%/an	5400 Afrique du Sud 72% Russie 12% Zimbabwe 8% Canada 5%	Afrique du Sud Russie RU Allemagne Belgique (% non spécifiés)
Plomb	86% batteries	2400 (2020)	12,7 Mt/an (2019)	4,4 Mt/an	12,7 Mt/an	1,5%/an	Poursuite de la croissance de la demande	2400 Chine 47% Australie 10% Pérou 6% USA 6% Mexique 5%	2700 Chine 50% USA 9% Inde 6% Corée du Sud 5% Mexique 3%
Praséodyme*	73% aimants permanents	90000 (2015)	4,1 kt/an (2012)	143 kt/an (tous oxydes de terres rares confondus)	Non renseignée	6%/an	Poursuite de la croissance de la demande	7800 tous oxydes de terres rares confondus Chine 88% Australie 5% USA 4% Russie 2%	Non renseigné
Rhénium	80 % superalliages	1269000 (2019)	70 t/an (2018)	47 t/an	45 t/an	5,8%/ an sur 2014-2018 mais -4%/an sur 2008-2014 fluctuations au gré de la demande aéronautique	Reprise de la croissance avec le trafic aérien	3700 Chili 56% USA 18% Pologne 14% Chine 5% Kazakhstan 3%	Chili USA Pologne Chine Corée du Sud (% non spécifiés)
Sélénium	40% métallurgie, 10% électronique dont cellules photovoltaïques	39800 (2018)	3500 t/an (2017)	3600 t/an	3480 t/an	4%/an	Continuité de la croissance de la demande	900 Chili 24% Pérou 14% Chine 10% Australie 5% USA 4%	1400 Chine 22% Japon 22% Allemagne 20% Belgique 6% Russie 5%
Silicium	41% alliages Al et aciers, 18% photovoltaïque	50-100 quartz 1850 Si métal	2,9 Mt/an (2018)	3,8 Mt/an	3 Mt/an non issues du sable mais du quartz surtout, ainsi que du grès et du silice	5,1%/an	4,5%/an	cf. HHI métal car la production de Si métal se fait très souvent directement à proximité des carrières de quartz	4800 Chine 68% Brésil 8% USA 7% Norvège 6% France 4%
Tantale	43 % métallurgie, 18% superalliages	275000 (2019)	2000 t/an (2018)	1770 t/an	1500-1600 t/an	10,2%/an sur 2010-2017 mais -6,2%/an sur 2004-2010 à cause d'une surproduction fin des années 90 début 2000	4-5%/an (7%/an aéro)	2400 RDC 43% Rwanda 22% Chine 6% Brésil 6% Australie 6%	Chine USA-Australie-Japon (consortium) Allemagne Belgique (% non spécifiés)

Vincent Marcadon, Tensions sur les ressources minérales : pourraient-elles impacter les trajectoires de décarbonation du trafic aérien mondial ?

	WGI		Réserves	Années de consommation restantes	HHIS des Réserves	Ressources (mesurées)	Substitutions possibles	Taux de recyclage	EOL-RIR
	Minerai	Métal							
Néodyme*	Chine 5,83 Australie 2,36 USA 2,92 Russie 6,20	Chine 5,83 Japon 2,77 USA 2,92 Malaisie 4,39 France 3,11	7800-11300 kt	>400 ans (mais >50 ans si croissance de la demande de 6%/an)	> 6400 Chine >80% Australie 3% USA 2%	>140 Mt tous oxydes de terres rares cumulés	Pas de substitutions sans pertes de performances, sauf avec Pr tout aussi critique	<1%	<1%
Nickel	Philippines 5,49 Russie 6,20 Canada 2,26 Australie 2,36 Nouvelle-Calédonie 3,11	Chine 5,83 Russie 6,20 Japon 2,77 Canada 2,26 Australie 2,36	69 Mt	32 ans	600 Russie 13% Philippines 11% Indonésie 10% Cuba 10% Chine 9%	300 Mt	Pas de réelle substitution possible à part jouer sur les nuances d'alliages ou les technologies de batteries (Li-ion au lieu de NiMh)	57-63% (Ni peu recyclé sous forme pure mais sous forme alliée en boucle courte)	34%
Niobium	Brésil 5,08 Canada 2,26 Russie 6,20	Brésil 5,08 Canada 2,26	4300 kt	74 ans	9050 Brésil 95% Canada 5%	27000 kt	Peu substituable, V pour les aciers, Ta et W pour les superalliages	>50% sous forme alliée dans les circuits courts de production des aciers	<1% (très forte croissance de la demande)
Platine**	Afrique du Sud 4,65 Russie 6,20 Zimbabwe 7,17 Canada 2,26	Afrique du Sud 4,65 Russie 6,20 RU 2,60 Allemagne 2,47 Belgique 2,81	13000 t	68 ans	6800 Afrique du Sud 82% Zimbabwe 7% Russie 6%	>100000 t (totalité des platinoïdes)	Par un autre platinoïde (Pd), mais on cherche surtout à diminuer les quantités compte tenu de son prix	60-70 %	11%
Plomb	Chine 5,83 Australie 2,36 Pérou 5,30 USA 2,92 Mexique 5,33	Chine 5,83 USA 2,92 Inde 5,45 Corée du Sud 3,74 Mexique 5,33	90 Mt	20 ans	2100 Australie 40% Chine 20% Russie 7% Pérou 7% Mexique 6%	2000 Mt	Substitution possible dans les secteurs mineurs (câbles, réseaux d'eau potable ...), mais la part batteries croît	80-90%	75%
Praséodyme*	Tous oxydes de terres rares confondus Chine 5,83 Australie 2,36 USA 2,92 Russie 6,20	Non renseigné	137000-375000 kt tous oxydes de terres rares confondus	Non renseigné	>2600 Chine 47% Russie 17% Groënland 8% Canada 6% Vietnam 5% mais incertitude possible > 4000 Chine > 63%	>140 Mt tous oxydes de terres rares cumulés	Très faible substituabilité sans augmentation des coûts ou pertes de performances, sauf éventuellement par d'autres terres rares aussi critiques	10-20%	10%
Rhénium	Chili 3,11 USA 2,92 Pologne 3,60 Chine 5,83 Kazakhstan 5,90	Chili 3,11 USA 2,92 Pologne 3,60 Chine 5,83 Corée du Sud 3,74	2500 t	53 ans	3300 Chili 53% USA 16% Russie 12% Kazakhstan 8% Arménie 4%	Non précisées	Difficilement substituable pour les turbomachines militaires (très hautes températures), davantage pour les turbomachines civiles par W, Ta, Mo en choisissant d'autres nuances de superalliages	>50% (catalyseurs au Re et Pt réutilisés en circuit fermé, déchets de production pour les superalliages)	50% 20-25t/an
Sélénium	Chili 3,11 Pérou 5,30 Chine 5,83 Australie 2,36 USA 2,92	Chine 5,83 Japon 2,77 Allemagne 2,47 Belgique 2,81 Russie 6,20	100000 t	28 ans	800 Chili 21% Pérou 13% Russie 9% Chine 7% Mexique 6%	Non précisées	Bi et Te pour la métallurgie, technologies Si et CdTe pour les cellules photovoltaïques	<1%	<1%
Silicium	cf. WGI métal car la production de Si métal se fait très souvent directement à proximité des carrières de quartz	Chine 5,83 Brésil 5,08 USA 2,92 Norvège 2,03 France 3,11	Non connues quartz très présent sur Terre même si pour des raisons économiques on n'exploite que des quartz très purs en SiO ₂ pour l'instant	Ne peut être renseigné	Ne peut être renseigné	Non connues	Pas substituable en tant que tel, mais <i>via</i> l'utilisation d'autres nuances d'alliages ou d'autres technologies de cellules photovoltaïques	Négligeable	Négligeable
Tantale	RDC 7,60 Rwanda 5,17 Chine 5,83 Brésil 5,08 Australie 2,36	Chine 5,83 USA-Australie-Japon 2,92-2,36-2,77 Allemagne 2,47 Belgique 2,81	310000-330000 t (estimées)	180 ans environ	Non déterminé précisément avec Australie 23% Brésil 10% et une bonne répartition sur tous les continents, sauf l'Europe qui représente moins de 1% des réserves	Non précisées	Possible mais avec diminution des propriétés, superalliages Hf, Ir, Mo, Nb, W, Re, V en jouant sur les nuances d'alliages	20-30% plutôt bonne recyclabilité à partir des chutes de production (alliages et électronique) sinon très faibles taux de recyclage	<1% (très forte croissance de la demande)

Vincent Marcadon, Tensions sur les ressources minérales : pourraient-elles impacter les trajectoires de décarbonation du trafic aérien mondial ?

	Usages principaux	Prix US\$/t	Consommation mondiale	Production minière	Production métallurgique	TCAM sur 10 ans	Prévisions de croissance	HHIS	
								Minerai	Métal
Tellure	40% cellules photovoltaïques	64000 (2018)	450-550 t/an (2017)	1200 t/an tendance à surproduire	470 t/an	Stable -0,2%/an	Tendance à la stabilité	1100 Chili 28% Pérou 12% Chine 9% USA 6% RDC 5%	4000 Chine 61% USA 11% Suède 8% Russie 8% Japon 7%
Titane	95% oxydes de Ti (pigments), 5% Ti métal (dont 49% industrie dont énergie et 37% aéronautique civile)	7460 (2017) Ti métal	200 kt/an (2015) Ti métal	7008 kt/an oxyde de Ti	180 kt/an Ti métal	1,7%/an Ti métal	4,5%/an	876 TiO ₂ Afrique du Sud 16% Australie 15% Chine 15% Canada 11% Inde 7%	2410 Ti métal Chine 35% Japon 24% Russie 22% USA 10% Kazakhstan 5%
Tungstène	55% outils de coupe, 21% aciers, 7% autres dont superalliages	26660 (2017)	100 kt/an (2016)	89 kt/an	80 kt/an (estimée)	3,9 %/an	3-4%/an	6800 Chine 82% Vietnam 5% Russie 3% Canada 2%	Statistiques non disponibles mais la Chine est le principal producteur métallurgique
Vanadium	91% aciers, 4% alliages non ferreux	40500 (2017) oxyde de V	89 kt/an (2017) estimée	Non connue précisément car issue du traitement métallurgique du Fe	79 kt/an	3,2%/an	3%/an	Chine Russie Afrique du Sud Brésil (% non spécifiés)	3400 Chine 56% Russie 11% Afrique du Sud 10% Brésil 7%
Yttrium*	78% luminophores, 21% céramiques, 1% autres dont alliages	44000 (2015)	5,7 kt/an (2012)	143 kt/an (tous oxydes de terres rares confondus)	Non renseignée	6%/an	Poursuite de la croissance de la demande	7800 tous oxydes de terres rares confondus Chine 88% Australie 5% USA 4% Russie 2%	Non renseigné
Zinc	52% galvanisation, 16% bronzes et laitons, 15% autres alliages	2500 (2019)	13 Mt/an	13 Mt/an	13,8 Mt/an (primaire et secondaire)	1,5%/an	3,5%/an	1400 Chine 33% Pérou 11% Australie 10% Inde 6% Canada 6% USA 6%	2300 Chine 46% Corée du Sud 7% Inde 6% Canada 6% Espagne 4%
Zirconium	97% sous forme d'oxyde de zirconium, 3% sous forme métal dont 2/3 nucléaire et 1/3 autres dont alliages aéronautiques	30700 (2017) Zr métal	1300 kt/an oxyde de Zr	1400 kt/an	7 kt/an	3,5%/ an	3,5%/an	2400 Australie 40% Afrique du Sud 27% Chine 7% Mozambique 5% Sénégal 4%	2878 USA 43% France 26% Russie 14% Chine 11% Inde 6%

	WGI		Réserves	Années de consommation restantes	HHIS des Réserves	Ressources (mesurées)	Substitutions possibles	Taux de recyclage	EOL-RIR
	Minerai	Métal							
Tellure	Chili 3,11 Pérou 5,30 Chine 5,83 USA 2,92 RDC 7,60	Chine 5,83 USA 2,92 Suède 2,05 Russie 6,20 Japon 2,77	31000-46000 t	>106 ans	800 Chili 21% Pérou 13% Russie 9% Chine 7% Mexique 6%	Non précisées	Substitution avec diminution de performances par Bi, Ca, Pb, P, Se et S	<1%	<1%
Titane	TiO ₂ Afrique du Sud 4,65 Australie 2,36 Chine 5,83 Canada 2,26 Inde 5,45	Ti métal Chine 5,83 Japon 2,77 Russie 6,20 USA 2,92 Kazakhstan 5,90	813000 kt TiO ₂	120 ans (51 ans si croissance 3%/an)	1484 TiO ₂ Chine 27% Australie 21% Inde 13% Afrique du Sud 9% Kenya 8%	2000000 kt	Al, Ni, Zr et aciers spéciaux pour la tenue à la corrosion, Al, superalliages et aciers spéciaux pour la tenue mécanique	Recyclabilité sous forme d'oxyde négligeable car usage dispersif mais 91% pour le Ti métal (déchets de production)	19% Ti métal
Tungstène	Chine 5,83 Vietnam 5,75 Russie 6,20 Canada 2,26	Chine 5,83	3150 kt	39 ans	3700 Chine 60% Canada 9% Vietnam 3% Russie 3%	6300 kt	Possible mais avec diminution de performances, Mo pour les aciers, Mo, Ti ou composites pour les outils de coupe	10-25%	42% (valeur très haute compte tenu du taux de recyclage et de la croissance de la demande)
Vanadium	Chine 5,83 Russie 6,20 Afrique du Sud 4,65 Brésil 5,08	Chine 5,83 Russie 6,20 Afrique du Sud 4,65 Brésil 5,08	18800 kt	238 ans	3400 Chine 48% Russie 26% Afrique du Sud 19% Australie 7%	>63000 kt	Aucun substitution pour les alliages de Ti, mais pour les autres alliages W, Ti, Ta, Mn, Mo, Nb	Dépend des types d'aciers	<10% (44% à l'échelle de l'UE)
Yttrium*	Tous oxydes de terres rares confondus Chine 5,83 Australie 2,36 USA 2,92 Russie 6,20	Non renseigné	137000-375000 kt tous oxydes de terres rares confondus	Non renseigné	>2600 Chine 47% Russie 17% Groënland 8% Canada 6% Vietnam 5% mais incertitude possible > 4000 Chine > 63%	>140 Mt tous oxydes de terres rares cumulés	Très faible substituabilité sans augmentation des coûts ou pertes de performances, sauf éventuellement par d'autres terres rares aussi critiques	<1%	<1% (31% à l'échelle de l'UE)
Zinc	Chine 5,83 Pérou 5,30 Australie 2,36 Inde 5,45% USA 2,92	Chine 5,83 Corée du Sud 3,74 Inde 5,45 Canada 2,26 Espagne 3,62	250 Mt	19 ans	1200 Australie 26% Chine 18% Mexique 9% Russie 9% Pérou 8%	1900 Mt	Facilement substituable Al pour la galvanisation, ou plastics, alliages d'Al ou de Mg plutôt que les laitons ou les bronzes pour certaines applications	>50%	31%
Zirconium	Australie 2,36 Afrique du Sud 4,65 Chine 5,83 Mozambique 5,93 Sénégal 5,21	USA 5,92 France 3,11 Russie 6,20 Chine 5,83 Inde 5,45	74400 kt	53 ans (38 ans avec croissance 1,8%/an)	4400 Australie 63% Afrique du Sud 19% Inde 4% Mozambique 2% Chine 1%	100000 kt	Nb, Ta et aciers inoxydables pour le nucléaire, Hf pour les alliages aéronautiques	<1%	1-10% pour Zr métal