

Analyse prospective pour la filière spatiale
DES RISQUES
liés aux limites planétaires
et aux disponibilités des ressources



Septembre 2024



carbone4

Auteurs Carbone 4

Hughes-Marie AULANIER, Principal

Sami LABAT TAHRI, Chef de projet

Apoline RIET, Consultante



Avec la contribution du CNES

TABLE DES MATIÈRES

- 1 INTRODUCTION [P. 2]**
 - Contexte [P. 2]
 - Contenu [P. 2]
- 2 CADRAGE DE L'ÉTUDE [P. 3]**
 - Limites de l'étude [P. 3]
 - Dictionnaire des risques [P. 4]
 - Experts sollicités [P. 5]
- 3 ANALYSE PROSPECTIVE DES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX [P. 6]**
 - Visualisation des données [P. 6-7]
 - Analyse synthétique [P. 8-9]
- 4 ANALYSE PROSPECTIVE DES RISQUES GÉOPOLITIQUES [P. 10]**
 - Titane métal [P. 10-13]
 - Semi-conducteurs [P. 14-17]
 - Terres rares [P. 18-20]
- 5 CONCLUSION [P. 21]**
- 6 BIBLIOGRAPHIE [P. 22-23]**

ANNEXE 1 : Glossaire [P. 24]

ANNEXE 2 : Table des figures [P. 25]

ANNEXE 3 : Dictionnaire des risques [P. 26-35]



INTRODUCTION

Contexte

Les bouleversements environnementaux (dérèglement climatique, effondrement de la biodiversité, pénuries de ressources, ...) vont avoir des conséquences sur l'ensemble des secteurs économiques. Afin de s'y préparer, et de pouvoir disposer d'un secteur spatial résilient face aux conséquences de ces bouleversements, cette étude a pour but d'identifier les différents risques environnementaux auxquels la filière spatiale française pourrait être exposée, à la suite du dérèglement climatique, à la limitation des ressources et aux limites planétaires.

L'étude porte sur les activités spatiales françaises de toutes natures, associées aux phases de développement, de lancement, d'exploitation, de maintien en conditions opérationnelles et de retrait de service, suivant un horizon temporel court et moyen termes. En revanche, elle ne prend pas en compte les applications situées en aval (distribution et utilisation des données, terminaux utilisateurs, etc.).

Les activités spatiales françaises, ici considérées, intègrent :



Les activités liées aux segments sol : base de lancement, centre de contrôle, stations d'émission et de réception, simulateur numérique, centre de mission, etc.



Les activités liées aux segments spatiaux : lanceur, satellite, charge utile, station spatiale, etc.

L'étude se limite à la sphère « Terre » (incluant la haute atmosphère), et ne traite pas des risques orbitaux (congestion de l'espace, confiscation des orbites,

pollutions lumineuse et de radiofréquences, etc.) ni de potentielles activités minières extra-atmosphériques. Elle s'intéresse à la totalité de l'écosystème œuvrant pour la filière spatiale : état, agences, industriels, communauté académique, etc.



© AdobeStock

Contenu

Cette étude comporte plusieurs phases :



CADRAGE DE L'ÉTUDE ET DÉFINITION MÉTHODOLOGIQUE



ANALYSE PROSPECTIVE DES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX

au moyen d'une revue de la littérature et des entretiens avec des experts, les risques environnementaux sur les activités spatiales sont identifiés et répertoriés dans un « dictionnaire des risques »



ANALYSE PROSPECTIVE DES RISQUES GÉOPOLITIQUES

Des ressources prioritaires sont identifiées à l'issue de la phase II, et les risques géopolitiques susceptibles d'impacter leur disponibilité pour les activités spatiales sont analysés. ■



Limites de l'étude

L'étude se limite ici aux risques environnementaux pour la filière spatiale. Ainsi, les réglementations comme celles liées aux réservations de fréquences via l'UIT (Union Internationale des Télécommunications), ou bien les normes américaines ITAR (International Traffic in Arms Regulation) et EAR99 (Export Administration Regulation) sont considérées hors du périmètre de cette étude, car elles n'ont pas de visée environnementale, contrairement, par exemple, à la réglementation européenne REACH.

Par ailleurs, la substituabilité des matières premières a parfois été étudiée à un niveau macroéconomique, c'est-à-dire au niveau de l'ensemble des filières industrielles. Le secteur spatial étant un secteur aux exigences de qualité de matière très spécifique, certaines substitutions évoquées peuvent ne pas être envisageables pour le secteur, ou parfois limitées à certains usages.

De même, les ruptures d'approvisionnement potentielles issues des matières premières ont été investiguées du point de vue macroéconomique, sans prendre en compte les exigences de qualité spécifiques à la filière spatiale (p.ex. niveau de pureté des minerais).

Par ailleurs, cette étude ne traite pas des activités spatiales extraterritoriales, c'est-à-dire transnationales, imaginables à long terme.

L'étude n'aborde pas les risques économiques susceptibles d'affecter le secteur spatial. Ces risques sont traités

de manière indirecte par ceux liés à l'accès aux ressources, c'est-à-dire au travers des flux physiques et non au travers des flux financiers.

Les risques humains comme l'attrait des jeunes talents pour la filière spatiale ne font pas partie du périmètre de l'étude.

L'étude n'aborde pas non plus les conséquences financières et opérationnelles pour la filière spatiale française d'une raréfaction des énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon), ces risques étant non-spécifiques à la filière spatiale car structurels à l'économie d'aujourd'hui et déjà très documentés dans d'autres études (p.ex. celles de l'Agence Internationale de l'Energie).

Enfin, il est à noter que l'étude s'est concentrée principalement sur les matières premières nécessaires pour la filière spatiale, et n'a pas été élargie à l'ensemble des substances intermédiaires utilisées pour la fabrication des produits finis ou semi-finis – faisant preuve de processus complexes et parfois rendus opaques du fait de leur secret industriel.





Dictionnaire des risques

Les risques identifiés dans cette étude proviennent des conséquences potentielles du dérèglement climatique, de la limitation des ressources, des limites planétaires et des éventuels conflits géopolitiques sur la filière spatiale française.

Les risques considérés sont exclusivement liés à des données physiques (e.g. minerais, gaz, empreinte carbone, eau, couche d'ozone) et non à des aspects économiques, financiers ou humains. Ces risques prennent en considération tous les éléments de la chaîne de valeur des activités spatiales, incluant notamment les phases amont (e.g. phase de recherche et développement), d'exploitation et de retrait de service (e.g. rentrée dans l'atmosphère).

Le « **DICTIONNAIRE DES RISQUES** » répertorie l'ensemble des risques identifiés, les définit et les évalue selon les critères suivants :

- **Intitulé du risque**
- **Type de risque**
- **Définition du risque**
- **Nature de l'impact**
- **Horizon temporel**
- **Probabilité d'occurrence**
- **Rationnel de la notation de probabilité**
- **Gravité**
- **Rationnel de la notation de gravité**
- **Criticité**
- **Indice de confiance**
- **Commentaire général**
- **Sources**



Le champ « **Intitulé du risque** » permet de désigner le risque au moyen d'un nom synthétique.

Le « **Type de risque** » vise à distinguer les risques liés aux 9 limites planétaires (telles que définies par le Stockholm Resilience Center), ceux liés aux ressources minérales et ceux liés aux autres ressources (énergie, gaz, etc.).

Les liens de causalité entre le risque et la filière spatiale sont ensuite explicités et détaillés dans le champ « **Définition du risque** ».

Le champ « **Nature de l'impact** » vise à catégoriser le risque selon son origine (par exemple norme réglementaire, chaîne d'approvisionnement, problématique technologique, etc.)

Le champ « **Horizon temporel** » vise à distinguer les risques qui sont attendus plutôt à court terme de ceux d'un horizon plus long terme. Le champ est alors rempli des dates « 2030 » et « 2050 » qui correspondent à des dates indicatives rappelant l'un ou l'autre de ces horizons. Ces horizons temporels ont notamment été choisis en cohérence avec les jalons pour l'atteinte du « Zéro émission carbone nette » en Europe. Il est à noter qu'un horizon temporel à 2030 signifie que le risque est attendu dès 2030, donc à court terme, mais n'exclut pas le fait qu'il soit toujours valable à long terme, à horizon 2050.

Le champ « **Probabilité d'occurrence** » est rempli d'une note qualitative entre 1 et 5. Le chiffre « 1 » indique que la probabilité d'occurrence est très faible ou peu probable tandis que la note de « 5 » indique que le risque est quasi-certain.

Le champ « **Rationnel de la notation de probabilité** » détaille et justifie la note choisie.

CADRAGE DE L'ÉTUDE



Les champs « **Gravité** » et « **Rationnel de la notation de gravité** » fonctionnent de manière analogue aux champs de probabilité, via une note entre 1 et 5. Le chiffre « 1 » indique ainsi que le risque, s'il venait à advenir, aurait un impact très faible sur les activités spatiales françaises, tandis que le chiffre « 5 » indique un risque qui aurait une gravité très élevée en cas d'occurrence.

Le champ « **Criticité** » est le résultat de la multiplication des champs « Probabilité d'occurrence » et « Gravité » et vise à produire une note entre 1 et 25 à chaque risque afin de les classer entre eux.

Le champ « **Indice de confiance** » précise le niveau de confiance accordé à la note de criticité. Une note de 2 indique une confiance élevée dans le résultat, car corroboré par plusieurs sources et/ou faits, alors qu'une note de 1 indique une confiance relative, liée parfois à l'application d'un « principe de précaution » amenant à une évaluation plus élevée du risque.

Le champ « **Commentaire général** » précise certains éléments de contexte ou de réflexion concernant ce risque. Ce champ peut aussi contenir des éléments chiffrés permettant d'objectiver le risque.

Enfin, le champ « **Sources** » indique les sources (article académique, entretien expert, etc.) utilisées pour l'étude du risque.



© AdobeStock

Experts sollicités

Au titre de cette étude, plusieurs échanges avec des experts ont eu lieu :

- **Marlène de Bank**, ingénieure de recherche chez « *The Shift Project* », ancienne ingénieure chez ArianeGroup.
- **Thierry Battault**, chef du service Qualité Technologies, Matériaux et Procédés au CNES, accompagné de Pascal Durand, expert matériaux et qualité sur ces sujets.
- **Philippe Bihoux**, expert en ressources minérales et promoteur des low-techs.
- **Marieke Van Lichtervelde**, chargée de recherche à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), experte de la minéralisation en métaux rares, de la pétrologie et de la minéralogie.
- **Olivier Vidal**, directeur de recherche au CNRS, expert sur les liens entre ressources minérales, énergie et économie.

Ces différents échanges ont permis d'approfondir les enjeux identifiés dans un cadre propre à l'industrie spatiale, et d'explorer des sujets spécifiques à certaines ressources.

Les apports de ces experts sont signalés dans le champ « **Source** » du dictionnaire des risques en tant qu'« **entretien expert** », sans que ces apports ne soient nominatifs.

ANALYSE PROSPECTIVE DES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX



Visualisation des données

Le dictionnaire des risques contient **44 risques**. Les graphiques suivants offrent une visualisation du contenu du dictionnaire des risques et une vue d'ensemble synthétique des résultats de l'étude.

Les risques identifiés au cours de l'étude concernent majoritairement les **ressources minérales** (28 risques).

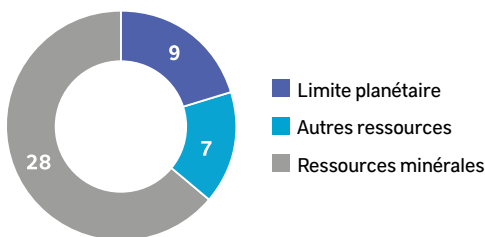


Figure 1 : Répartition des risques identifiés selon leur type

Les risques identifiés concernent majoritairement des **ruptures d'approvisionnement** (33 risques) ainsi que des **normes réglementaires** (9 risques).

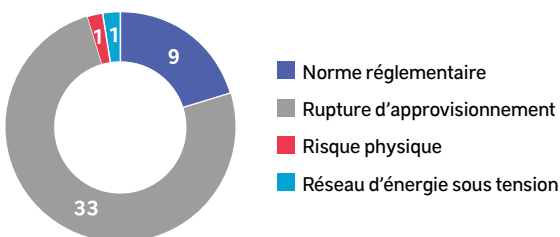


Figure 2 : Répartition des risques identifiés selon la nature de l'impact

Les risques identifiés concernent principalement un horizon de temps à **long terme**. Il est à noter qu'un horizon temporel à 2030 signifie que le risque est significatif dès 2030, donc à **court terme**, mais n'exclut pas le fait qu'il soit toujours valable à long terme, à horizon 2050.

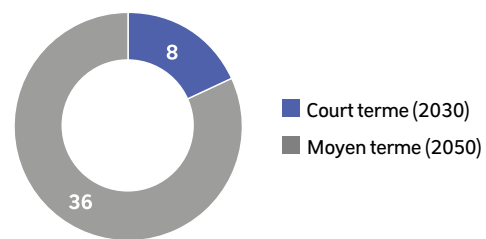


Figure 3 : Répartition des risques selon l'horizon temporel

Certains risques ont un indice de confiance faible. Ce niveau concerne 9 risques, soit 20% des risques identifiés.

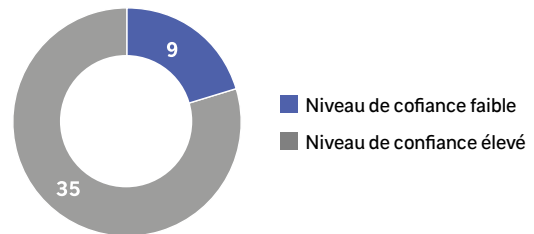


Figure 4 : Répartition des risques selon leur niveau de confiance

Parmi l'ensemble des risques identifiés, **7 ont une criticité élevée** (supérieure ou égale à 15).

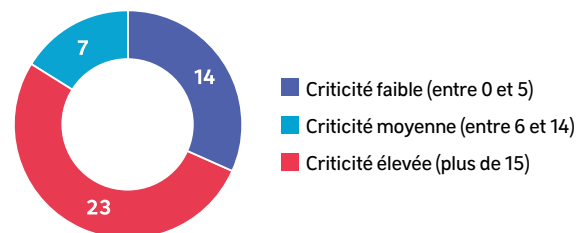


Figure 5 : Répartition des risques selon leur niveau de criticité

ANALYSE PROSPECTIVE DES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX



Les **risques ayant une criticité supérieure à 15** sont entourés en rouge dans la figure ci-dessous. Dans le détail, ces risques sont les suivants :

- Réglementation sur la destruction de la couche d'ozone stratosphérique,
- Restrictions des émissions en haute atmosphère liées à leur impact climatique,
- Pénurie de semi-conducteurs,
- Pénurie de produits de collage à faible dégazage,
- Pénurie de titane,
- Budget carbone pour la filière spatiale,
- Pénurie d'éléments terres rares.

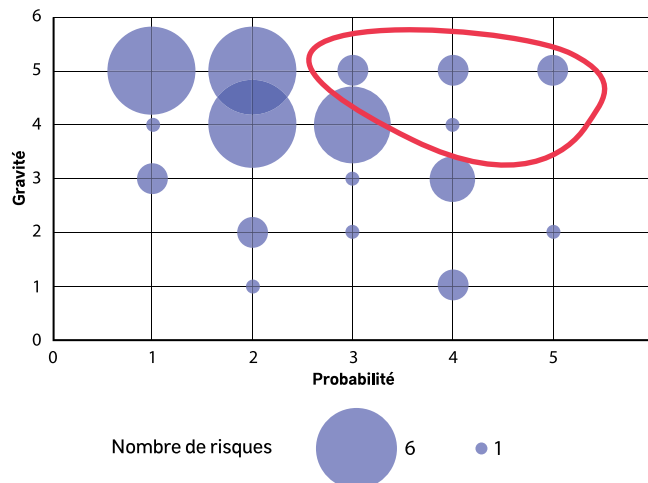


Figure 6 : Répartition des risques identifiés selon leur probabilité et leur gravité

Le tableau ci-dessous propose une vision plus détaillée sur ces **7 risques de criticité supérieure à 15**. Ces informations sont extraites du dictionnaire des risques, disponible en annexe.

Intitulé du risque	Type de risque	Horizon
Réglementation sur la destruction de la couche d'ozone stratosphérique	Limite planétaire	2030
Restrictions des émissions en haute atmosphère liées à leur impact climatique	Limite planétaire	2030
Pénurie de semi-conducteurs	Autres ressources	2030
Pénurie de produits de collage à faible dégazage	Autres ressources	2050
Pénurie de titane	Ressources minérales	2050
Budget carbone pour la filière spatiale	Limite planétaire	2050
Pénurie d'éléments terres rares	Ressources minérales	2050

Figure 7 : Détail sur les risques de criticité supérieure à 15

ANALYSE PROSPECTIVE DES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX



Mine d'extraction de silicium à ciel ouvert © istock

Analyse synthétique

La phase II que constitue l'étude prospective des risques environnementaux, entendus au sens large et incluant autant les limites planétaires que les matières premières, a permis d'identifier 44 risques pour la filière spatiale française, dont le détail est disponible en annexe. Grâce à l'appui de plusieurs experts du secteur, cette liste, qui est par essence non-exhaustive, a permis d'élaborer plusieurs conjectures résumées ci-dessous sur la sensibilité de la filière spatiale aux risques environnementaux.

Les principaux risques mis en avant par l'étude concernent les impacts sur la haute atmosphère, actuellement méconnus mais de nature à affecter la couche d'ozone et le climat, et qui pourraient déboucher sur des réglementations. À l'heure actuelle, les conséquences des émissions en hautes atmosphères produites lors du lancement et de la rentrée atmosphérique constituent en effet une zone d'ombre académique qu'il faudra réussir à préciser à l'avenir. L'identification de ces risques pesant sur le climat et la couche d'ozone met ainsi en lumière toute l'importance

que constitue la diminution de l'empreinte environnementale de la filière spatiale, incluant la décarbonation de ses activités.

De leur côté, les risques d'approvisionnement entourant les matières premières critiques pour l'industrie spatiale (par exemple cuivre, nickel ou cobalt) ont un potentiel d'impact faible lorsque la présence géologique de ces matières est diversifiée à l'échelle du globe. Concrètement, en cas de déséquilibre offre-demande sur les marchés de matières premières, une augmentation du prix de la matière aurait un impact limité sur l'industrie du spatial. En effet, l'industrie spatiale dans son ensemble se caractérise par des activités de recherche & développement importantes et par un volume de production plus faible en comparaison avec d'autres filières industrielles traditionnelles (industrie automobile, industrie lourde, industrie aéronautique) qui ont des volumes de production plus importants.

De même, lorsqu'un pays concentre la majorité de la production mondiale d'une matière première critique dont la présence est néanmoins diversifiée au niveau mondial (par exemple, le silicium en Chine), une rupture d'approvisionnement consécutive à des tensions géopolitiques serait fort probablement jugulée à terme par

ANALYSE PROSPECTIVE DES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX



l'émergence de nouvelles filières de production. Ainsi, sans exclure la possibilité d'une hausse des prix de certaines matières premières ou de tensions temporaires sur leur approvisionnement, **les activités de la filière spatiale française ne sauraient être durablement impactées pour ce qui concerne la plupart des matières premières critiques à son bon fonctionnement.** Notons qu'à ce stade, il n'a pas été identifié de ressource critique qui échappe à ce schéma.

En revanche, et même si l'approvisionnement de la plupart des matières premières ne constitue pas un risque au premier ordre pour les activités de la filière, **il est nécessaire de rappeler ici que cela ne dédouane pas la filière spatiale française d'une prise de responsabilité au sujet des pollutions environnementales et des enjeux de droits humains en lien avec l'extraction minière des métaux qu'elle utilise.** De récentes études (SystExt, 2021. « *Controverses minières : Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minières* ») démontrent en effet aujourd'hui que les activités d'exploitation minières impactent négativement et durablement la biodiversité dans les zones où elles ont lieu. Dès lors, il incombe à la filière spatiale française un double rôle à jouer : d'abord auprès de ses fournisseurs de matières afin de les pousser à se questionner sur les impacts potentiellement délétères de leurs techniques d'exploitation, mais aussi et surtout en questionnant les usages finaux des activités qu'elle génère et leur pertinence pour les sociétés humaines.

Enfin, cette étude a permis de mettre en lumière **deux autres types de risques qui présentent une criticité supérieure ou égale à 15** : ceux concernant des produits spécifiques à l'industrie spatiale dont la production est vulnérable en ce qu'elle fait intervenir de très nombreuses substances dans sa formule (produits à faible dégazage), et ceux concernant les produits dont les chaînes d'exploitation et de production sont com-

plexes et potentiellement vulnérables face aux tensions géopolitiques (titane métal, semi-conducteurs, terres rares).

Ces trois éléments (titane métal, semi-conducteurs, terres rares) font l'objet d'une étude plus approfondie spécifique aux risques géopolitiques dans la partie suivante. En revanche, les produits à faible dégazage n'ont pas pu faire l'objet d'une analyse de risques géopolitique du fait de la complexité de leur production et du secret industriel entourant leur formule chimique. ■



Vue sur les nuages et la couche d'ozone depuis la station Mir
© CNES/HAIGNERE Jean-Pierre, 1999

ANALYSE PROSPECTIVE DES RISQUES GÉOPOLITIQUES



© istock

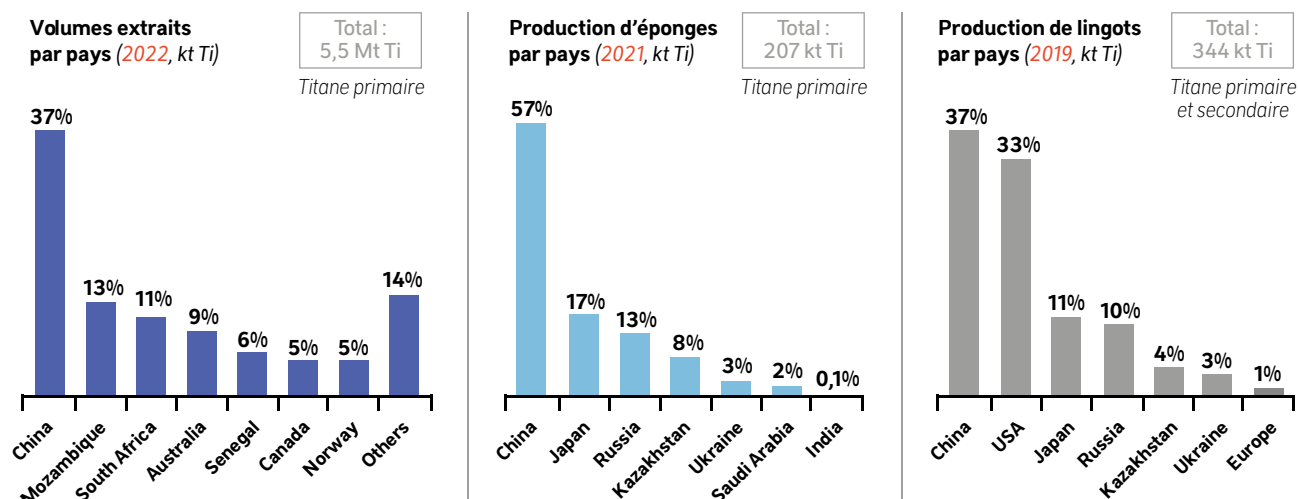
Titane métal

Définition et ordre de grandeur sur la production de titane métal

La production de titane métal nécessite trois macro-étapes distinctes : l'exploitation minière de sables minéralisés, la production d'éponges de titane par le processus de Kroll, puis la transformation des éponges en lingots de titane via des procédés métallurgiques.

L'exploitation minière commence par l'extraction de deux types de sable minéral lourd dans lesquels le minerai de titane est présent : l'ilménite et le rutile. D'après l'USGS (Mineral Commodity Summaries 2023), les réserves prouvées de minerai de titane s'élèvent à environ 420 Mt Ti dans le monde, principalement en Chine (27%) et en Australie (24%). Les réserves prouvées sont ainsi en théorie suffisantes pour assurer plus de 70 ans de production mondiale, au rythme de production actuel.

Le travail exposé précédemment a permis de sélectionner trois ressources critiques pour la filière spatiale française, notamment en s'appuyant sur l'évaluation de leur niveau de criticité. Cette présente section propose une analyse prospective des risques géopolitiques associés aux chaînes de valeur du titane métal, des semi-conducteurs et des terres rares.



Sources : BRGM (Fiche de synthèse sur la criticité des métaux - Le titane, septembre 2017), Minerai Info (Marché du titane, un métal stratégique pour l'industrie européenne, cycle 2018-2020), Statista (Mine production of titanium minerals worldwide in 2022, by country), US Geological Survey (titanium & titanium dioxide, 2022). © Réalisation Studio graphique du CNES

Figure 8 : Production de titane extrait (2022), d'éponges (2021) et de lingots de titane (2019) par pays

ANALYSE PROSPECTIVE DES RISQUES GÉOPOLITIQUES

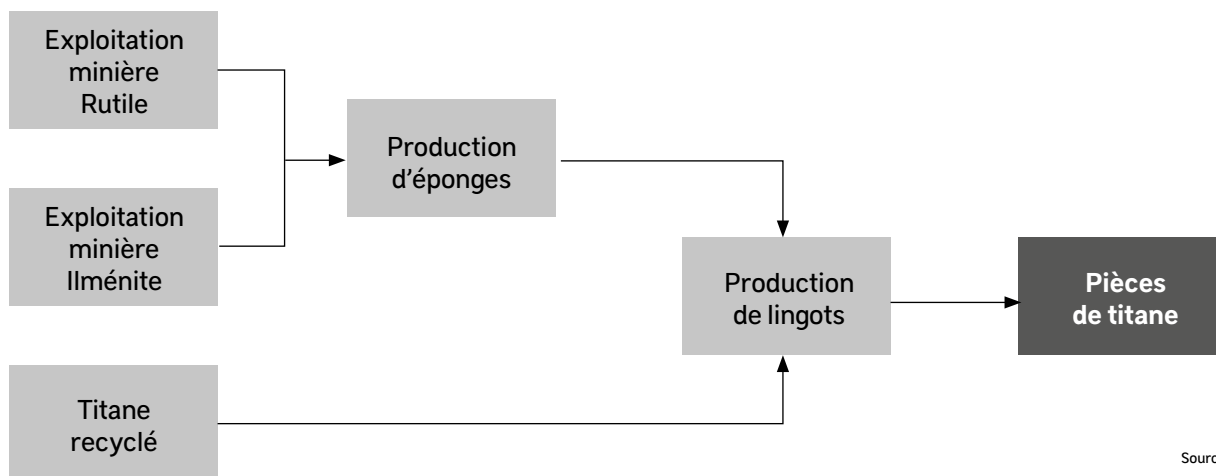


Le titane est alors raffiné sous deux formes : 95% sous forme « TiO₂ » à destination des secteurs alimentaire et cosmétique, et 5% sous forme « Ti » à destination des secteurs aéronautique et spatial (BRGM, 2017. Fiche de synthèse sur la criticité des métaux – Le titane). Le raffinage du Ti est d'abord effectué grâce au processus de Kroll qui permet de produire des éponges de titane. Puis ces éponges sont transformées via des processus métallurgiques de fusion faisant intervenir une importante quantité d'énergie, afin d'obtenir des lingots de titane.

Notons ici que le total de la production de lingots au niveau mondial est nettement supérieur à la production d'éponges. Ceci s'explique par le fait que les lingots peuvent également être produits à partir de titane recyclé à partir des copeaux produits lors de l'usinage, en lieu et place des éponges, comme en témoigne la figure suivante :



© Adobe Stock



Source : Carbon 4

Figure 9 : Processus simplifié de production du titane métal

ANALYSE PROSPECTIVE DES RISQUES GÉOPOLITIQUES



Analyse géopolitique

Historiquement, la filière spatiale européenne s'est majoritairement fournie en titane provenant de Russie, notamment auprès de l'entreprise russe VSMPO-Avisma (qui déclare produire 25% de la production mondiale). Cependant, le conflit ukrainien a mis en lumière les limites d'un tel modèle d'approvisionnement, basé principalement sur une seule source.

En effet, depuis février 2022, des mesures ont été mises en place afin de limiter les échanges commerciaux avec la Russie : le conseil de l'Union Européenne indique que 58% des importations russes sont aujourd'hui soumises à des sanctions. Sont notamment concernés par ces sanctions le pétrole, le charbon, l'acier et les produits sidérurgiques. Le titane ne fait pas partie de cette liste, mais il n'est pas exclu que ses importations depuis la Russie soient également soumises à des sanctions à l'avenir. Notons également que les biens et technologies de l'Union Européenne des secteurs de l'aviation et de l'espace sont d'ores et déjà interdits d'exportation vers la Russie.

Pour amoindrir la dépendance du secteur aérospatial au titane venant de Russie, trois filières de production constituent aujourd'hui des alternatives :

- **Les filières kazakhe et japonaise**, dont les prévisions de croissance de la production d'éponges de titane pourraient compenser un arrêt des exportations russes, d'après un rapport de la commission européenne (JRC 2022, Titanium metal: Impact assessment for supply security)
- **La filière française**, notamment au travers de l'entreprise Aubert&Duval, récemment rachetée par un consortium composé notamment d'Airbus et de Safran. L'entreprise fournit des pièces pour les

lanceurs Ariane, pour l'ISS et pour différents satellites. La France est ainsi devenue le premier producteur de lingots de titane de l'Union, en totalisant 65% de la production européenne (JRC 2022, Titanium metal : Impact assessment for supply security), sans pour autant pouvoir répondre à l'ensemble des besoins en titane de la filière.

- **La filière américaine**, vers laquelle s'est tournée l'entreprise Boeing après l'ouverture du conflit en Ukraine. Afin de mettre un terme à son approvisionnement chez VSMPO-Avisma, Boeing s'est en effet appuyé sur trois groupes américains : Titanium Metals Corporation, Allegheny Technologies Incorporated et RTI International Metals.



Décollage du vol V262 FM1 Ariane 6
© CNES/ESA/Arianespace-ArianeGroup/Optique Vidéo CSG/P Piron, 2024

ANALYSE PROSPECTIVE DES RISQUES GÉOPOLITIQUES



Illustration du satellite Swot © CNES/Mira Productions, 2022

Synthèse pour le titane metal pour la filière spatiale française

La filière spatiale française est aujourd'hui soumise à plusieurs obstacles qui réduisent son champ des possibles en termes d'approvisionnement de titane métal :

- Les approvisionnements depuis la Russie, l'Ukraine ou le Kazakhstan ne doivent pas être considérés comme des sources d'approvisionnement fiables à long terme compte tenu des conflits géopolitiques à l'œuvre.
- La Chine ne produit pas d'éponges de qualité aéronautique nécessaires à la filière.
- L'approvisionnement depuis les Etats-Unis est incertain : en cas de tension sur le titane métal, il y a une forte probabilité que des mesures protectionnistes soient mises en place pour allouer en priorité le titane américain aux industries américaines.

Par ailleurs, la France produit du titane métal accessible à la filière, mais en des quantités trop faibles pour répondre à l'ensemble de la demande nationale. La filière spatiale française devrait alors étudier en priorité l'éponge de titane et le titane métal produit au Japon, pour éventuellement en sécuriser l'approvisionnement au moyen de contrats à long terme. La participation au développement d'une filière de recyclage européenne devra également être envisagée.

ANALYSE PROSPECTIVE DES RISQUES GÉOPOLITIQUES



Semi-conducteurs

Définition des matières premières nécessaires pour les semi-conducteurs

Le terme « semi-conducteurs » regroupe un ensemble de matériaux ayant la caractéristique de pouvoir être dopés pour modifier leur conductivité électrique.

La fabrication des semi-conducteurs nécessite plusieurs étapes :

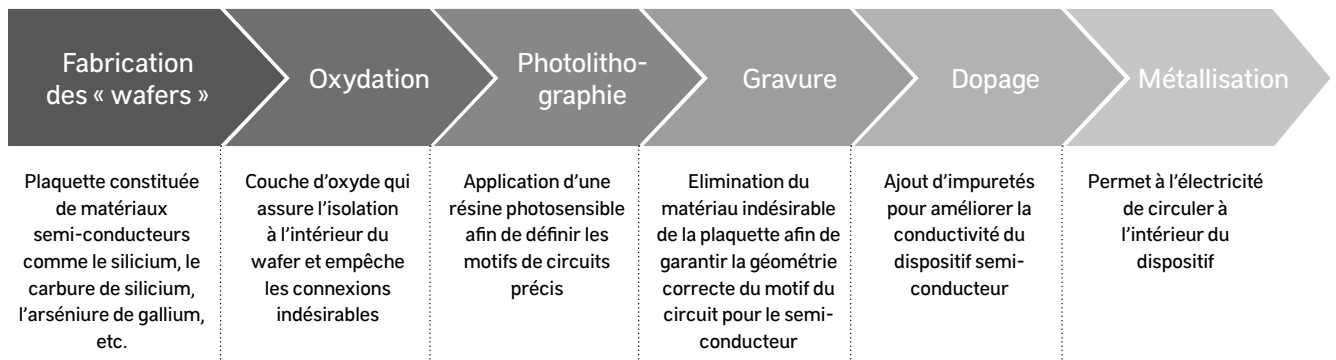
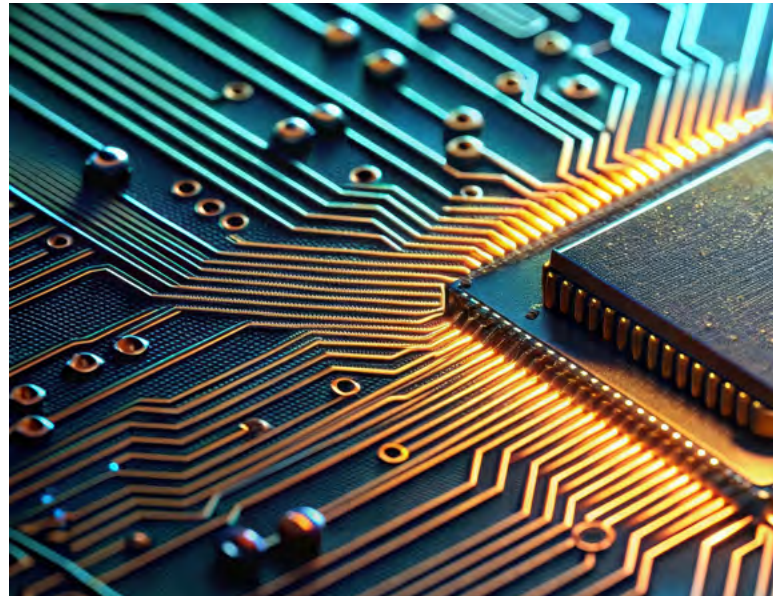
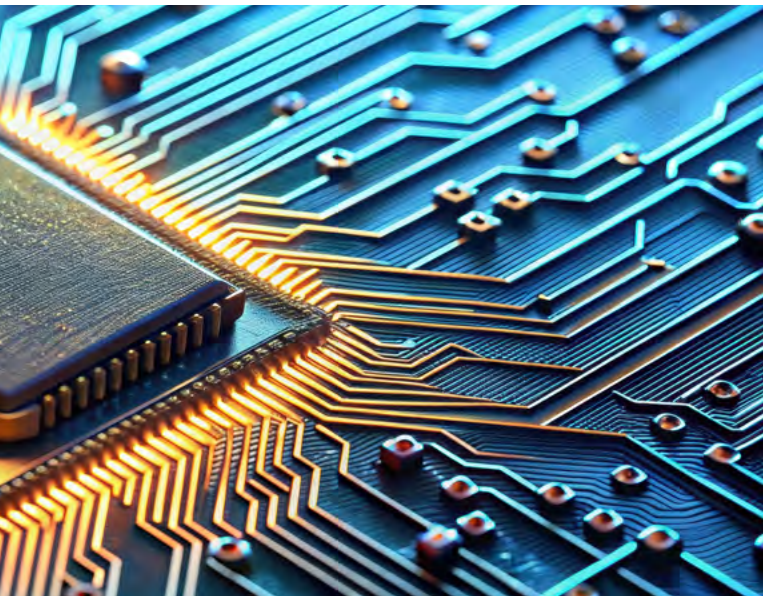


Figure 10 : Représentation simplifiée de la chaîne de fabrication des semi-conducteurs

Nécessaire pour la fabrication des « wafers » (« tranche » de silicium semi-conducteur, qui représente la première étape de fabrication des semi-conducteurs, cf. figure associée) en amont, le matériau le plus utilisé pour les semi-conducteurs est le silicium. Les autres éléments principalement utilisés sont l'arséniure de gallium, le germanium et le carbure de silicium.

La disponibilité du silicium, du gallium et du germanium a été discutée dans le dictionnaire des risques (disponible en annexe). Les probabilités d'un risque de pénurie ont été considérées faibles : le silicium est largement disponible dans la croûte terrestre, tandis que le gallium et le germanium sont des co-produits respectivement des industries de l'aluminium et du zinc, qui bénéficient de marges de manœuvre pour augmenter leur taux de récupération.

ANALYSE PROSPECTIVE DES RISQUES GÉOPOLITIQUES



© istock

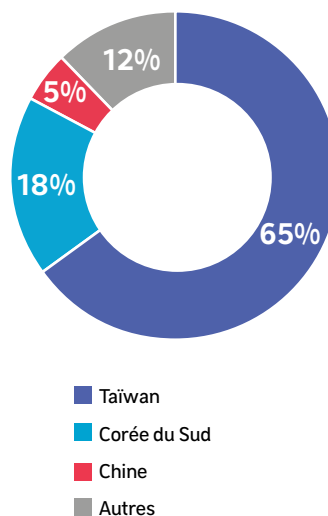
Analyse géopolitique

L'industrie des semi-conducteurs revêt une importance géopolitique particulière, tant ces matériaux sont nécessaires pour l'ensemble des applications technologiques utilisant de l'électronique. Par le passé, une pénurie de semi-conducteurs a déjà eu lieu pendant la pandémie de covid-19, avec des causes multiples dont notamment une hausse de la demande et des difficultés logistiques conséquentes à la pandémie. Elle a engendré d'importants retards pour de nombreuses industries, soulignant la forte dépendance économique de celles-ci aux semi-conducteurs. En témoigne par exemple l'industrie automobile, dont les constructeurs et leurs sous-traitants ont parfois dû arrêter leur production pendant plusieurs mois, faute de disponibilité de semi-conducteurs.

Avec environ 65% du marché global des semi-conducteurs en 2022, Taiwan est un acteur essentiel pour toutes les industries ayant recours à de l'électronique

embarqué. Une aggravation des tensions entre la Chine et Taïwan pourrait ainsi avoir des conséquences négatives sur les exportations depuis Taïwan. L'ESPAS (*European Strategy and Policy Analysis System*) parle en effet d'« effondrement » pour qualifier le potentiel impact sur le marché des semi-conducteurs d'un blocage de Taïwan par la Chine (*Global Semiconductor Trends and the Future of EU Chip Capabilities, 2022*).

Le deuxième pays en termes de volume de production est la Corée du Sud, dont la production est majoritairement destinée à l'entreprise Samsung.



Source : Trendforce 2021

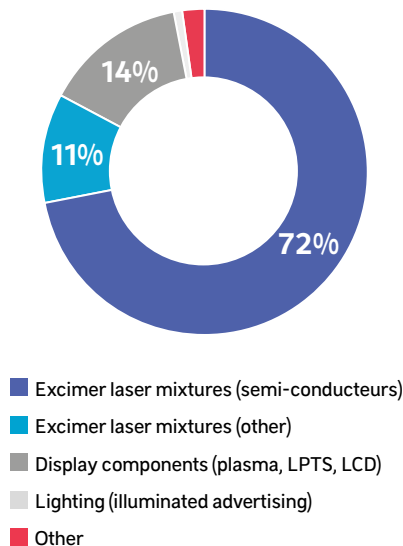
Figure 11 : Parts de marché mondiale des fonderies de semi-conducteurs

ANALYSE PROSPECTIVE DES RISQUES GÉOPOLITIQUES



Des risques existent également sur plusieurs intrants indirects nécessaires à la fabrication des semi-conducteurs, notamment concernant les intrants suivants :

Le néon : 72% de la production mondiale de néon est à destination des lasers utilisés pour la production des semi-conducteurs (JRC 2022, *Rare Gases - Krypton, Neon, Xenon : Impact assessment for supply security*). L'Ukraine fournit la majeure partie du néon à la qualité suffisante pour la production de semi-conducteurs (DeCarlo et Goodman, 2022, *Ukraine, Neon, and Semiconductors*). Lors de l'annexion de la Crimée en 2014, le prix du Néon a subi une augmentation de 600%. La guerre en Ukraine a occasionné la fermeture de plusieurs usines dans le pays, ce qui pourrait avoir à terme un impact indirect sur le coût moyen de production des semi-conducteurs.



Source : JRC, 2022

Figure 12 : Répartition de l'utilisation du néon dans l'Union Européenne en 2022

Le palladium : la Russie représente plus de 40% de la production minière de palladium en 2022 (USGS, *Mineral Commodity Summaries 2023*), presque au même niveau que l'Afrique du Sud. Le palladium étant principalement exporté par voie aérienne (DeCarlo et Goodman, 2022, *Russia, Palladium, and Semiconductors*), la fermeture d'espaces aériens aux avions russes pourrait également occasionner des difficultés d'approvisionnement. D'après le JRC (*Palladium: Impact assessment for supply security, 2022*), le reste de la production mondiale ne pourra pas remplacer la palladium russe en cas de contraintes d'approvisionnement depuis cette zone géographique.

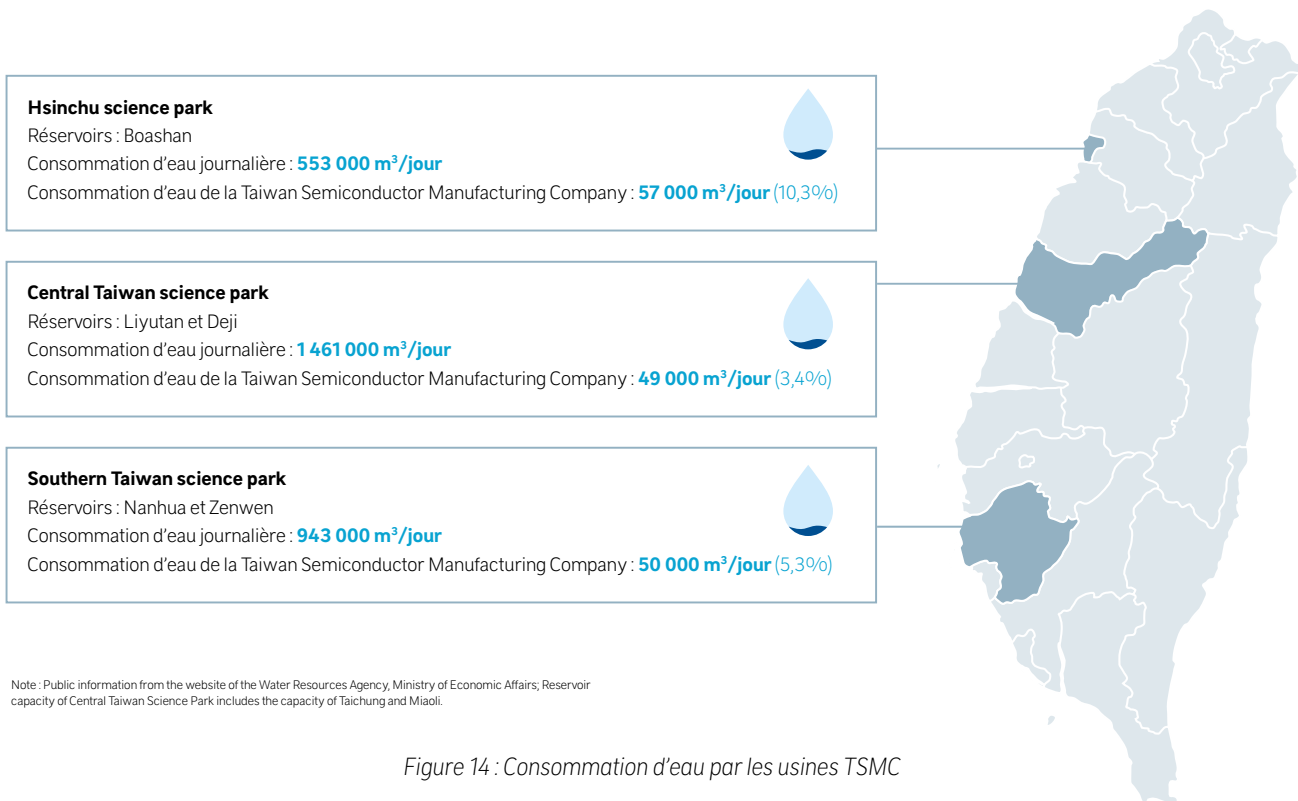


Source : USGS 2023

Figure 13 : Production de palladium par pays en 2023

L'eau : la fabrication de semi-conducteurs nécessite d'importantes quantités d'eau. Dans son rapport de responsabilité sociale, le producteur taïwanais TSMC indique utiliser 156 000 tonnes d'eau par jour pour ses différentes usines, représentant jusqu'à 10% de l'approvisionnement du comté en eau (voir figure ci-dessous). Lors d'un important épisode de sécheresse en 2021 à Taiwan, la plus importante fonderie de semi-conducteurs, TSMC, a vu son approvisionnement en eau contraint. Le gouvernement taïwanais a en effet demandé à l'industrie des semi-conducteurs de baisser sa consommation d'eau de près de 13%, ce qui a eu pour conséquence une baisse du volume de production. (Cf. figure 14 ci-contre).

ANALYSE PROSPECTIVE DES RISQUES GÉOPOLITIQUES



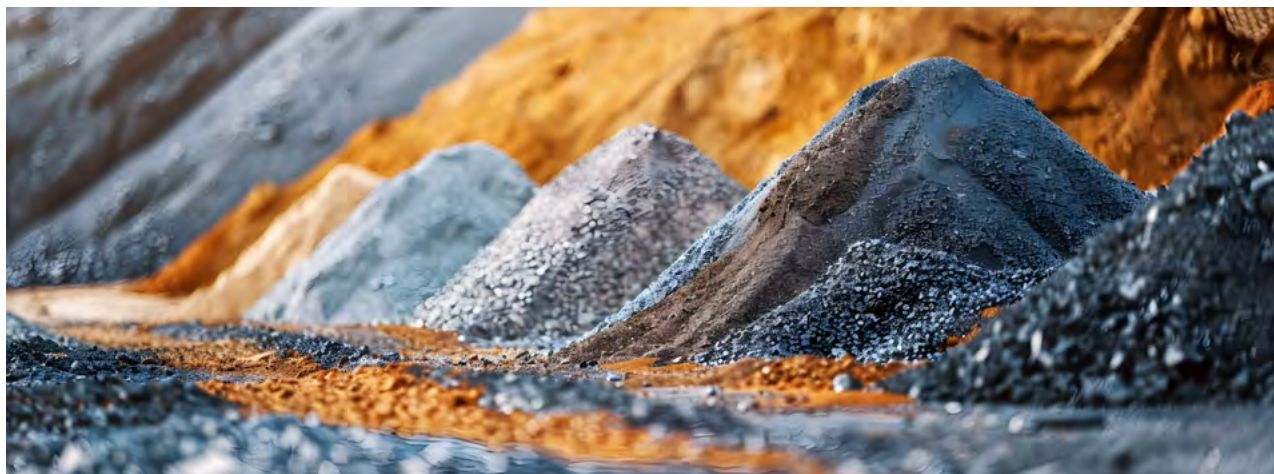
Synthèse semi-conducteurs pour la filière spatiale française

Les approvisionnements actuels de la filière spatiale française subissent un risque structurel : une crise entre Taïwan et la Chine pourrait en effet avoir des conséquences importantes sur le marché mondial, tant Taïwan joue un rôle important dans la filière.

Une crise sur les marchés du néon ou du palladium pourraient également avoir des conséquences sur les volumes de production de semi-conducteurs (taïwanais ou non), de même qu'une sécheresse prolongée.

Par ailleurs, le faible volume de semi-conducteurs commandés par la filière spatiale française joue en sa défaveur en cas de tension sur les marchés. En effet, le secteur spatial est en concurrence avec de nombreuses autres industries pour l'achat de semi-conducteurs, ces dernières requérant des volumes beaucoup plus importants et pouvant conséquemment avoir la faveur des fournisseurs en cas de tension d'approvisionnement.

ANALYSE PROSPECTIVE DES RISQUES GÉOPOLITIQUES



© istock

Terres rares

Définition et usage des terres rares

Les terres rares comprennent 15 éléments chimiques aux propriétés voisines qui font partie du groupe des lanthanides, soit les éléments de numéros atomiques 57 à 71.

Les terres rares se subdivisent en deux groupes selon leur masse atomique :

- Les terres rares légères (LREE), qui regroupent le lanthane, le cérium, le praséodyme, le néodyme, le prométhium, le samarium et l'europlum.
- Les terres rares lourdes (HREE), qui comprennent le gadolinium, le terbium, le dysprosium, l'holmium, l'erbium, le thulium, l'ytterbium et le lutécium.

Les compagnies minières incluent également l'yttrium (Y, numéro atomique 39) et le scandium (Sc, numéro atomique 21) dans les éléments des terres rares en raison de leurs propriétés similaires.

Le tableau périodique des éléments est présenté avec les terres rares mises en évidence. Les terres rares légères (LREE) sont les éléments La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu. Les terres rares lourdes (HREE) sont les éléments La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu. Les terres rares légères (LREE) sont les éléments La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu. Les terres rares lourdes (HREE) sont les éléments La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu.

Figure 15 : Les terres rares au sein du tableau périodique des éléments

La configuration spécifique des électrons dans les terres rares confère à ces dernières des propriétés magnétiques, optiques et chimiques uniques.

Ces propriétés sont aujourd'hui cruciales pour de nombreuses applications technologiques, tels que les aimants permanents, les catalyseurs, les luminophores, les batteries et les technologies de l'information. L'industrie spatiale française dépend notamment des terres rares pour la fabrication de ses aimants et certains équipements optiques.

ANALYSE PROSPECTIVE DES RISQUES GÉOPOLITIQUES



Disponibilité des terres rares

Les terres « rares » ne le sont pas d'un point de vue géologique. Elles sont en effet relativement abondantes dans la croûte terrestre : avec seulement les réserves prouvées, le BRGM évalue une disponibilité des terres rares pendant encore 55 à 85 ans (en incluant une hypothèse de croissance de la production de 6% par an).

Néanmoins, les terres rares sont soumises à des enjeux d'approvisionnement significatifs pour deux raisons :

- La concentration de leur présence géologique dans un nombre limité de pays, principalement en Chine (38% des réserves prouvées en 2019), Brésil (19%), Russie (10%), Inde (6%), Vietnam (19%) et Australie (3%).
- La concentration de leur production dans un nombre limité de pays, principalement en Chine (62% de la production en 2019), Etats-Unis (12%), Myanmar (10%), et Australie (10%).

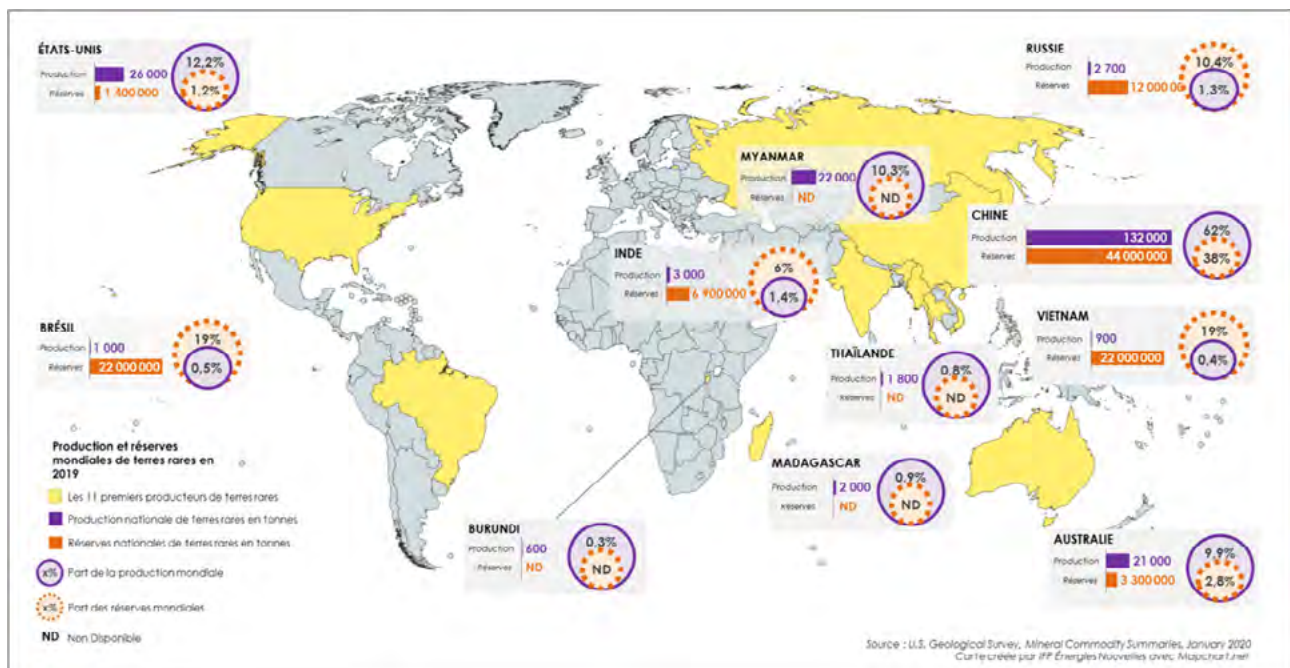


Figure 16 : Production et réserves mondiales de terres rares en 2019

ANALYSE PROSPECTIVE DES RISQUES GÉOPOLITIQUES



Analyse géopolitique

Le coût d'exploitation et du raffinage des terres rares est élevé car les concentrations dans les minerais sont faibles : pour 1 kg de Lutecium, il faut en moyenne traiter 1200 tonnes de roches (*Dominique Viel, 2023. « Terres rares : quels enjeux pour la France et l'Europe ? »*). La Chine proposant des coûts de main d'œuvre plus faibles que ceux de ses concurrents, elle occupe logiquement une place concurrentielle sur le marché des terres rares.

Les experts du secteur rappellent à ce titre que la France raffinait dans les années 1980 près de 50% du marché mondial de terres rares, mais que cette filière fut progressivement arrêtée dans les années 1990, et les savoir-faire perdus, en raison des coûts élevés de production comparativement à la production chinoise.

Dès lors, le marché des terres rares constitue aujourd'hui un risque géopolitique majeur : des tensions diplomatiques avec la Chine pourraient perturber leur approvisionnement sur le marché européen. Toutefois, plusieurs initiatives européennes visant à regagner une souveraineté minérale ont récemment émergé dans le secteur :

- Un projet d'ouverture de mine de terres rares en Suède dans la région de Kiruna, qui est le plus grand gisement connu d'Europe.
- Plusieurs projets d'usines de traitement et recyclage de ces éléments, notamment en France.

Bien qu'ambitieuses, ces initiatives pourraient néanmoins ne pas suffire à éliminer la dépendance de l'industrie française à l'approvisionnement en terres rares depuis la Chine.

Ces projets s'inscrivent en effet dans le temps long (minimum 10 ans pour l'ouverture d'une mine), et nécessitent des savoir-faire et des technologies aujourd'hui absents en Europe. Notons à ce titre qu'en 2023, la Chine a interdit l'exportation de technologies de traitement des terres rares, qui auraient permis d'accélérer la constitution d'une filière européenne.

Notons également que les terres rares issues des filières de recyclage sont très coûteuses, conséquence de la faible concentration en terres rares des appareils. Notons enfin que l'ouverture de nouvelles mines sur le sol européen, très émettrices de gaz à effet de serre, vont à l'encontre de l'ambition « Net Zero à horizon 2050 » du continent, en plus d'avoir un potentiel d'impact conséquent sur la biodiversité. ■



© istock

CONCLUSION

Conclusion pour la filière spatiale française

L'analyse des risques environnementaux pour la filière spatiale française conduite au cours de cette étude a permis de déterminer **deux sujets majeurs : l'évolution de la réglementation afférente à la dégradation de la situation climatique et de la couche d'ozone, et les risques d'approvisionnements**, notamment du titane métal, des semi-conducteurs et des terres rares. Ces deux sujets devront faire l'objet d'une démarche active de la part de la filière dans les prochaines années, afin d'en limiter les impacts potentiels.

Le premier sujet devra nécessiter une étude approfondie des conséquences sur la couche d'ozone et sur le climat des émissions en hautes atmosphères produites lors du lancement et de la rentrée atmosphérique. En parallèle, un plan de décarbonation ambitieux de la filière devra être mis en place afin de limiter les conséquences des activités du secteur spatial sur le climat. Un engagement proactif de la filière au niveau européen à l'occasion des discussions autour de la loi spatiale mérite également d'être étudié. Enfin, des études ciblées sur les impacts de ces activités sur la biodiversité, notamment à l'échelle locale, pourront être menées.

Le second sujet concernant les risques d'approvisionnement des matières premières critiques de la filière pourra faire l'objet d'un plan d'action différencié selon la ressource.

- **Pour le titane métal**, des voies de substitution du titane importé de Russie devront être étudiées au plus tôt, en participant activement à l'augmentation des volumes de production sur le sol national et en se rapprochant des filières de production d'autres pays, notamment au Japon. La participation au développement d'une filière de recyclage européenne devra également être envisagée.
- **Pour les semi-conducteurs**, participer à la relocalisation d'une production européenne semble être la meilleure option, afin de réduire la vulnérabilité de la filière à d'éventuelles tensions entre la Chine et Taïwan. Pour être résiliente, cette filière européenne devra notamment veiller à élaborer une stratégie dédiée pour réduire son risque d'approvisionnement en néon et en palladium, qui sont deux éléments essentiels à la production de semi-conducteurs. Une stratégie d'adaptation visant à réduire le risque de stress hydrique dans les bassins de production devra également être développée.
- **Pour les terres « rares »**, la filière spatiale européenne dispose de plusieurs options pour réduire sa dépendance à la production chinoise. Tout d'abord, après un inventaire des besoins ciblés, elle pourra constituer un stock stratégique des éléments rares les plus critiques pour ses activités. Elle pourra également étudier les possibilités de partenariats avec les producteurs américains et australiens. Enfin, elle devra conduire des analyses continues de substitution et/ou de réduction de l'usage des terres rares dans ses appareils.

BIBLIOGRAPHIE

La liste ci-dessous présente les documents ayant servi à alimenter l'étude.

- Aéro Décarbo, 2022.
"Facteurs Limitants »
- Agence internationale de l'énergie, 2023.
"Critical Minerals Market Review 2023"
- Binnemans, K., Jones, P.T., Blanpain, B., Van Gerven, T., Yang, Y., Walton, A., & Buchert, M. (2013).
"Recycling of rare earths: a critical review"
- Carrara S. et al., 2023.
"Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the European Union"
- Chanoine, A., 2017.
"Environmental impacts of launchers and space missions"
- Commissariat Général au Développement Durable (CGDD), 2023.
"Les ressources minérales critiques pour les énergies bas-carbone. Chaînes de valeur, risques et politiques publiques."
- DeCarlo et Goodman, 2022,
"Russia, Palladium, and Semiconductors"
- DeCarlo et Goodman, 2022.
"Ukraine, Neon, and Semiconductors"
- Elsner H., 2018.
"Nobles gases – supply really critical?"
- ESPAS, 2022.
"Global Semiconductor Trends and the Future of EU Chip Capabilities"
- Eurométaux, 2022.
"Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge"
- European Commission, 2020.
"Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020) – Critical Raw Materials Factsheets"
- European Commission, 2020.
"Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020) – Non-Critical Raw Materials Factsheets"
- European Commission, 2023.
"Study on the Critical Raw Materials for the European Union"
- G20, OCDE, 2021.
"Towards a more resource-efficient and circular economy"
- G20, 2017.
"Resource Efficiency Dialogue"
- JRC, 2022.
"Palladium: Impact assessment for supply security"
- JRC, 2022.
"Rare Gases (Krypton, Neon, Xenon): Impact assessment for supply security"

BIBLIOGRAPHIE



- RC, 2022.
"Titanium metal: Impact assessment for supply security"
- Mineralinfo, portail français des ressources minérales non énergétiques. Fiches de criticité des différentes substances minérales documentées, en coopération avec le BRGM.
- Ministère de la transition écologique, 2023.
"La productivité des ressources"
- Miraux L., 2021.
"Environmental limits to the space sector's growth"
- Pour un réveil écologique, 2024.
"Secteur spatial – rapport complet"
- Richardson K. et al., 2023.
"Earth beyond six of nine planetary boundaries"
- Schüller, D., Buchert, M., Liu, R., Dittrich, S., & Merz, C. 2011).
"Study on Rare Earths and Their Recycling"
- SystExt, 2021.
"Controverses minières : Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales"
- Tirila V, 2023
"Review of alternative propellants in Hall thrusters"
- TSMC, 2019.
"Corporate Social Responsibility Report"
- USGS, 2023.
"Mineral Commodity Summaries 2023"
- Viel D., 2023.
"Terres rares : quels enjeux pour la France et l'Europe ?"

ANNEXE 1

Glossaire

Abréviation	Définition
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CNES	Centre National d'Études Spatiales
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
EAR	Export Administration Regulation
ESPAS	European Strategy and Policy Analysis System
HREE	Heavy Rare Earth Elements (en français : terres rares lourdes)
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
ITAR	International Traffic in Arms Regulation
JRC	Joint Research Center
LREE	Light Rare Earth Elements (en français : terres rares légères)
REACH	Registration, Evaluation, Authorization and restriction of Chemicals
UIT	Union Internationale des Télécommunications
USGS	United States Geological Survey

ANNEXE 2

Table des figures

Figure 1 : Répartition des risques identifiés selon leur type	6
Figure 2 : Répartition des risques identifiés selon la nature de l'impact	6
Figure 3 : Répartition des risques selon l'horizon temporel	6
Figure 4 : Répartition des risques selon leur niveau de confiance	6
Figure 5 : Répartition des risques selon leur niveau de criticité	6
Figure 6 : Répartition des risques identifiés selon leur probabilité et leur gravité	7
Figure 7 : Détail sur les risques de criticité supérieure à 15	7
Figure 8 : Production de titane extrait (2022), d'éponges (2021) et de lingots de titane (2019) par pays	10
Figure 9 : Processus simplifié de production du titane métal	11
Figure 10 : Représentation simplifiée de la chaîne de fabrication des semi-conducteurs	14
Figure 11 : Parts de marché mondiale des fonderies de semi-conducteurs	15
Figure 12 : Répartition de l'utilisation du néon dans l'Union Européenne en 2022	16
Figure 13 : Production de palladium par pays en 2023	16
Figure 14 : Consommation d'eau par les usines TSMC	17
Figure 15 : Les terres rares au sein du tableau périodique des éléments	18
Figure 16 : Production et réserves mondiales de terres rares en 2019	19

ANNEXE 3

Dictionnaire des risques

Les tableaux suivants partagent l'ensemble des risques identifiés. Ils sont classés du risque le plus critique (indice de criticité élevée) au moins critique (indice de criticité faible).

ANNEXE 3

Dictionnaire des risques

Les tableaux suivants partagent l'ensemble des risques identifiés. Ils sont classés du risque le plus critique (indice de criticité élevée) au moins critique (indice de criticité faible).

#	Intitulé du risque	Type de risque	Définition du risque	Nature de l'impact	Horizon temporel	Probabilité d'occurrence (1 : peu probable ; 5 : quasi-certaine)	Rationnel de la notation de probabilité	Gravité (1 : très faible ; 5 : très élevée)	Rationnel de la notation de gravité	Criticité	Indice de confiance (1 : faible ; 2 : élevé)	Commentaire général	Sources
1	Réglementation sur la destruction de la couche d'ozone stratosphérique	Limite planétaire	Une réglementation limite les activités qui détruisent la couche d'ozone, dont font partie les lancements et les rentrées atmosphériques des débris spatiaux.	Norme réglementaire	Court terme (2030)	5	Sachant que l'émission de substances détruisant la couche d'ozone a déjà été régulée par le passé (protocole de Montréal), il est probable que les lancements spatiaux puissent être un jour concernés par une telle réglementation. En effet, les radicaux libres émis par les lanceurs en haute atmosphère ont un pouvoir élevé de destruction de l'ozone : «Ozone is destructed mostly by highly reactive radicals, with a single molecule able to destroy up to 100,000 ozone molecule»	5	Le passage des propergols solides aux ergols liquides permet de diminuer d'un ordre de grandeur la destruction d'ozone, mais ne semble pas suffisant pour contrebalancer les impacts de la croissance prévue du nombre de lancements. Ainsi, sans modification de la propulsion des lanceurs, principalement sur le premier étage, l'accès à l'espace pourrait se trouver fortement limité par une telle réglementation.	25	1	Le lancement et la ré-entrée sont quasiment les seules activités spatiales qui contribuent à la diminution de la couche d'ozone. La contribution du secteur spatial à la destruction de la couche d'ozone est aujourd'hui faible, mais les prévisions de croissance du secteur pourraient rendre l'impact des lancements aussi important que l'impact des substances bannies par le protocole de Montréal. «If left unregulated, by 2050 rocket emission could deplete ozone more than ODSs [ozone-depleting substances, banned by the Montreal Protocol] ever did».	Miraux 2021, Environmental limits to the space sector's growth
2	Restrictions des émissions en haute atmosphère liées à leur impact climatique	Limite planétaire	Les émissions en haute atmosphère (p.ex. suie, alumine) sont réglementées pour limiter le réchauffement climatique.	Norme réglementaire	Court terme (2030)	5	Le réchauffement climatique est aujourd'hui le sujet-phare de la problématique des limites planétaires, et de nombreuses réglementations à l'échelle française, mais également européenne, sont en cours pour respecter les accords de Paris. Il est ainsi très probable que la prise en compte des émissions en haute atmosphère nécessite une transition du secteur spatial au même titre que l'actuelle transition des véhicules thermiques.	5	Les carburants actuels des lanceurs génèrent des émissions dont l'impact sur le réchauffement climatique est estimé très élevé : alumine (propulseurs solides), suie (méthane liquide). Une réglementation sur les émissions en haute atmosphère obligerait la filière à investir massivement dans d'autres technologies.	25	1	Peu d'études ont été conduites sur le pouvoir réchauffant des émissions en haute atmosphère, et une grande incertitude existe sur les liens entre réchauffement de la stratosphère et réchauffement de la troposphère. En revanche, certaines thèses sont en cours de financement par le CNES sur ce sujet.	Miraux 2021, Environmental limits to the space sector's growth
3	Pénurie de semi-conducteurs	Autres ressources	L'offre mondiale de semi-conducteurs ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Court terme (2030)	4	La production de semi-conducteurs est aujourd'hui très concentrée en Asie, pour près de 85% (65% à Taiwan, 20% en Corée du Sud). Il existe aujourd'hui des plans de relance dans les pays occidentaux pour réduire cette dépendance à l'Asie (notamment aux USA et en Allemagne), dont on ne sait pas encore s'ils vont porter leurs fruits. La demande en semi-conducteurs augmente rapidement, tirée autant par les appareils actuels que par les nouvelles technologies (IA générative, connectivité 6G, informatique quantique). Par ailleurs, des expériences passées ont montré que le stress hydrique en Asie a pu mettre sous tension l'approvisionnement en semi-conducteurs du marché mondial.	5	De nombreux appareils (que ce soit à bord des satellites, des lanceurs ou au sol) nécessitent des composants électroniques variés, répondant à des standards élevés et notamment des semi-conducteurs.	20	2	Le problème des semi-conducteurs est avant tout localisé sur les «outils de production», qui nécessitent une grande expertise dans leur élaboration et qui sont très coûteux. En parallèle, certaines prévisions donnent par exemple une augmentation de la demande en semi-conducteurs de 20% en 2024 (vs. 2023).	TrendForce market research (2021)
4	Pénurie de produits de collage à faible dégazage	Autres ressources	Les produits de collage spécifiques à la filière spatiale ne sont plus disponibles sur le marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	4	Les produits de collage proviennent de l'industrie pétrochimique. Ainsi, la réduction de la production mondiale de pétrole prévue par l'AIE pourrait entraîner un risque sur l'approvisionnement. Par ailleurs, la recette de production des produits à faible dégazage étant confidentielle, il est possible que certains constituants se trouvent en rupture d'approvisionnement et mettent en péril l'accès à ces produits. La composition du produit final ne permet pas de déterminer les constituants nécessaires à sa fabrication.	5	Les colles à faible dégazage sont très difficilement substituables par d'autres types de colles, au risque d'endommager les instruments optiques, ou d'autres instruments à bord des satellites.	20	2	La filière spatiale utilise des produits de collage spécifiques, avec un faible dégazage, afin d'éviter l'altération des équipements du satellite une fois dans l'espace. Les experts du secteur partagent le fait qu'il existe une méconnaissance sur la fabrication de ces produits.	Entretien expert, AIE
5	Pénurie de Titane	Ressources minérales	L'offre mondiale de titane ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	4	Les réserves prouvées en minerai de titane sont de 498 Mt dans le monde, principalement concentrées en Chine (27%) et en Russie/Ukraine (env. 15%). Même si la demande en titane va augmenter à l'avenir, selon l'IRENA cette augmentation restera limitée. Les ressources disponibles semblent assez importantes (jusqu'à 2 milliards de tonnes d'après les estimations) pour répondre à la demande. Cependant, la filière spatiale européenne s'approvisionne actuellement principalement en Russie, impliquant donc un risque géopolitique important pour la pérennité de l'approvisionnement.	4	Les propriétés physiques du titane (rigidité, haute résistance, faible densité) sont incontournables pour les structures des appareils. Néanmoins les experts du secteur indiquent qu'il serait possible de se passer du titane pour produire un satellite ou un lanceur, moyennant une perte de performance et un alourdissement des structures.	16	2	Le titane se retrouve dans les alliages et les systèmes électro-optiques. A noter également que l'une des étapes de production de titane consiste en la production «d'éponges de titane» dont la production est aujourd'hui concentrée en Chine (57%) et Russie (13%).	IRENA, BRGM, entretien expert
6	Budget carbone pour la filière spatiale	Limite planétaire	Un budget carbone mondial est défini par les instances internationales (p.ex. ONU ou FMI) puis décliné par secteur d'activité, et en particulier pour le secteur spatial.	Norme réglementaire	Long terme (2050)	3	Plusieurs signaux faibles indiquent que le marché est aujourd'hui en train de se conformer à une régulation carbone (taxe carbone aux frontières de l'UE, marché carbone, bilan carbone rendu obligatoire pour les grandes entreprises, etc.). Il est possible que la prochaine étape soit d'attribuer des budgets carbone aux différents secteurs d'activité économique.	5	Dans le secteur aérien, les meilleures innovations technologiques actuelles (p.ex. hydrogène vert) devraient permettre des gains carbone sans pour autant éviter une nécessaire sobriété des vols. Il pourrait en être de même pour le secteur spatial, à l'issue de la mise en place d'un budget carbone pour la filière. Cependant, ces innovations sont incertaines, et l'obligation à respecter un budget carbone de filière pourrait ainsi restreindre considérablement le nombre de lancements.	15	1	Il existe deux principaux mécanismes pour la réduction des émissions carbone mondiales : l'incorporation des externalités négatives liées aux émissions carbone dans les coûts des produits (sobriété induite via la loi du marché), ou la sobriété «forcée» via des budgets carbone à respecter. La première solution ne permet en théorie pas nécessairement de réduire en absolu les émissions mondiales, ainsi, la seconde solution doit être envisagée et anticipée à moyen ou long terme par les acteurs économiques.	Expertise C4

ANNEXE 3

Dictionnaire des risques

Les tableaux suivants partagent l'ensemble des risques identifiés. Ils sont classés du risque le plus critique (indice de criticité élevée) au moins critique (indice de criticité faible).

ANNEXE 3

Dictionnaire des risques

Les tableaux suivants partagent l'ensemble des risques identifiés. Ils sont classés du risque le plus critique (indice de criticité élevée) au moins critique (indice de criticité faible).

#	Intitulé du risque	Type de risque	Définition du risque	Nature de l'impact	Horizon temporel	Probabilité d'occurrence (1 : peu probable ; 5 : quasi-certaine)	Rationnel de la notation de probabilité	Gravité (1 : très faible ; 5 : très élevée)	Rationnel de la notation de gravité	Criticité	Indice de confiance (1 : faible ; 2 : élevé)	Commentaire général	Sources
7	Pénurie d'éléments terres rares	Ressources minérales	L'offre mondiale de terres rares ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	3	Dans l'hypothèse d'une croissance de la production de 6% par an, le BRGM évalue une disponibilité des terres rares pendant encore 55 à 85 ans (avec les réserves prouvées). La Chine en concentre aujourd'hui la majorité de la production et des gisements. Néanmoins, les terres rares, au nombre de 14, sont aujourd'hui très hétérogènes dans leur disponibilité et leur chaîne d'approvisionnement.	5	Les terres rares sont des incontournables des aimants et des équipements optiques qui sont au cœur des missions satellites, on ne sait pas aujourd'hui les substituer.	15	2	Les terres rares sont utilisées dans les aimants semi-permanents, dans les lasers, ou le traitement du verre des équipements optiques.	BRGM, expertise CNES, entretien expert
8	Pénurie de Cobalt	Ressources minérales	L'offre mondiale de cobalt ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	3	Le cobalt est aujourd'hui l'un des métaux dont les réserves sont les plus critiques. La demande ne cesse d'augmenter en raison de son utilisation dans les batteries. Les réserves sont estimées à 75 ans pour l'instant, mais si la demande continue de croître sur le même modèle, elles tomberont à 25 ans d'ici 2028. Néanmoins, les chiffres indiqués précédemment concernent les réserves « prouvées », alors que les réserves « estimées » sont bien plus importantes d'après les experts.	4	Le cobalt est utilisé dans plusieurs domaines, ce qui augmente la gravité d'une pénurie. Cependant, il est substituable dans les superalliages par le molybdène, le niobium ou le rhénium selon les performances recherchées. Pour les batteries, il est possible d'utiliser des technologies alternatives. Pour les aimants, la technologie NdFeB (néodyme, praséodyme, dysprosium) ou les ferrites (avec pertes de performance) pourraient permettre de remplacer le cobalt. Néanmoins, il n'est pas certain que ces éléments de substitutions soient disponibles en quantité suffisante pour remplacer tous les usages du cobalt, ni qu'ils soient parfaitement pertinents pour les usages du cobalt de la filière spatiale.	12	2	Le cobalt est utilisé dans plusieurs domaines, ce qui augmente la gravité d'une pénurie. Cependant, il est substituable dans les superalliages par le molybdène, le niobium ou le rhénium selon les performances recherchées. Pour les batteries, il est possible d'utiliser des technologies alternatives. Pour les aimants, la technologie NdFeB (néodyme, praséodyme, dysprosium) ou les ferrites (avec pertes de performance) pourraient permettre de remplacer le cobalt. Néanmoins, il n'est pas certain que ces éléments de substitutions soient disponibles en quantité suffisante pour remplacer tous les usages du cobalt, ni qu'ils soient parfaitement pertinents pour les usages du cobalt de la filière spatiale.	MineralInfo, entretien expert
9	Pénurie de Nickel	Ressources minérales	L'offre mondiale de nickel ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	3	La Nouvelle-Calédonie contient des réserves de nickel estimées à 7Mt pour une production annuelle d'environ 0,2Mt. Les réserves prouvées actuelles sont à plus de 100Mt, soit plus de 30 ans à production constante. Néanmoins, les chiffres indiqués précédemment concernent les réserves « prouvées », alors que les réserves « estimées » sont bien plus importantes d'après les experts.	4	Les substitutions du nickel restent chères et marginales, souvent associées à une perte de qualité et de performance pour les industriels.	12	2	Le nickel se trouve dans les superalliages pour les injecteurs et les propulseurs, dans les poudres pour impression 3D.	USGS, BRGM, entretiens experts
10	Pénurie de Tellure	Ressources minérales	L'offre mondiale de tellure ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	3	Le marché du tellure est faible et très opaque. Les réserves sont géographiquement assez diversifiées, mais la production mondiale est assez faible (env. 600 tonnes/an).	4	Dans les satellites, le tellure est utilisé pour les détecteurs infrarouge, dans les capteurs MCT, dans lesquels il est difficilement remplaçable.	12	2	Le tellure est un co-produit de l'exploitation de cuivre. Il est souvent utilisé dans les cellules photovoltaïques, les détecteurs infrarouges, les mémoires à changement de phase.	MineralInfo
11	Pénurie de Tungstène	Ressources minérales	L'offre mondiale de tungstène ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	3	Les réserves de tungstène sont géographiquement diversifiées, avec des gisements en Chine (50% des réserves), en Russie (11%), au Vietnam (3%), en Espagne (1,4%). Aujourd'hui, la Chine concentre plus de 80% de la production.	4	La protection des composants électroniques contre les radiations est essentielle au bon fonctionnement des satellites. Des substitutions sont possibles, mais avec des performances moindres, et souvent plus onéreuses. Le plomb, qui permet également de protéger des radiations, est soumis au règlement REACH.	12	2	Le tungstène est utilisé dans des alliages métalliques, par exemple dans les tuyères et les propulseurs. Il sert de protection des composants électroniques contre les radiations.	USGS, MineralInfo, entretiens experts
12	Pénurie d'Antimoine	Ressources minérales	L'offre mondiale d'antimoine ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	4	D'après l'USGS, les réserves d'antimoine sont estimées à 20 ans de production mondiale. La Chine domine le marché avec 80% de la production mondiale, et plus de la moitié des réserves.	3	Pour le verre et les céramiques, l'antimoine peut être remplacé par des composés de chrome, d'étain, de titane, de zinc et de zirconium. Cependant, dans son utilisation comme retardateur de flamme, l'antimoine est difficilement remplaçable.	12	1	L'antimoine est utilisée dans le verre et les céramiques, pour les équipements optiques. Pendant le covid, des fermetures temporaires de mine en Chine ont fait presque tripler son prix.	USGS, MineralInfo
13	Pénurie de Xénon	Autres ressources	L'offre mondiale de xénon ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	4	D'après des chiffres de 2021, l'Ukraine représentait 30% de la production de Xénon. Il est obtenu par distillation de l'air liquide. Récemment, la guerre en Ukraine a impacté les approvisionnements, et le prix du Xénon a substantiellement augmenté. Les industriels français du secteur indiquent que le Xénon est un co-produit de la production d'air liquide, qu'il n'est aujourd'hui pas valorisé en France du fait des importants coûts que cela nécessiterait (de l'ordre de la centaine de millions d'euros), mais qu'une forte augmentation du prix du Xénon sur le marché pourrait permettre l'émergence d'une filière française.	3	Le Xénon est actuellement majoritairement utilisé dans les propulseurs à effet Hall. À court terme, une pénurie pourrait avoir des conséquences pour les satellites déjà prévus avec une telle propulsion. À moyen terme, il est possible de le substituer. Le Krypton représente actuellement l'alternative la plus commune au Xénon. L'ESA a identifié l'iode comme un substitut pour les propulseurs à effet Hall. Le Bismuth, le zinc et le magnésium sont également de bons candidats pour des utilisations de plus haute puissance.	12	2	Le Xénon est un gaz utilisé dans les propulseurs à effet hall. Il est un co-produit de la production d'air liquide.	Entretiens d'expert, ESA, «Review of alternative propellants in Hall thrusters», Tirila et al
14	Restriction sur l'utilisation de l'eau	Limite planétaire	Des limitations entourent l'utilisation de l'eau en Europe	Norme réglementaire	Court terme (2030)	3	De nombreux scientifiques alertent sur le fait que la mauvaise gestion de l'eau à l'œuvre en Europe (et dans le monde) risque de mettre la ressource sous tension à l'avenir. Nous en voyons déjà certains effets en France, avec certains villages qui sont à cours d'eau l'été et qui doivent être ravitaillés par camion-citerne. Il est donc très probable qu'en cas de période sèche prolongée, l'usage de l'eau en Europe soit réglementé et priorisé selon les usages, éventuellement au détriment de la filière spatiale.	4	Une pénurie d'eau prolongée pourrait avoir un impact systémique et pluriels sur de nombreux secteurs connexes de la filière spatiale (production énergétique via les centrales nucléaires, production d'agro-carburant, production de matières plastiques, etc.). À terme, un tel scénario pourrait mettre en péril de nombreux projets de la filière spatiale qui ne seraient pas considérés comme prioritaires pour un accès à l'eau.	12	1	La notion systémique qui entoure la problématique de l'eau rend difficile une appréciation fine des impacts potentiels de son manque pour la seule filière spatiale.	Expertise C4, entretien expert

ANNEXE 3

Dictionnaire des risques

Les tableaux suivants partagent l'ensemble des risques identifiés. Ils sont classés du risque le plus critique (indice de criticité élevée) au moins critique (indice de criticité faible).

ANNEXE 3

Dictionnaire des risques

Les tableaux suivants partagent l'ensemble des risques identifiés. Ils sont classés du risque le plus critique (indice de criticité élevée) au moins critique (indice de criticité faible).

#	Intitulé du risque	Type de risque	Définition du risque	Nature de l'impact	Horizon temporel	Probabilité d'occurrence (1 : peu probable ; 5 : quasi-certaine)	Rationnel de la notation de probabilité	Gravité (1 : très faible ; 5 : très élevée)	Rationnel de la notation de gravité	Criticité	Indice de confiance (1 : faible ; 2 : élevé)	Commentaire général	Sources
15	Limitation de l'utilisation de la biomasse pour produire de l'électricité en Guyane	Limite planétaire	Les centrales biomasse alimentant la production électrique de la Guyane sont interdites.	Norme réglementaire	Court terme (2030)	4	L'utilisation de biomasse pour de la production électrique en France hors réseau métropolitain est aujourd'hui considérée comme un «usage à interroger» par le SGPE (Secrétariat Général à la Planification Ecologique). Cela pourrait mener à une limitation ou une interdiction de cet usage à terme.	3	La biomasse constitue aujourd'hui près de 10% de la production électrique en Guyane, mais pourrait représenter 50% de la production électriques guyanaise en 2030. Plusieurs alternatives existent et sont déjà déployées (notamment photovoltaïques et barrage hydraulique).	12	1	Les projections pour 2030 indiquent que la biomasse pourrait constituer 50% de la production électrique guyanaise (d'après les scénarios de la Programmation pluriannuelle de l'énergie adoptée en 2017).	SGPE, «La planification écologique dans l'énergie» (2023)
16	Pénurie de cuivre	Ressources minérales	L'offre mondiale de cuivre ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	2	L'augmentation prévue de la demande en cuivre à l'échelle mondiale pourrait conduire à des tensions sur l'approvisionnement. Selon l'AIE, la production actuelle et les projets en cours ne devraient couvrir que 80 % de la demande mondiale en 2030. Dans le cas de pénuries, un arbitrage vers des secteurs considérés «prioritaires», comme les usages pour la transition écologique, pourrait être décidé, au détriment du secteur spatial. Néanmoins, la demande en cuivre du secteur spatial est considérée faible par les experts, par conséquent, même en cas d'augmentation du prix du cuivre ou en cas de redirection des ressources vers les secteurs «prioritaires», il est peu probable que le secteur spatial subisse une pénurie.	5	Le cuivre possède des propriétés difficilement substituables dans les technologies. Parmi les métaux purs et à température ambiante, le cuivre présente en effet la seconde conductivité la plus élevée. De nombreux alliages sont des dérivés du cuivre (laiton, zamak, etc.).	10	2	Le cuivre est nécessaire dans de nombreuses applications pour la transition écologique, notamment liées à l'électrification des procédés. Ainsi, selon l'AIE, la demande en cuivre devrait augmenter d'environ 30 % d'ici 2040, principalement en raison de la demande croissante de systèmes de production d'électricité à faibles émissions de carbone, de réseaux électriques, de véhicules électriques et de systèmes de stockage.	AIE («The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions», 2021), entretien expert
17	Pénurie de silicium	Ressources minérales	L'offre mondiale de silicium ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	2	La Chine concentre près de 70% de la production de silicium métal primaire. La production française représente 3% de la production mondiale. Néanmoins, le silicium est présent à hauteur de 27% dans la croûte terrestre. Ainsi, même en cas de rupture d'approvisionnement depuis la Chine, il est très probable que de nouvelles filières de productions émergent à d'autres endroits du monde.	5	Le silicium n'est pas substituable dans la plupart des usages.	10	2	Le silicium est utilisé dans des alliages, et pour les cellules photovoltaïques.	MineralInfo, entretien expert
18	Pénurie d'Arsenic	Ressources minérales	L'offre mondiale d'arsenic ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	2	D'après l'USGS, les réserves sont estimées à plus de 20 ans de production mondiale, sans données plus précises. Le Pérou (46% de la production mondiale) et la Chine (40%) sont les principaux producteurs.	5	L'arséniure de gallium utilisé dans les semi-conducteurs peut être remplacé par le phosphore d'indium, le gallium-nitrate et le silicium-germanium. Cependant, il n'existe à ce jour aucun substitut efficace aux circuits intégrés à base d'arséniure de gallium dans les applications liées à la défense.	10	2	L'arsenic est utilisé dans les semi-conducteurs.	USGS, Commission Européenne
19	Pénurie de Chrome	Ressources minérales	L'offre mondiale de chrome ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	2	Les ressources mondiales sont estimées à plus de 12 milliards de tonnes, ce qui pourra couvrir la demande pour des siècles, la production mondiale actuelle étant de 41 000 tonnes. Ces ressources sont concentrées à plus de 80% au Kazakhstan et en Afrique du Sud.	5	Le chrome n'est pas substituable dans son principal usage, les inox, dont il est le garant des propriétés inoxydables	10	2	Le Chrome est utilisé comme traitement de surface, notamment pour l'acier.	USGS, MineralInfo, entretiens experts
20	Pénurie de Vanadium	Ressources minérales	L'offre mondiale de vanadium ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	2	En 2022, les réserves sont estimées à 26 millions de tonnes, pour une consommation mondiale de 120 000 t en 2021. La Chine est le principal producteur.	5	D'après le BRGM, il n'existe aucun substitut acceptable pour le Vanadium dans l'alliage TA6V.	10	2	Le vanadium se trouve dans les alliages métalliques (notamment le TA6V) pour les pièces structurelles et les réservoirs de propergol.	USGS, BRGM, entretiens experts
21	Pénurie de Lithium	Ressources minérales	L'offre mondiale de lithium ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	2	Les projections actuelles indiquent une large disponibilité de lithium dans la croûte terrestre. Les gisements identifiés sont en effet estimés à 86 millions de tonnes au total, pour la moitié en Amérique Latine (Chili, Argentine, Bolivie). Compte tenu du rythme de production mondial actuel, qui s'est élevé à 82.000 tonnes en 2020 (dont 50% en Australie et 20% en Chine), il y aurait encore plusieurs centaines d'années de disponibilité de la ressource.	5	De nombreux appareils (à bord des satellites, lanceurs, ou au sol) nécessitent des batteries de stockage d'électricité. Sans ces batteries, qui contiennent du lithium, ces appareils ne peuvent fonctionner.	10	2	Le lithium est utile en priorité pour les batteries de stockage de l'électricité. Certains autres type de batteries sont en cours de développement (p.ex. batterie au sodium), mais ces dernières ne permettent pas à date d'obtenir la même densité de stockage d'énergie que les batteries au lithium.	USGS
22	Limitation sur le changement d'usage des sols	Limite planétaire	Une réglementation interdit l'artificialisation nette dans l'espace européen.	Norme réglementaire	Court terme (2030)	5	La loi ZAN en France interdit l'artificialisation de nouvelles zones. Des députés ont essayé, sans succès, d'exclure la Guyane de cette loi. Elle devra donc être appliquée également dans les territoires ultra-marins, où se trouve le CSG.	2	Que ce soit pour les sites de lancement ou les stations sol, les activités spatiales ont besoin d'infrastructures importantes. Une telle réglementation pourrait contraindre la filière à réutiliser les infrastructures existantes plutôt que d'en créer de nouvelles. Les satellites déjà en orbite ne seraient a priori pas impactés par une telle réglementation.	10	2	Le changement d'occupation des sols est une des limites planétaires, et des lois existent déjà pour en limiter l'effet. Il semble probable que de telles lois renforcent leur coercitivité à l'avenir, notamment en Guyane, où se trouve le CSG.	Assemblée nationale

ANNEXE 3

Dictionnaire des risques

Les tableaux suivants partagent l'ensemble des risques identifiés. Ils sont classés du risque le plus critique (indice de criticité élevée) au moins critique (indice de criticité faible).

ANNEXE 3

Dictionnaire des risques

Les tableaux suivants partagent l'ensemble des risques identifiés. Ils sont classés du risque le plus critique (indice de criticité élevée) au moins critique (indice de criticité faible).

#	Intitulé du risque	Type de risque	Définition du risque	Nature de l'impact	Horizon temporel	Probabilité d'occurrence (1 : peu probable ; 5 : quasi-certaine)	Rationnel de la notation de probabilité	Gravité (1 : très faible ; 5 : très élevée)	Rationnel de la notation de gravité	Criticité	Indice de confiance (1 : faible ; 2 : élevé)	Commentaire général	Sources
23	Réglementation REACH	Limite planétaire	La réglementation REACH limite ou interdit l'usage de certains produits chimiques afin de réduire les pollutions.	Norme réglementaire	Court terme (2030)	3	La réglementation REACH est déjà en place, mais son application pour les matières critiques est réduite par le pouvoir des lobbies. Par l'exemple l'hydrazine, qui a été classée sur la liste des substances à surveiller en 2011 par REACH, ne fait pas l'objet d'une interdiction à l'heure actuelle.	3	L'ESA estime jusqu'à 20% la part des matériaux industriels du secteur spatial concernés par la réglementation REACH sur le long terme. Y figure notamment le plomb depuis peu.	9	2	REACH est un règlement de l'Union Européenne qui s'applique à tous les produits chimiques et a pour but de mieux protéger la santé et l'environnement contre les risques liés à ces produits. Il impose aux entreprises l'enregistrement des substances utilisées, avec un risque d'interdiction si les risques qu'elles présentent ne peuvent être maîtrisés.	Agence européenne des produits chimiques (ECHA), ESA
24	Pénurie de Cadmium	Ressources minérales	L'offre mondiale de cadmium ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	2	Il n'existe pas de mine de Cadmium. Il est obtenu industriellement, à partir du traitement des minéraux de zinc, notamment en Chine et en Corée du Sud.	4	Dans les satellites, le cadmium est utilisé pour les détecteurs infrarouge, dans les capteurs MCT, dans lesquels il est difficilement remplaçable.	8	2	Le principal usage du Cadmium est la production d'accumulateurs rechargeables au Nickel-Cadmium. Dans le spatial, le cadmium est utilisé pour les détecteurs infrarouge.	MineralInfo
25	Pénurie de fibres de carbone	Ressources minérales	L'offre mondiale de fibres de carbone ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	2	Deux tiers des entreprises qui produisent des fibres de carbone compatibles pour l'industrie spatiale sont situées au Japon. Pour les applications de boucliers thermiques, la production a principalement lieu aux USA (50%) et au Japon (25%).	4	Le secteur spatial ayant des spécifications très précises, avec des besoins de propriétés spécifiques sur les matériaux, les fibres de carbone pourraient être difficilement remplaçables.	8	1	Le carbone est utilisé dans les matériaux composites (p.ex. bouclier thermique).	Commission européenne
26	Pénurie de Gallium	Ressources minérales	L'offre mondiale de gallium ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	2	Le gallium est un co-produit du traitement de la bauxite (aluminium). La Chine regroupe plus de 80% de la production mondiale. La France qualifie le niveau de risque sur l'approvisionnement de faible.	4	Pour l'opto-électronique, le gallium peut être remplacé par le phosphore d'indium. Il est mal substituable pour des usages sensibles des circuits intégrés (défense notamment) car le silicium utilisé en remplacement est moins performant.	8	2	Le gallium est utilisé dans les semi-conducteurs.	MineralInfo, USGS
27	Pénurie de Mercure	Ressources minérales	L'offre mondiale de mercure ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	2	Les ressources de mercure sont estimées à 600 000t, pour une production annuelle de 2200t, soit plus de 250 ans de réserves à production constante. La Chine représente 90% de la production mondiale.	4	Dans les satellites, le mercure est utilisé pour les détecteurs infrarouge, dans les capteurs MCT, dans lesquels il est difficilement remplaçable.	8	2	Le mercure est utilisé dans les détecteurs infrarouge.	USGS, entretiens experts
28	Pénurie de Polyimide	Ressources minérales	L'offre mondiale de polyimide ne permet pas de répondre à toute la demande du marché	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	2	Les USA et la Japon sont la source quasi-unique d'approvisionnement mondial. Le polyimide provient de l'industrie pétrochimique. Ainsi, la réduction de la production mondiale de pétrole prévue par l'AIE pourrait entraîner un risque sur l'approvisionnement.	4	En raison de ses propriétés, le polyimide est difficile à substituer.	8	1	Le polyimide est un polymère utilisé pour la production de composants exposés à des environnements difficiles, tels que des températures élevées ou des pressions extrêmes, et en particulier dans les circuits imprimés, les câbles flexibles.	Entretien expert, AIE
29	Pénurie de Tantale	Ressources minérales	L'offre mondiale de tantale ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	2	MineralInfo estime les réserves connues de tantale à plus de 150 ans de la production de 2017. Il existe des ressources en France, évaluées à environ 7500t. La République Démocratique du Congo et le Rwanda concentrent plus de 65% de la production minière.	4	La substitution est possible, mais avec des pertes de performances ou à des coûts plus élevés.	8	2	Le tantale est utilisé pour les superalliages, ainsi que pour les condensateurs.	MineralInfo
30	Pénurie de Krypton	Autres ressources	L'offre mondiale de krypton ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	3	Risque de pénurie de Krypton lié à la concentration de sa production dans 2 pays (Ukraine, Russie), qui représentent 80% de la production mondiale.	2	L'ESA a identifié l'iode comme un substitut pour les propulseurs à effet Hall. Le bismuth, le zinc et le magnésium sont également de bons candidats pour des utilisations de plus haute puissance.	6	2	Le krypton est un gaz utilisé dans les propulseurs à effet hall.	H. Elsner, «Nobles gases – supply really critical ?» (2018), ESA, «Review of alternative propellants in Hall thrusters», Tirila et al
31	Inondation du CSG du fait de l'élévation du niveau de la mer	Limite planétaire	La montée des eaux inonde le CSG	Risque physique	Long terme (2050)	1	Le scénario SSP5-8.5 du GIEC (le plus pessimiste) donne une élévation du niveau de la mer entre +40 cm et +110 cm en 2100. Les installations du CNES sont situées à une altitude d'environ 10 m à 20 m. Ainsi, la probabilité d'une submersion liée à la hausse du niveau de la mer à l'horizon 2050 est faible.	5	Selon les zones touchées, une inondation pourrait endommager des installations essentielles au bon fonctionnement du CSG, jusqu'à pouvoir rendre impossible des lancements.	5	2	L'augmentation du niveau de la mer liée au changement climatique pourrait occasionner la submersion de certaines zones «hors CSG» qui affecterait tout de même les opérations du CSG (p.ex., la route qui mène au CSG).	GIEC
32	Pénurie de Bauxite	Ressources minérales	L'offre mondiale de bauxite ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	1	Les réserves de bauxite sont estimées à plus de 80 ans à consommation constante par l'USGS.	5	On retrouve de l'aluminium dans la plupart des satellites, car sa robustesse et sa légèreté sont des atouts difficilement substituables par d'autres matériaux.	5	2	La bauxite est utilisée dans les alliages métalliques (aluminium).	USGS
33	Pénurie de Béryllium	Ressources minérales	L'offre mondiale de béryllium ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	1	Les réserves peuvent couvrir plus de 300 ans à consommation constante. Les USA représentent 60% des réserves mondiales.	5	Le béryllium, à cause de son coût élevé et de ses difficultés de mise en œuvre en raison de sa toxicité, n'est utilisé que dans des applications très spécifiques où il est difficilement substituable sans perte significative de performance ou de fiabilité.	5	2	Le béryllium est utilisé dans les alliages métalliques légers.	USGS

ANNEXE 3

Dictionnaire des risques

Les tableaux suivants partagent l'ensemble des risques identifiés. Ils sont classés du risque le plus critique (indice de criticité élevée) au moins critique (indice de criticité faible).

ANNEXE 3

Dictionnaire des risques

Les tableaux suivants partagent l'ensemble des risques identifiés. Ils sont classés du risque le plus critique (indice de criticité élevée) au moins critique (indice de criticité faible).

#	Intitulé du risque	Type de risque	Définition du risque	Nature de l'impact	Horizon temporel	Probabilité d'occurrence (1 : peu probable ; 5 : quasi-certaine)	Rationnel de la notation de probabilité	Gravité (1 : très faible ; 5 : très élevée)	Rationnel de la notation de gravité	Criticité	Indice de confiance (1 : faible ; 2 : élevé)	Commentaire général	Sources
34	Pénurie de Niobium	Ressources minérales	L'offre mondiale de niobium ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	1	D'après l'USGS, les réserves sont estimées à plus de 200 ans de production mondiale.	5	D'après le BRGM, le potentiel de substitution du niobium est faible.	5	2	REACH est un règlement de l'Union Européenne qui s'applique à tous les produits chimiques et a pour but de mieux protéger la santé et l'environnement contre les risques liés à ces produits. Il impose aux entreprises l'enregistrement des substances utilisées, avec un risque d'interdiction si les risques qu'elles présentent ne peuvent être maîtrisés.	USGS, BRGM
35	Pénurie de Phosphore	Ressources minérales	L'offre mondiale de phosphore ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	1	Les réserves sont estimées par l'USGS à 72 Mt, pour une production annuelle de 0,2 Mt. La production de phosphore a lieu dans de nombreux pays : 20 pays ont produit plus de 1000 t de phosphore en 2021.	5	La Commission européenne évalue le phosphore comme très difficilement substituable dans l'industrie.	5	2	Le phosphore est utilisé dans les semi-conducteurs des panneaux photovoltaïques, le traitement des lentilles et des filtres optiques.	USGS, Commission européenne
36	Pénurie de matériel informatique	Autres ressources	L'offre mondiale en matériel informatique ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	1	Une rupture totale de tout équipement informatique semble peu probable. Dans le cas de difficultés d'approvisionnement (p.ex. suite à des tensions sur les semi-conducteurs), une hausse du prix du matériel IT et/ou une redirection vers des usages prioritaires (industrie) seraient probablement les principales conséquences.	5	Sans matériel informatique, l'ensemble des activités spatiales (recherche, ingénierie, plateforme de lancement, mise à disposition des données, ...) seraient à l'arrêt.	5	1	Le matériel informatique est omniprésent à l'ensemble des stades de la chaîne de valeur du secteur spatial.	Expertise C4
37	Augmentation des prix des matières premières en Europe du fait du MACF	Ressources minérales	La mise en place du "Mécanisme d'Ajustement Carbone aux Frontières" (MACF) fait augmenter le prix des matières premières en Europe.	Norme réglementaire	Court terme (2030)	4	Les matières premières minérales ne rentrent aujourd'hui pas dans le périmètre de taxation du MACF. Néanmoins, la commission européenne a indiqué que les périmètres seraient élargis à mesure que les méthodes de calcul des empreintes carbone se renforcent. Les ressources minérales et gazières pourraient ainsi en faire partie à l'avenir.	1	La mise en place de ce mécanisme sur les matières premières minérales et gazières, en l'état, conduirait à une perte de compétitivité de la filière spatiale française et européenne par rapport aux autres pays (notamment USA, Chine, Russie)	4	2	Le MACF est en cours de mise en place, en parallèle du retrait des quotas gratuits pour les industries sur le sol européen. Les industries aujourd'hui concernées sont : l'acier, le charbon, l'hydrogène, le ciment, l'aluminium, les engrais, le fer et la production énergétique.	Conseil de l'UE
38	Pénurie de platinoïdes	Ressources minérales	L'offre mondiale de platinoïdes ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	1	D'après l'USGS, les réserves sont estimées à plus de 300 ans de production mondiale.	4	Les platinoïdes peuvent dans certains usages se substituer entre eux.	4	2	Les métaux du groupe platine (PGM) sont utilisés dans les tuyères et les chambres de combustion.	USGS, BRGM
39	Pénurie de Bismuth	Ressources minérales	L'offre mondiale de bismuth ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	2	L'USGS ne partage pas de données sur les réserves de bismuth. La Chine est le principal producteur, avec 80% de la production mondiale en 2022.	2	Dans les propulseurs à effet Hall, le bismuth pourrait éventuellement être substituable par le xénon, le krypton, l'iode, le zinc ou le magnésium.	4	2	Le bismuth est utilisé dans les propulseurs à effet hall.	USGS
40	Pénurie de Germanium	Ressources minérales	L'offre mondiale de germanium ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	2	Le germanium est un co-produit lors du traitement du zinc, il est actuellement peu récupéré (3% du germanium contenu dans les minerais de zinc exploités est extrait). La Chine domine le marché avec plus de 65% de la production mondiale.	2	Pour les applications infrarouges, le germanium peut être remplacé par le sélénium de zinc, mais avec une perte de performance. Pour les composants électroniques, l'arséniure de gallium et l'antimoniure d'indium sont des substituts possibles.	4	2	Le germanium est utilisé dans les wafers des cellules photovoltaïques et des semi-conducteurs, ainsi que dans les filtres infrarouge.	MineralInfo
41	Réduction du trafic aérien	Limite planétaire	Une réglementation limite le trafic aérien afin de limiter les émissions de gaz à effet de serre.	Norme réglementaire	Long terme (2050)	4	Il est très probable que le trafic aérien soit régulé à horizon 2050 afin de respecter l'accord de Paris sur le climat, et plusieurs signaux faibles vont dans ce sens (p.ex. annonce de la maîtrise du trafic à l'aéroport Schoenfeld d'Amsterdam, déclaration du président d'ADP sur la sobriété aérienne en 2022, etc.).	1	La réduction du trafic aérien aura quelques impacts minimes sur les activités de la filière spatiale française (réduction du nombre de déplacements à Kourou pour les lancements, éventuellement satellite transporté par voie maritime plutôt que par avion cargo).	4	2	Les études menées par Carbone 4 sur le sujet indiquent que même les meilleurs gains technologiques dans les moteurs aériens ne permettront pas une croissance du trafic de « 2 à 3%/an » comme espérée par les acteurs du secteur (projections IATA).	Expertise C4
42	Pénurie d'hélium	Autres ressources	L'offre mondiale d'hélium ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	1	Les USA ont enlevé l'hélium des ressources critiques en 2021, et ne voient pas de risque à moyen terme. Ils estiment les ressources mondiales à 8500 Mm ³ , pour une production annuelle de 160 Mm ³ .	3	Au lieu d'utiliser l'hélium pour la pressurisation des réservoirs, il est possible d'utiliser la pressurisation autogène, comme cela a été le cas pour la navette spatiale américaine, ou pour des lanceurs prévus comme Starship ou le SLS américain. Néanmoins, cette substitution doit être décidée dès la phase de conception. L'azote peut également être utilisé pour la pressurisation.	3	2	L'hélium est utilisé pour la pressurisation des réservoirs des moteurs à ergols liquides.	USGS
43	Pénurie de Magnésium	Ressources minérales	L'offre mondiale de magnésium ne permet pas de répondre à toute la demande du marché.	Rupture d'approvisionnement	Long terme (2050)	1	Les réserves sont bien réparties géographiquement, et peuvent couvrir plus de 250 ans à consommation constante d'après l'USGS.	3	Le magnésium présent dans les alliages d'aluminium peut être partiellement remplacé. Les substituts possibles sont les composites tels que le plastique renforcé de fibres de carbone, qui posent des problèmes de recyclage, ainsi que les alliages d'acier (plus lourds, donc pas toujours possible) et de titane.	3	2	Le magnésium est utilisé dans les alliages métalliques légers	USGS, Commission européenne
44	Coupures d'électricité (pour le CSG ou les stations sol)	Autres ressources	Des coupures de courant fréquentes en Guyane empêchent le bon fonctionnement des stations sol.	Réseau d'énergie sous tension	Long terme (2050)	2	En 2020, le mix électrique de la Guyane est alimenté par 2/3 d'énergies renouvelables et est donc résilient face à la décline de l'utilisation d'énergie d'origine fossile.	1	En cas de black-outs électriques fréquents sur le réseau guyanais, des générateurs ou des batteries de stockages d'électricité pourraient être déployés pour éviter que cela affecte les opérations des stations sol	2	2	L'ADEME indique que « Les gisements d'énergies renouvelables sont abondants et variés en Guyane. Ils permettraient d'approcher l'objectif de 100 % d'autonomie énergétique sur l'électricité d'ici 2030, en attendant d'y intégrer progressivement les transports. »	ADEME en Guyane



Laurence Monnoyer-Smith
CNES, directrice du développement durable
Laurence.monnoyer-smith@cnes.fr