

Feuille de route pour une filière spatiale française décarbonée





▲ Kourou et les installations du Centre Spatial Guyanais par SPOT 6. © Airbus DS, 2022

Sommaire

Une ambition collective pour un espace plus durable	2
Une démarche volontaire et structurée	3
Ambition de décarbonation de la filière spatiale	5
Un état des lieux inédit	6
Des leviers d'action pour une trajectoire alignée sur la SNBC	8
<i>Thématique 1 : Énergie</i>	9
<i>Thématique 2 : Transport</i>	11
<i>Thématique 3 : Matériaux, ergols et procédés bas-carbone</i>	12
<i>Thématique 4 : Mise en commun</i>	14
<i>Thématique 5 : Données</i>	16
<i>Thématique 6 : Haute atmosphère</i>	16
Des actions facilitatrices complémentaires pour implémenter la feuille de route	18
Trois scénarios, une cible réaliste	21
Un tournant stratégique pour la filière	23
Les actions d'ores et déjà engagées	24
Annexe	27
<i>Méthodologie utilisée pour le calcul de l'empreinte de la filière spatiale française</i>	27



UNE AMBITION COLLECTIVE POUR UN ESPACE PLUS DURABLE

La filière spatiale française est au cœur des grands défis de notre époque. Grâce à ses capacités d'observation de la Terre, de géolocalisation et de télécommunication, elle joue un rôle clé dans les domaines économiques, sociétaux, de souveraineté, mais aussi environnementaux. La filière spatiale contribue ainsi aux modélisations climatiques avec la communauté scientifique en produisant des données essentielles au suivi du système Terre. La moitié des variables climatiques essentielles (ECV) servant à l'actualisation des scénarios du GIEC sont ainsi produites par les instruments embarqués sur les satellites d'observation de la Terre. Ils constituent des outils irremplaçables sur le temps long et à une échelle globale pour surveiller les dérèglements climatiques, détecter la déforestation, l'évolution de la montée des eaux, analyser la composition chimique de l'atmosphère, etc. Ces données sont indispensables pour soutenir les initiatives environnementales mondiales et contribuer à des actions concrètes pour protéger les écosystèmes vivants. De plus, le spatial propose de nombreuses applications contribuant à l'adaptation au changement climatique, en fournissant par exemple aux collectivités et aux communautés des outils d'aide à la décision pour les territoires (îlots de chaleurs, planification urbaine, agriculture, gestion des ressources, etc.). Enfin, le spatial est un instrument indispensable dans la prévention et l'aide aux populations en cas de catastrophe naturelle.

La filière spatiale joue également un rôle essentiel dans la préservation et la garantie de la souveraineté nationale et de l'autonomie stratégique. Un lanceur souverain comme Ariane 6 garantit l'autonomie d'accès à l'espace pour la France et l'Europe et permet le lancement de toutes les missions satellitaires qui contribuent à la mise en œuvre des politiques publiques, notamment dans le domaine de la sécurité et de la défense. Les satellites de surveillance permettent, par exemple de vérifier le respect des accords de non-prolifération des armes, d'assurer la sécurité des populations et d'agir en cas de conflits. Ces capacités assurent à la France et à l'Europe une autonomie décisionnelle indispensable dans un monde incertain et complexe.

Ainsi, les acteurs de la filière spatiale française constituent un vivier d'expertise, d'innovation et de compétences scientifiques indispensables à l'Europe et dont la pérennité doit être assurée. Leur résilience aux mutations socio-économiques et géopolitiques liées au changement climatique nécessite une forte mobilisation qui sera la condition du maintien de la compétitivité à long terme de la filière et un levier important d'innovation. Cette feuille de route entend ainsi initier une première étape décisive articulée autour de la détermination de l'empreinte environnementale du secteur et des efforts de décarbonation qu'il peut mener.

En effet, comme toute activité industrielle, le spatial a un impact carbone. Conception, fabrication, lancement, exploitation : chaque étape génère des émissions de gaz à effet de serre. La filière spatiale s'est donc saisie de ces enjeux et propose une démarche collective pour l'atteinte des objectifs de la France à horizon 2050, et contribuer ainsi au zéro émissions nettes.

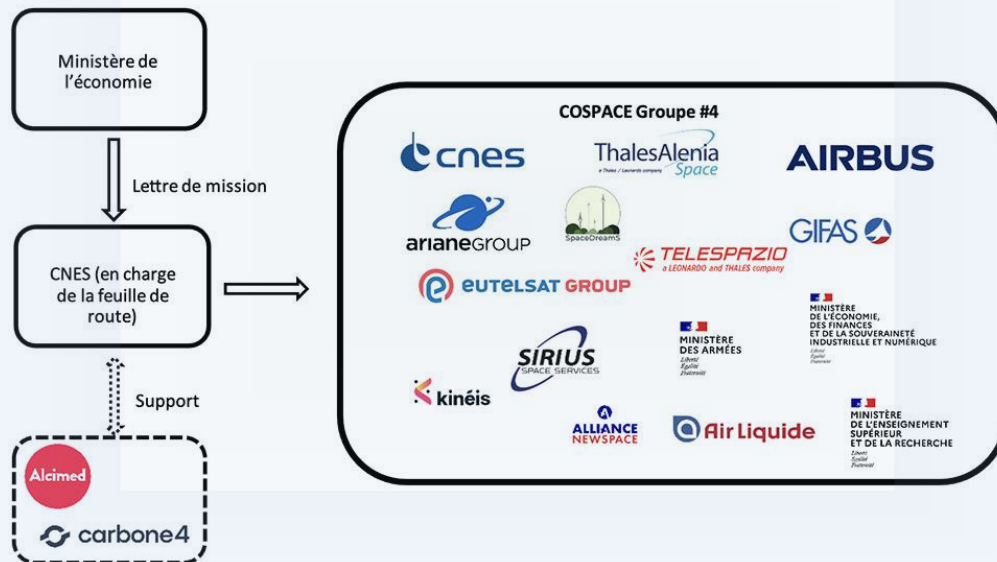
Une démarche volontaire et structurée

Le secteur spatial **n'est pas identifié comme particulièrement émetteur et susceptible de justifier son assujettissement au cadre réglementaire de l'article 301 de la loi Climat et Résilience** réservé aux secteurs industriels les plus émetteurs.

Pour autant, sous l'impulsion du ministère de l'Économie, des Finances et de la souveraineté industrielle et numérique, la filière a décidé de se mobiliser pour prendre sa part à la décarbonation de l'industrie française en proposant des trajectoires aux horizons 2040 et 2050.

La feuille de route est le fruit d'une collaboration étroite, tout au long de l'année 2024, de l'écosystème spatial français rassemblé au sein du groupe de travail « Développement durable » du **Comité de concertation État-Industrie sur l'Espace (COSPACE)**. Les travaux ont été pilotés par le Centre National d'Études Spatiales (CNES), Thales Alenia Space (TAS), et la Direction Générale des Entreprises (DGE). Une vingtaine d'acteurs de l'écosystème ont contribué activement à l'élaboration de cette feuille de route, incluant les principaux ministères concernés, le Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales (GIFAS), l'Alliance NewSpace France, les industriels maîtres d'œuvre, les opérateurs de satellites, ainsi que des équipementiers spatiaux, des opérateurs etc. Au terme de 18 mois de travaux collaboratifs, d'ateliers d'experts et d'entretiens, le groupe de travail du COSPACE a produit, avec le soutien de Carbone 4 et d'Alcimed, un premier document de travail sous la forme d'un rapport technique préparatoire pour l'élaboration de la présente feuille de route. Ce rapport a permis de définir et de rassembler l'ensemble des choix méthodologiques, des données d'entrées et des fiches techniques nécessaires à la mise en œuvre et au suivi de la feuille de route pour les acteurs de la filière. Il propose également une trajectoire de décarbonation alignée sur les objectifs de la France et les leviers mobilisables pour l'atteindre. Constituant un travail de grande ampleur préparé en coopération entre des représentants de l'État, du CNES et de l'industrie, ce rapport a ainsi permis de préparer la présente feuille de route.

Gouvernance de la démarche d'élaboration de la feuille de route de la filière spatiale française



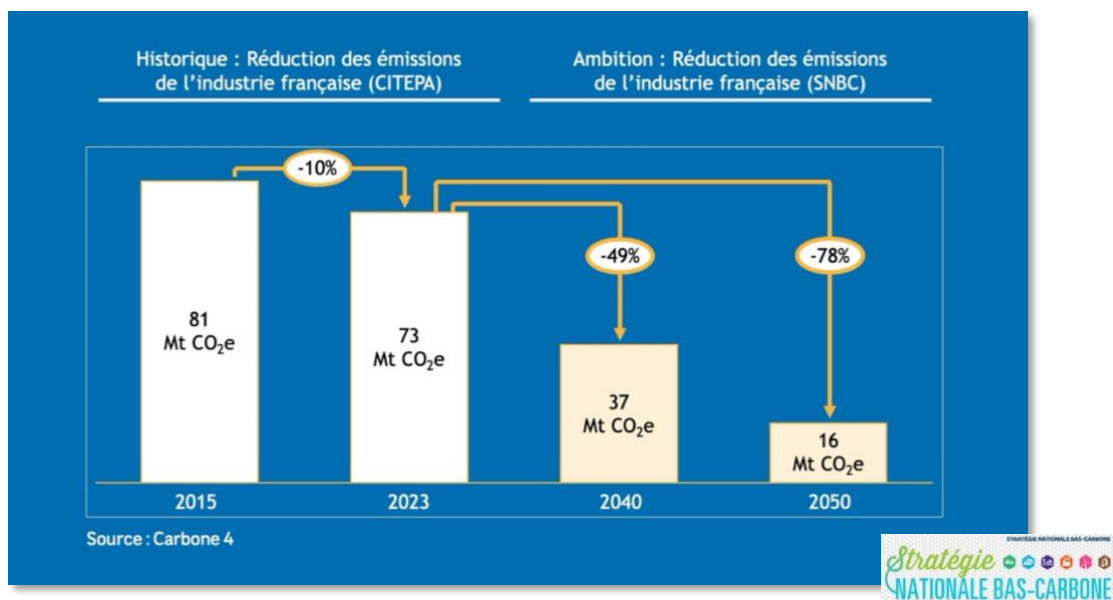
Cette démarche **est une première mondiale parmi les grandes puissances spatiales et positionne la France comme une nation pionnière** pour entreprendre une démarche de décarbonation à l'échelle de la filière. Elle vise également à préparer l'ensemble de l'écosystème spatial aux enjeux stratégiques d'accès aux ressources et à l'énergie dont elle a besoin pour assurer à la France et à l'Europe leur autonomie en matière spatiale. En ce sens, la feuille de route a vocation à accompagner l'évolution d'un secteur dont la soutenabilité et la pérennité apparaissent essentielles pour nos sociétés.



AMBITION DE DÉCARBONATION DE LA FILIÈRE SPATIALE

La filière spatiale propose un scénario ambitieux de réduction aligné avec la Stratégie nationale bas carbone (SNBC), à savoir de **réduire les émissions de 49 % d'ici 2040** (objectif aligné sur la trajectoire « industrie » de la SNBC).

Cette trajectoire sera par la suite régulièrement actualisée dans les versions ultérieures de la feuille de route, pour atteindre une réduction de 78% des émissions de CO₂ par rapport à 2023 à l'horizon 2050. La publication prévue de la SNBC 3 pour l'automne 2025 pourra fournir des éléments d'ajustement nécessaires. De même, des échanges avec le Secrétariat Général à la Planification Ecologique (SGPE) pourront permettre d'ajuster l'ambition finale à l'horizon 2050 pour éventuellement prendre en compte les spécificités du secteur spatial.



▲ Ambition de réduction de la feuille de route de décarbonation de la filière spatiale française alignée sur celle prévue par la SNBC-2 pour le secteur industriel.



UN ÉTAT DES LIEUX INÉDIT

Une première évaluation collective a permis de chiffrer à **1,8 million de tonnes équivalent CO₂ (MtCO₂e)** les émissions annuelles de la filière, sur un périmètre incluant satellites, lanceurs, stations sol et terminaux utilisateurs. Cela correspond à **0,3 % des émissions nationales françaises**.

La part des émissions liées aux **segments sol et utilisateurs** est principalement liée à la consommation électrique et donc fortement influencée par le mix énergétique français, qui a déjà bénéficié d'efforts de réduction et s'avère relativement décarboné. En 2024, 95 % de l'électricité produite en France est décarbonée, avec plus de 70 % de la consommation électrique provenant du nucléaire (contre une moyenne de 25 % en Europe). Cette estimation s'appuie sur les éléments chiffrés disponibles en 2024 et repose sur des hypothèses établies à partir des analyses de cycle de vie réalisées par les acteurs de la filière.

Cette estimation des émissions de carbone de la filière ne comprend pas les effets liés à d'autres types d'émissions, notamment en haute atmosphère. En effet, à la différence des autres secteurs industriels, la filière spatiale présente certaines particularités au regard de son influence sur le bilan radiatif global de la Terre. **Elle est la seule industrie à générer des émissions en haute atmosphère** : lors des phases de mise en orbite et de rentrée atmosphérique d'objets spatiaux, des particules sont émises (suies, alumine et vapeur d'eau générées lors des phases de lancement ou de rentrée atmosphérique) par la décomposition de certains de leurs composants. Des études scientifiques préliminaires suggèrent que ces particules pourraient avoir un impact significatif sur la haute atmosphère. Par conséquent, une des recommandations de la feuille de route consiste à lancer rapidement des recherches approfondies pour quantifier l'impact climatique de ces effets haute atmosphère et identifier des actions de réduction en conséquence.

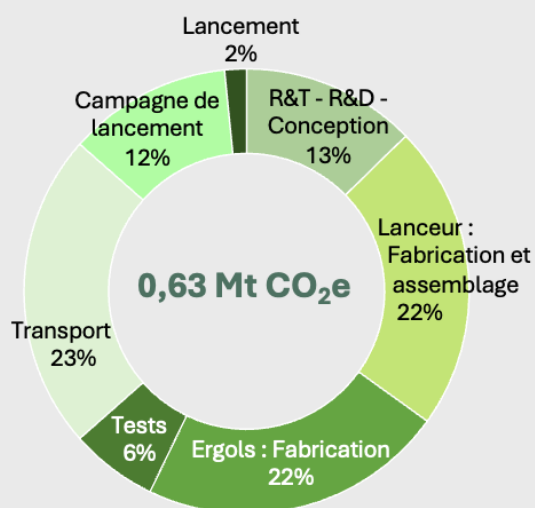
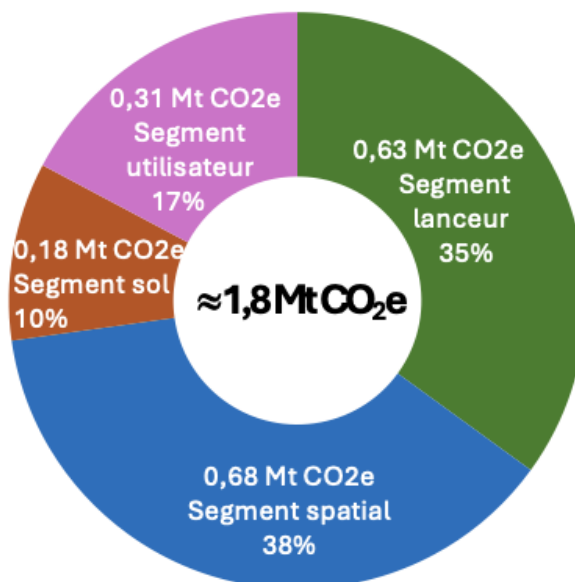


◀ Encapsulation du satellite européen BIOMASS, construit par Airbus DS et lancé depuis le Centre spatial guyanais le 29 avril 2025.

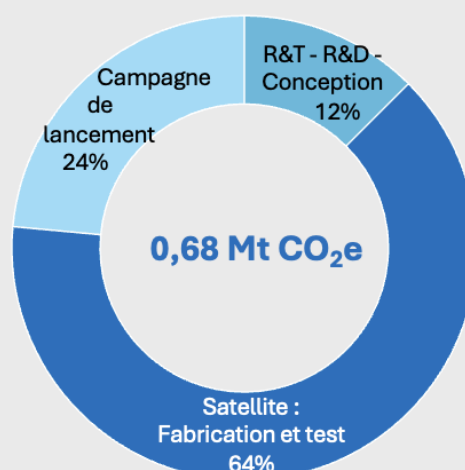
© CNES/ESA/Arianespace-ArianeGroup/Optique Vidéo CSG/S Martin, 2025

Répartition de l'empreinte carbone de la filière spatiale française

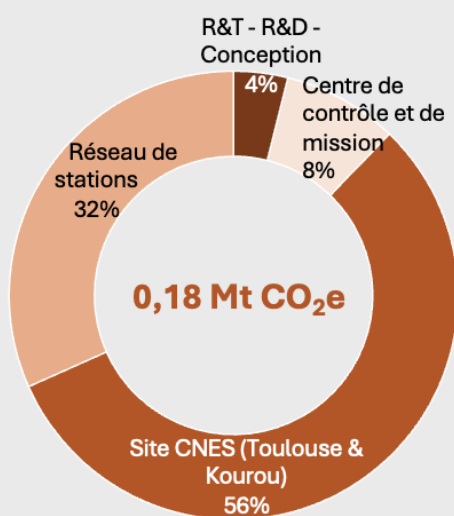
Source : Carbone 4



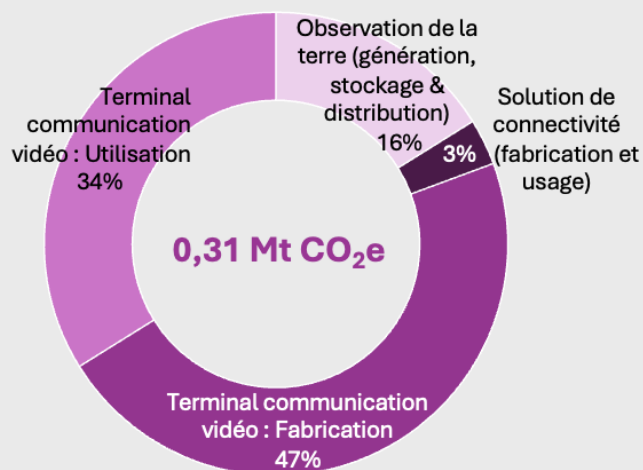
Segment lanceur



Segment spatial



Segment sol



Segment utilisateur



DES LEVIERS D'ACTION POUR UNE TRAJECTOIRE ALIGNÉE SUR LA SNBC

Pour transformer l'ambition en actions concrètes, **12 leviers d'action** ont été identifiés, répartis en 6 grandes thématiques.

Dans ce cadre, des propositions d'évolution des politiques publiques ont été faites, afin d'assurer la soutenabilité économique de la filière et des spécificités propres au secteur spatial, telles que la préservation d'un accès souverain à l'Espace, l'émergence de nouveaux acteurs, le principe de retour géographique de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), l'interdépendance avec d'autres secteurs industriels et son caractère dual.

Les leviers sont détaillés dans le rapport technique pour la filière et s'organisent selon la structure suivante :

- **Impact recherché** : Objectifs principaux visés par le levier.
- **Freins à lever** : Liste des obstacles potentiels pouvant compromettre la mise en œuvre du levier.
- **Actions à mener** : Liste des mesures nécessaires pour assurer la réussite du levier.
- **Propositions d'évolution des politiques publiques** : Modifications des politiques publiques requises pour faciliter l'application du levier.
- **Part de l'empreinte impliquée en 2040** : Proportion de l'empreinte carbone concernée par le levier, exprimée en %.
- **Potentiel de réduction en 2040** : Réduction maximale estimée de la part de l'empreinte carbone impliquée, selon le scénario maximum, exprimée en %.

Les leviers à mobiliser à ce stade par l'ensemble de la filière pour réduire son empreinte sont explicités ci-après. Les actions indiquées en exemple ne sont pas exhaustives. Le rapport technique propose d'autres initiatives dont pourront s'inspirer les acteurs de la filière tandis que le suivi de la mise en œuvre de la feuille de route par le GT « développement durable » du COSPACE pourra permettre d'identifier de nouvelles actions.

Thématique 1 : Énergie

Levier N°1 : Réduire les consommations d'énergie et d'objets des phases de développement, de qualification et de fabrication

Les phases de développement des systèmes spatiaux sont particulièrement énergivores, impliquant divers processus, tels que le travail en bureau d'études ou en laboratoire, la création de maquettes à des échelles différentes, les calculs numériques et les déplacements. Ces activités peuvent être organisées de manière plus sobre, par exemple en limitant le nombre de prototypes développés, ou en utilisant des moyens de production plus économes.

Les phases de qualification et de fabrication des systèmes spatiaux, quant à elles, sont longues et nécessitent des salles propres ainsi que de nombreux équipements techniques fortement consommateurs d'énergie, tels que des cuves à vide thermiques. Par conséquent, ces phases représentent des opportunités pour mettre en place une nouvelle démarche visant à réduire la consommation d'énergie et l'utilisation de matériaux.

Exemples d'actions à mener :

- **Quantifier les consommations** des moyens d'essais, outils individuels et consommables avant de planifier leur réduction, tout en suivant leur évolution dans le temps. **Étendre** cette exigence de quantification à l'ensemble des parties prenantes, notamment les fournisseurs. **Communiquer régulièrement sur les objectifs fixés et les résultats obtenus** pour garantir transparence et engagement collectif.
- **Favoriser la réutilisation du matériel** (machines, informatique, matières premières, moyens sols GSE) entre les programmes spatiaux et les partenaires.
- **Encourager le recyclage** pour optimiser l'utilisation des ressources et réduire la consommation de nouvelles matières.

Levier N°2 : Optimiser les consommations énergétiques des segments sol

Les segments sol, comprenant aussi bien des stations sol de télémétrie, des antennes ou encore des bases de lancement, intègrent d'importants volumes de matériel informatique de calcul et de stockage, ainsi que des espaces dédiés à la réalisation de tests ou à l'assemblage d'éléments sensibles aux variations de température et d'hygrométrie. Ces segments sont donc consommateurs en énergie, car une atmosphère contrôlée et saine doit être maintenue en continu. Il est donc essentiel d'optimiser non seulement le matériel, mais aussi son environnement et son usage, pour réduire significativement l'impact énergétique de ces segments.

Exemples d'actions à mener :

- **Optimiser la consommation énergétique** des segments sol et des moyens industriels

- **Améliorer graduellement les propriétés thermiques des bâtiments.**
- **Appliquer les bonnes pratiques d'économie d'énergie** pour le chauffage et la climatisation.
- **Rationaliser la quantité de hardware** selon les besoins réels, tout en assurant la résilience et la redondance.
- **Renouveler le matériel** en questionnant sa durée de vie, en arbitrant entre l'énergie grise et l'énergie quotidienne, et en tenant compte des obsolescences et des règles du marché.

Levier N°3 : Utiliser des énergies bas-carbone pour l'exploitation des moyens industriels de la filière (y.c. fournisseurs), pour la production des ergols et pour les segments sol

L'adoption d'énergies bas-carbone est indispensable pour répondre aux besoins électriques, pour la production de chaleur dans les installations industrielles de la filière spatiale, ainsi que pour la production des ergols. La promotion de l'autoconsommation, par exemple via l'installation de panneaux photovoltaïques à proximité des segments sol, est également une solution efficace, à condition que son empreinte carbone soit inférieure à celle de l'électricité disponible sur le réseau électrique, notamment pour les sites localisés hors du territoire métropolitain. Dans les régions où l'accès à l'énergie est limité ou contraint, il est recommandé de privilégier le déploiement de solutions d'électricité issue de sources renouvelables. Cette démarche contribuera non seulement à réduire la dépendance aux énergies fossiles et à générer des économies face à l'augmentation de leurs prix, mais aussi à améliorer l'autonomie énergétique grâce à l'autoconsommation. De manière générale, la feuille de route énergétique pour les bâtiments et infrastructures est une base utile pour améliorer la question énergétique des moyens sols et industriels, puisqu'ils consomment de l'énergie comme toute autre industrie. Les émissions liées à la consommation d'énergie de sites spécifiques comme Kourou ou les stations sol répartis dans le monde pourraient être significativement réduites grâce à une amélioration du mix énergétique actuellement peu favorable. Cette évolution permettrait également de développer une production d'ergols moins carbonée.

Exemples d'actions à mener :

- **Définir les moyens énergétiques adaptés à chaque région géographique** (incluant le mix énergétique local, les spécificités climatiques locales et chaque cas d'usage, s'appuyant notamment sur des dispositifs expérimentaux).
- **Privilégier l'autoconsommation**, par exemple en installant des panneaux photovoltaïques à proximité des segments sol.
- **Opter pour de l'électricité avec des garanties d'origines renouvelables** dans les pays où l'énergie bas-carbone est difficilement accessible.
- **Utiliser des énergies bas-carbone** pour les besoins électriques et la production de chaleur, de froid et des ergols des moyens industriels de la filière et des segments sol.

Levier N°4 : Optimiser les consommations énergétiques des terminaux utilisateurs

Une part considérable du bilan carbone dans le secteur du numérique est directement imputable aux terminaux utilisateurs, dont le nombre croissant entraîne une hausse de la consommation énergétique, exacerbée par l'augmentation des performances de ces dispositifs. Ce phénomène est également présent dans le domaine des télécommunications par satellite, où l'expansion du nombre de terminaux contribue de manière significative à l'empreinte carbone du secteur. La réduction de la consommation énergétique de ces terminaux permettrait de limiter l'augmentation des émissions liées à leur acquisition et leur utilisation.

L'efficacité énergétique et la réduction de l'impact écologique sont des considérations majeures dans le développement des antennes de télécommunications par satellite (SATCOM) de type ESA (antenne à balayage électrique). Les solutions d'antennes actives existantes souffrent d'une consommation énergétique et d'une empreinte environnementale élevées liées à l'approvisionnement en composants semi-conducteurs utilisant des terres rares.

Exemples d'actions à mener :

- **Renforcer la R&D sur les terminaux utilisateurs et l'usage du réseau** pour limiter leur consommation énergétique, tout en maîtrisant les coûts, notamment au niveau des antennes et du mode veille des terminaux.
- **Mener des analyses système** afin d'identifier les modifications d'architecture susceptibles de relâcher les exigences sur les terminaux, offrant ainsi des leviers supplémentaires pour réduire leur consommation énergétique.
- **Maximiser la fourniture de systèmes d'alimentation solaire avec les terminaux satellitaires**, surtout dans les régions non desservies avec de l'énergie bas-carbone.
- **Optimiser les architectures satellitaires de bout-en-bout** (segment spatial + segment sol) dans le but d'optimiser les architectures et la consommation des terminaux utilisateurs.

Thématique 2 : Transport

Levier N°5 : Optimiser le transport de personnes, de lanceurs, de satellites et de pièces sur l'ensemble de la chaîne logistique sur Terre

Les chaînes de production de la filière spatiale française sont souvent dispersées à travers le territoire national et européen, ce qui allonge et complexifie la logistique, et génère une empreinte carbone significative. De plus, les sites de lancement (tels que le Centre Spatial Guyanais), étant souvent éloignés des sites de production ou d'essais des lanceurs et objets spatiaux, les produits et les personnes doivent souvent effectuer des traversées transatlantiques par bateau ou avion. C'est par exemple le cas lors des opérations d'assemblage sur pas de tir et des opérations de lancement. L'optimisation de

ces flux logistiques, qu'il s'agisse du transport de personnes, de lanceurs, de satellites ou de pièces, par une rationalisation des déplacements, une meilleure localisation des sites et l'adoption de stratégies de transport bas-carbone et multimodales, permettrait de réduire de manière significative l'empreinte environnementale des activités d'assemblage et de lancement.

Exemples d'actions à mener :

- **Rationaliser la chaîne de production**, notamment en :
 - **Réduisant les distances cumulées.**
 - **Effectuant du report modal vers des transports optimaux** en termes d'empreinte carbone.
 - **Favorisant l'implantation des sites dans des pôles ou des clusters déjà existants.**
 - **Utilisant des transporteurs ayant un label vertueux en carbone** de type « objectif CO₂e » dans la mesure où ceux-ci existent.
- **Rationaliser le transport de personnes**, en :
 - **Favorisant la conception de systèmes de télé opération, téléaction et télémaintenance des missions à distance** afin de permettre la centralisation et la mise en commun des équipes d'exploitation, réduire les besoins de déplacements sur les sites opérationnels.
 - **Implémentant des jumeaux numériques** pour éviter de se rendre sur site.

Thématique 3 : Matériaux, ergols et procédés bas-carbone

Levier N°6 : Développer et utiliser des matériaux et des procédés bas-carbone pour la fabrication des lanceurs, des satellites, des segments sol et des moyens industriels de la filière

Les procédés de fabrication ainsi que la consommation de matériaux dans l'industrie spatiale contribuent significativement aux émissions carbone. Ce phénomène est d'autant plus accentué que les systèmes spatiaux requièrent des matériaux complexes, soit pour miniaturiser les technologies (ex. : semi-conducteur), soit pour les rendre résilientes aux conditions extrêmes de l'environnement spatial.

Afin de réduire l'empreinte carbone liée à l'utilisation des matériaux et aux procédés associés, aussi bien au sein de l'industrie spatiale qu'au-delà, plusieurs solutions peuvent être envisagées. La mise en place de matériaux à faible impact carbone, tels que les matériaux recyclés (ex. : aluminium, titane, cuivre, etc.), le recours à des matériaux de substitution (ex. : emploi de silicium en lieu et place du germanium lorsque cela est possible), l'utilisation de matériaux issus de productions bas-carbone, l'amélioration du taux d'utilisation des matériaux (ratio d'achat pour vol vs tests), de la durée de vie des produits, ainsi que la récupération et réutilisation des étages de lanceurs utilisés (après

une étude de pertinence prenant en compte les émissions de la rentrée atmosphérique), constituent des pistes prometteuses pour réduire l'empreinte environnementale des missions spatiales.

Exemples d'actions à mener :

- **Aligner l'ensemble des acteurs de la filière spatiale française** sur une définition commune de matériaux « bas-carbone ».
- **Inclure le processus d'écoconception** dans la phase de conception de chaque acteur de la filière spatiale française.
- **S'appuyer sur les feuilles de route des autres filières** pour identifier les matériaux et procédés permettant de réduire l'impact carbone, et qui pourraient également être appliqués dans la filière spatiale.
- **Instruire les scénarios de disponibilité des matériaux et éléments recyclés**, notamment par la récupération de certains étages lanceurs, d'équipements réformés, le recyclage des matériaux issus d'autres filières, ainsi que la circularité interne pour minimiser les pertes d'usinage, tout en évaluant le potentiel d'utilisation qui en résulte.

Levier N°7 : Développer et utiliser des ergols bas-carbone pour les lanceurs et les satellites

Ce levier aborde la décarbonation des ergols sous l'angle des procédés chimiques (choix d'un procédé par rapport à un autre), et non sous l'angle de l'utilisation d'énergie décarbonée, qui est traitée par le levier N°3. Le développement et l'utilisation d'ergols bas-carbone pour les lanceurs et satellites visent à réduire leur empreinte carbone à plusieurs niveaux. Ces ergols peuvent diminuer les émissions liées aux procédés de production, souvent énergivores et éloignés des zones d'utilisation, à condition qu'une source de production bas-carbone soit disponible à proximité. Ils contribuent également à réduire les émissions carbone lors de la combustion sur Terre et devraient atténuer les effets haute atmosphère. Cependant, les effets haute atmosphère générés lors du lancement ne sont pas uniquement corrélés à l'emploi d'ergols moins émetteurs, car ils relèvent de dynamiques distinctes. Il est donc essentiel que la filière aborde ces aspects de manière complémentaire, et que des recherches approfondies soient conduites sur ces aspects.

Exemples d'actions à mener :

- **Aligner l'ensemble des acteurs de la filière spatiale française sur une définition commune d'ergol « bas-carbone »**, ce qui implique de mieux quantifier, par des travaux de recherche, l'impact climatique de la fabrication et la combustion des différents ergols (voir levier HA).
- **Inclure le processus d'écoconception** dans la phase de conception de chaque acteur de la filière spatiale française.
- **Étudier le gain de réduction carbone d'ergols « bas-carbone »**.

- **Aligner l'ensemble de la stratégie d'évolution des systèmes propulsifs** avec ceux présents dans la feuille de route de l'industrie de la chimie.

Levier N°8 : Réduire l'impact matière des terminaux utilisateurs

Les terminaux utilisateurs ont un impact significatif sur le bilan carbone des télécommunications par satellite. De plus, la demande en terminaux utilisateurs est en forte croissance, notamment à cause de l'arrivée des constellations permettant des télécommunications satellites à bas coût. Il est donc essentiel de s'appuyer sur ce levier pour réduire cet impact de manière efficace.

Exemples d'actions à mener :

- **Amorcer la R&D pour l'écoconception des terminaux** au niveau des matières premières utilisées, tout en prenant en considération les problématiques d'approvisionnement stratégiques (maîtrise de la chaîne d'approvisionnement et garantie de son maintien en temps de crise).
- **Penser modularité et interopérabilité** pour permettre la réutilisation d'un même terminal sur différents systèmes SATCOM. Par exemple, un même modem pourrait être utilisé pour plusieurs systèmes, ou l'on pourrait remplacer un modem sans changer l'antenne. Cela implique la mise en place d'un terminal et d'un standard unique ou d'interfaces compatibles, facilitant ainsi l'intégration et la flexibilité des équipements dans les réseaux satellitaires. À ce stade l'action est limitée au périmètre français.
- **Promouvoir des technologies d'antennes multibandes de fréquence** (Ku et Ka) **et multiorbites** (GEO/LEO).
- **Favoriser le modèle « Terminal à la demande »** (*Terminal as a Service*) pour certains usages grand public, où un seul système est utilisé à la fois.

Thématique 4 : Mise en commun

Levier N°9 : Favoriser et accompagner la mise en commun des outils industriels de la filière

Pour optimiser les ressources existantes et éviter le développement de nouvelles infrastructures redondantes, il est nécessaire de privilégier l'usage des moyens industriels déjà en place. Cela passe entre autres par une augmentation du taux d'utilisation de ces équipements et par la mise en commun de certains outils industriels dans la filière spatiale, à la fois au niveau national et européen. Ce levier est d'autant plus important que certaines infrastructures sont très énergivores (ex. : les salles blanches). Ces infrastructures et les moyens de tests, souvent coûteux à développer et à entretenir, gagneraient à être utilisés par un plus grand nombre de parties prenantes, réduisant ainsi la duplication des investissements.

Exemples d'actions à mener :

- **Favoriser la mise en relation entre les acteurs** en consolidant la cartographie des moyens mutualisés et mutualisables pour la conception, la fabrication, les tests et les opérations des infrastructures spatiales.
- **Standardiser les offres de mise en commun**, notamment via une standardisation des interfaces des moyens et outils industriels partagés, ainsi que des produits nécessitant l'utilisation de ces ressources.
- **Mettre en place des procédures spécifiques de nettoyage** avec un contrôle qualité du nettoyage de l'après-test.
- **Virtualiser au maximum les essais** afin de diminuer le nombre de tests réels et donc de réduire la durée d'utilisation, par un même acteur, des moyens d'essais communs. Cela augmenterait leur disponibilité pour d'autres utilisateurs tout en réduisant leur consommation en énergie, ergols, etc.

Levier N°10 : Mettre en commun et standardiser les bases de lancement, les centres de contrôle et de mission lanceurs et satellites et les stations sol

L'augmentation du nombre de lancements de satellites et des systèmes de lancements tend à augmenter le nombre de bases de lancement, mais aussi de centres de contrôle et de mission lanceurs et satellites, ainsi que de stations sol associées. L'empreinte carbone globale de ces infrastructures peut être diminuée malgré la hausse du besoin en limitant leur nombre *via* une mise en commun, et en accroissant le taux d'utilisation (moyennant adaptation) des installations actuelles parfois sous-utilisées. Cela permettra de continuer à garantir un accès à l'espace pour tous, sans créer systématiquement de nouvelles infrastructures.

Exemples d'actions à mener :

- **Développer des standards européens**, notamment pour les interfaces lanceurs, satellites et carburants.
- **Concevoir et exploiter une base de lancement** capable d'accueillir différents types de lanceurs sur un même pas de tir.
- **Concevoir des lanceurs compatibles avec les standards des pas de tir** (action dépendant des résultats de *l'European Launcher Challenge* de l'ESA lors de la Conférence ministérielle de l'ESA prévue en 2025).
- **Standardiser, virtualiser et cybersécuriser les centres de contrôle, de missions et les stations sol** afin de les rendre « multi-missions » avec une approche rationalisée au niveau français et européen.

Thématique 5 : Données

Levier N°11 : Optimiser la génération, le stockage et le traitement des données scientifiques et d'observation de la Terre

Actuellement, les systèmes de stockage sont souvent redondants et impliquent la duplication des données pour garantir la sécurité et la disponibilité des informations critiques. Cependant, cette pratique nécessite une infrastructure matérielle importante, consommatrice d'énergie. En réduisant les volumes de données à stocker ou en limitant la fréquence et la systématique de leur transmission, il serait possible de diminuer les besoins en équipements et en énergie. Cela permettrait non seulement de réduire l'empreinte carbone associée à la production et à l'exploitation de ces systèmes, mais aussi d'optimiser l'efficacité énergétique de l'ensemble des opérations spatiales.

Exemples d'actions à mener :

- **Rationaliser le volume de données scientifiques et d'observation de la Terre** traitées, stockées et distribuées en s'appuyant sur les travaux déjà réalisés par le CNES.
- **Identifier en amont les données nécessaires** en fonction du besoin et de l'intérêt sociétal afin de réduire la collecte, le stockage et le traitement des données superflues.
- **Favoriser l'établissement de partenariats internationaux**, au-delà des grandes puissances spatiales, pour encourager le partage de données scientifiques et optimiser l'utilisation des ressources globales.
- **Étudier des stratégies d'accès et de calcul à la demande plutôt que de manière systématique** en fonction des cas d'usage pour réduire la consommation de ressources.
- **Développer des stratégies d'acquisition et de transfert de données à la source**, directement à bord des satellites, afin de réduire la quantité de données transférées entre les satellites et les stations au sol.

Thématique 6 : Haute atmosphère

Levier HA : Réduire la proportion de matériaux et d'ergols à fort impact radiatif et/ou d'appauvrissement de l'ozone, pour la phase propulsée et la rentrée atmosphérique des lanceurs et des satellites

Des travaux de recherche approfondis doivent être menés afin de mieux comprendre les phénomènes liés à la haute atmosphère. Ces recherches doivent permettre d'orienter le développement et la sélection de matériaux et d'ergols moins impactant pour les lanceurs et satellites de demain. Bien que la magnitude de l'impact de certains matériaux et ergols en haute atmosphère soit encore méconnue, leur contribution au forçage

radiatif est quasiment une certitude aujourd'hui. Il est essentiel de réduire la proportion de matériaux et d'ergols ayant un fort impact radiatif ou contribuant à l'appauvrissement de la couche d'ozone. Par ailleurs, des études portant sur l'amélioration de l'efficacité de la combustion des moteurs peuvent contribuer à réduire la proportion de ces émissions.

Au regard des ordres de grandeur attendus, le déploiement de ce levier est prioritaire.

Exemples d'actions à mener :

- **Mettre en place des travaux de recherche** comprenant des simulations, modélisations et caractérisations afin de mieux comprendre les phénomènes se produisant dans la haute atmosphère lors des phases de lancement et de réentrée.
- **Développer** des matériaux ou ergols à faible impact radiatif et/ou d'appauvrissement de l'ozone minimisant les effets haute atmosphère.
- **Accompagner la filière dans le financement de cette transition** en priorisant la R&D, notamment autour des matériaux biosourcés.



▲ Ariane 6 sur son pas de tir au Centre spatial guyanais.



DES ACTIONS FACILITATRICES COMPLÉMENTAIRES POUR IMPLÉMENTER LA FEUILLE DE ROUTE

Afin de soutenir la mise en œuvre de la feuille de route autour d'une ambition commune, des actions facilitatrices ont été identifiées pour harmoniser les efforts. Elles visent à aligner les acteurs sur des objectifs partagés, établir des critères communs, et promouvoir l'adoption de bonnes pratiques environnementales à l'échelle de l'ensemble de la filière. Elles devront permettre de préserver la compétitivité de la filière, de prévoir le soutien financier nécessaire à la mise en œuvre des leviers, et d'intégrer un volet emploi et compétence et un volet recherche.

👉 **Action facilitatrice N°1 : Établir des objectifs communs au sein de la filière pour réduire l'intensité carbone des différents types d'objets (segments lanceur, spatial, sol et utilisateur)**

L'adoption d'une "vision système" partagée permettrait à chaque acteur d'évaluer les impacts environnementaux de manière globale et d'éviter les effets rebonds ou les transferts de carbone entre les sous-systèmes (lanceurs, satellites, segments sol, segments utilisateur).

👉 **Action facilitatrice N°2 : Intégrer des critères d'impacts environnementaux et sociétaux au sein des programmes d'investissements**

Pour orienter les investissements vers des programmes spatiaux plus durables et responsables, il est nécessaire de définir une méthodologie spécifique et des critères d'évaluation basés sur plusieurs axes clés :

- L'empreinte carbone ;
- L'utilité sociétale et environnementale de la mission ;
- La comparaison avec des alternatives : À service équivalent, ce critère compare les programmes spatiaux à d'autres solutions.

👉 **Action facilitatrice N°3 : Définir au niveau de la filière des critères carbone communs dans le cahier des charges des fournisseurs**

Pour renforcer la transition vers une filière spatiale plus durable, il convient de mettre en place des critères carbone communs dans le cahier des charges des fournisseurs de pièces, d'équipements et de services de la filière spatiale. Ces critères pourront inclure l'évaluation de l'empreinte carbone des matériaux et composants, l'utilisation de matériaux durables, l'optimisation des procédés de fabrication ou encore une réduction de l'empreinte logistique. Cette approche, déjà initiée par les achats publics, devrait être généralisée.

 Action facilitatrice N° 4 : Promouvoir les bonnes pratiques environnementales dans le spatial à l'échelle nationale, européenne et internationale

S'il est incontestable qu'à l'avenir une filière spatiale décarbonée et à faible empreinte environnementale pourra seule assurer le plein exercice de la souveraineté spatiale européenne, il reste que la phase de transformation à traverser par l'écosystème est difficile et critique. Son déploiement doit être protégé par la mise en place d'un cadre de concurrence équitable entre l'industrie française et ses concurrents européens et extra-européens, incluant notamment un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières de l'Union européenne.

 Action facilitatrice N° 5 : Favoriser la transparence de l'impact environnemental des services spatiaux auprès des utilisateurs finaux

Il est essentiel de mettre en place un affichage clair et accessible des informations sur les impacts environnementaux des services spatiaux à destination des utilisateurs finaux et des citoyens. Cela permettrait de sensibiliser le public aux conséquences écologiques de l'utilisation des services spatiaux, en particulier dans des secteurs comme les télécommunications. Par exemple, un indicateur tel que « CO₂e émis/Gigaoctet consommé » pourrait être utilisé pour informer les utilisateurs de l'empreinte carbone liée à leur consommation de données.

 Action facilitatrice N° 6 : Sensibiliser et former les universitaires, les ingénieurs, les politiques et les acteurs du spatial français ainsi que leurs fournisseurs aux enjeux environnementaux du spatial

Plusieurs initiatives existent déjà pour sensibiliser et former aux enjeux environnementaux dans la filière spatiale. Il s'agit désormais de structurer et de systématiser cette démarche, en intégrant ces thématiques de façon transversale dans les programmes de formation et les colloques spécialisés. Cela implique notamment l'introduction de modules dédiés au sein du tronc commun des cursus d'ingénieurs et universitaires, en incluant des contenus spécifiques à la filière spatiale, tels que des études de cas concrètes.

 Action facilitatrice N° 7 : Initier des programmes de démonstration sur l'optimisation carbone des lanceurs et des satellites

Pour accélérer la décarbonation de la filière spatiale, il est essentiel de mettre en place des programmes de démonstration axés sur l'optimisation environnementale des lanceurs et des satellites. Ces programmes doivent s'appuyer sur les technologies actuelles afin de prouver qu'il est possible d'améliorer la durabilité des engins spatiaux tout en maintenant leur performance opérationnelle.

Ces initiatives permettront de tester et de valider des solutions innovantes, comme l'utilisation de matériaux à faible empreinte carbone, l'optimisation des cycles de vie ou encore l'amélioration de l'efficacité énergétique. En démontrant concrètement les bénéfices environnementaux, ces programmes encourageront leur adoption à plus grande échelle dans l'industrie.

 Action facilitatrice N° 8 : Initier des travaux de recherche & développement sur les « systèmes spatiaux décarbonés »

Il convient d'introduire des analyses systémiques des architectures des missions spatiales lors de la réalisation d'empreinte carbone, englobant le segment lanceur, le segment spatial, le segment sol et le segment utilisateurs. Ces analyses doivent prendre en compte l'ensemble de l'écosystème et inclure des aspects tels que l'interopérabilité des systèmes terrestres et spatiaux à l'échelle mondiale, ainsi que les effets haute atmosphère.

En adoptant cette vision globale, il devient possible d'identifier les interactions et les synergies potentielles qui peuvent améliorer l'empreinte carbone. Cela permettrait d'optimiser les systèmes tout au long de la chaîne de valeur et de faciliter la coordination entre les infrastructures terrestres et spatiales pour un impact environnemental réduit.

 Action facilitatrice N° 9 : Initier des travaux de recherche & développement sur la circularité des satellites

Enfin, un effort particulier doit être fait en recherche et développement axé sur la circularité des satellites sur deux aspects clés : les services en orbite et la logistique spatiale.

Dans le domaine des services en orbite, l'objectif est de développer des technologies et des solutions permettant de prolonger la durée de vie des satellites, notamment grâce à des opérations de maintenance, de réparation, d'ajout de charge utile ou encore de ravitaillement en orbite.

La recherche dans le domaine de la logistique spatiale devrait porter sur son optimisation, en particulier sur les frontières fonctionnelles entre lanceurs et satellites. Cela inclut l'étude de la coordination et de la complémentarité entre les systèmes de lancement et les satellites eux-mêmes, afin de rendre les opérations spatiales plus efficaces et durables.

Ces initiatives contribueraient à réduire considérablement les débris spatiaux tout en favorisant une approche circulaire dans la gestion des ressources en orbite, diminuant ainsi le nombre et la masse des objets à fabriquer et lancer.



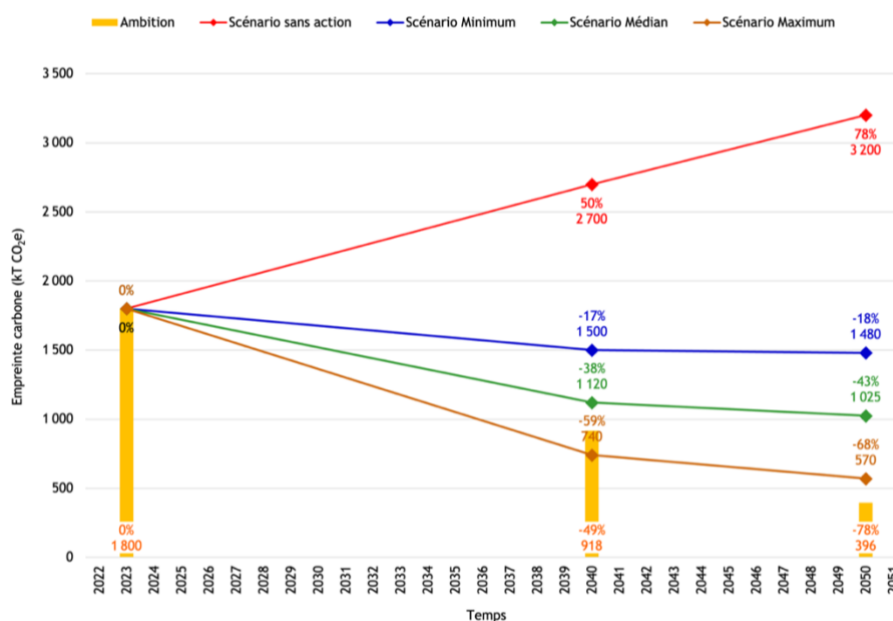
TROIS SCÉNARIOS, UNE CIBLE RÉALISTE

Il faut savoir que trois trajectoires possibles ont été modélisées et que seul le scénario « maximum », intégrant tous les leviers détaillés plus haut, permettrait d'atteindre les -49 % d'émissions carbone en 2040. Mais il suppose un engagement très élevé et comporte des incertitudes liées notamment à la maturité technique des solutions proposées et à l'efficacité de leur déploiement sur le terrain.

À ce stade, par souci de réalisme, la feuille de route retient donc un **scénario intermédiaire visant -38 % d'émissions d'ici 2040**. Il met en lumière la nécessité d'**identifier de nouveaux leviers d'ici 2050** pour combler l'écart restant. Le scénario « médian » nécessitera une réduction supplémentaire des émissions de 904 ktCO₂e sur la période 2040 – 2050, pour atteindre l'objectif final de réduction de 78% de 2050. Ce constat souligne donc le besoin de mener des études supplémentaires pour augmenter l'efficacité des leviers imaginés et en identifier de nouveaux.

La diversité des leviers met en évidence la maturité et l'effort de mise en œuvre propres à chaque segment, qui diffèrent les uns des autres. Ainsi, certains leviers pourront être activés plus facilement, tandis que d'autres nécessiteront des mobilisations et des investissements plus conséquents.

Trajectoires de décarbonation





Pléiades Neo Satellite Image - Toulouse, France ©Airbus DS

▲ Toulouse, ville emblématique du spatial français, sous l'œil du satellite Pléiades Neo.



UN TOURNANT STRATÉGIQUE POUR LA FILIÈRE

La décarbonation est bien plus qu'une obligation environnementale : elle constitue une **opportunité stratégique** pour renforcer l'indépendance technologique, la résilience et l'attractivité de la filière spatiale française. En ce sens, cette feuille de route entend prendre sa part dans en tant que levier de transformation de la politique industrielle dans le secteur spatial. En traçant cette voie, la France invite aussi ses partenaires européens à la rejoindre, pour construire ensemble une industrie spatiale **plus durable, plus forte et tournée vers l'avenir**.

Le COSPACE GT#4, responsable de son élaboration, assurera le suivi opérationnel de ces actions de même que l'actualisation régulière de cette feuille de route (leviers, hypothèses, croissance...). Ce suivi opérationnel permettra également l'actualisation régulière des données ainsi que des actions nécessaires. Il invite également l'ensemble de la filière à se saisir des conclusions de cette feuille de route et du rapport technique associé afin de réussir cette transition, et appelle à un engagement collectif et partagé par tous les acteurs et par les politiques publiques.

L'harmonisation des objectifs au sein de l'Union européenne ainsi que la garantie de la cohérence des actions entre les États membres seront évidemment essentielles pour assurer une application équitable et efficace de cette feuille de route et un maintien de la compétitivité de l'ensemble de la filière, à l'échelle européenne. Une gouvernance spécifique sera mise en place pour assurer le suivi opérationnel et l'actualisation régulière de la feuille de route. La réalisation de cette feuille est en particulier liée à des conditions de succès, et à la levée d'un certain nombre de freins qui conditionnent l'atteinte des objectifs.

À long terme, cette feuille de route vise à renforcer la compétitivité et l'autonomie des acteurs français au service d'une politique spatiale européenne ambitieuse, soutenable, décarbonée et pérenne. Cette démarche participera également à son rayonnement international tout en étendant l'impact des leviers de décarbonation pour d'autres nations, dans une filière marquée par des dépendances stratégiques et des enjeux de compétitivité à l'échelle mondiale.



LES ACTIONS D'ORES ET DÉJÀ ENGAGÉES

Les membres du Cospace se mobilisent d'ores et déjà pour la transition bas carbone et soulignent que les leviers identifiés s'inscrivent dans la continuité de travaux de recherche, d'investissement et de montée en compétence globale de leurs équipes. L'expertise dont disposent les entreprises en analyse d'impacts environnementaux en particulier grâce aux programmes institutionnels constitue un socle robuste pour des développements techniques à venir.

Sans prétendre à l'exhaustivité, le présent document souhaite mettre en évidence quelques actions engagées qui constituent des bases solides pour une mise en œuvre ambitieuse de la feuille de route. Elles sont ici évoquées à titre illustratif afin d'insister sur la dynamique en cours dans la filière.

Chez **Airbus** actuellement, une attention particulière est portée sur l'évaluation des impacts des produits, des missions, sur la circularité des matériaux, sur la réduction des impacts de ses sites industriels, et sur le développement de méthodologies d'analyse d'impact environnemental en collaboration avec la filière (dans le cadre de la concertation européenne *Product environmental footprint category rules* pour le spatial par exemple). La présente feuille de route devrait permettre d'accélérer l'émergence et le développement d'alternatives technologiques durables qui préserve les performances techniques tout en développant les coopérations avec la chaîne d'approvisionnement et les clients.

L'ensemble des activités menées par **ArianeGroup** contribuent de manière significative au développement économique, scientifique et technologique du pays et dans ce contexte le groupe est conscient de son rôle dans la protection de l'environnement. ArianeGroup engage d'ores et déjà des actions dans ce sens au travers de sa feuille de route climat avec notamment la réduction de l'impact du transport d'Ariane 6 vers la Guyane via le cargo hybride Canopée. La prise en compte de l'impact environnemental produit est de plus en plus associée à la stratégie du groupe. Ainsi, la filiale MaiaSpace intègre les principes d'écoconception dès les premières étapes de définition du lanceur.

Pour **Thales**, une stratégie bas-carbone ambitieuse qui reflète son engagement dans la lutte contre le changement climatique est déployée depuis 2019. Cette démarche vise à réduire significativement les émissions du Groupe ainsi que celles issues de sa chaîne d'approvisionnement. Thales a défini des trajectoires de réduction d'émissions à horizon 2030 compatibles avec l'Accord de Paris et validées par la SBTi (*Science Based Targets initiative*). Le Groupe est également engagé dans une démarche globale d'éco-conception pour améliorer la performance de ses produits, optimiser leur cycle de vie et réduire leur empreinte environnementale.

C'est dans ce cadre que Thales Alenia Space a notamment développé en 2022 une démarche stratégique de transformation ayant notamment conduit au développement d'outils spécifiques permettant d'évaluer l'empreinte environnementale de ses solutions et d'analyser les marchés au regard de leur performance de durabilité. L'entreprise est également à l'avant-garde du développement de solutions en faveur d'un espace plus durable telles que les technologies de robotique spatiale (*On Orbit Servicing*) visant à prolonger la durée de vie des satellites et à réduire les débris spatiaux.

L'opérateur de satellites **Eutelsat** a intégré des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre, validés par l'initiative *Science Based Targets* (SBTi) en janvier 2025. Alignés sur l'Accord de Paris, ces objectifs prévoient une baisse de 50 % des émissions absolues (Scopes 1 et 2) et de 52 % de l'intensité carbone par Mbit satellitaire (Scope 3) d'ici 2030. Le bilan carbone est publié chaque année selon la méthodologie *GHG Protocol*.

Eutelsat se conforme aux exigences de transparence de la directive européenne CSRD (*Corporate Sustainability Reporting Directive*) et en fait un outil stratégique en matière de performance RSE.

L'opérateur est également un acteur engagé pour une utilisation responsable de l'espace, avec un objectif de zéro débris dans les régions orbitales protégées, en lien avec ses activités en orbite GEO.

Au sein de l'écosystème **NewSpace**, plusieurs initiatives sont déployées pour répondre aux objectifs de décarbonation de la filière spatiale. Celles-ci reposent d'une part sur le développement de technologies à plus faible impact environnemental. À titre d'exemple, Greenerwave conçoit des terminaux SATCOM utilisateurs basse consommation réduisant l'empreinte en matière en semi-conducteurs, et MECANO ID développe des pièces mécaniques écoconçues et écoproduites.

D'autres leviers viennent compléter cette dynamique en promouvant un usage plus durable du spatial : SpaceLocker propose des missions spatiales partagées permettant de réduire l'empreinte carbone des missions et la création de débris, et SpaceDreamS œuvre à la mutualisation des infrastructures avec le développement d'un pas de tir partagé.

Enfin, le **CNES** déploie notamment une ambitieuse stratégie de décarbonation de la base spatiale de Kourou afin de faire bénéficier tous les utilisateurs d'une infrastructure résiliente et à faible émission. Le déploiement de champs photovoltaïques offrira d'ici 2 ans une électricité renouvelable à l'ensemble des industriels de la base, et le programme Hyguane (Hydrogène guyanais à neutralité environnementale) déploiera à moyen terme la première filière d'hydrogène verte outre-mer.

Conscient de son rôle d'agence spatiale, le CNES s'engage à travers son *Schéma de promotion des achats socialement et écologiquement responsable* à soutenir l'ensemble de la filière dans ses efforts de décarbonation.

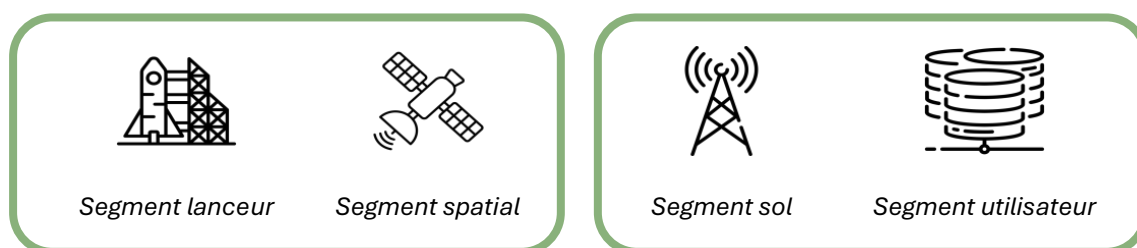
Le CNES s'engage également à accompagner la filière en produisant des outils ouverts d'analyse de cycle de vie pour les différents segments, et à soutenir des études et travaux de recherches au bénéfice de tous.

La réalisation de cette feuille de route a également suscité de nombreuses réactions engagées de petites et moyennes entreprises qui pourront faire part à leur tour des actions qu'elles souhaitent mettre en œuvre. Les prochains bilans de la feuille de route pourront relayer ces bonnes pratiques et partager les résultats observés.

Annexe

Méthodologie utilisée pour le calcul de l'empreinte de la filière spatiale française

Les segments considérés pour l'évaluation de l'empreinte carbone de la filière spatiale sont les lanceurs, le segment spatial, le segment sol et le segment utilisateur.



Un **lanceur** est un véhicule spatial conçu pour transporter une charge utile (telle qu'un satellite) depuis la surface de la Terre jusqu'à l'espace. Les lanceurs peuvent être réutilisables ou à usage unique et utiliser différents types de propulsion (solide, liquide, hybride), selon leur conception.



Le segment lanceur couvre toutes les étapes du cycle de vie des véhicules spatiaux, de l'assemblage à la campagne de lancement. Il prend en compte la recherche et le développement (R&D), l'intégration des composants, leur fabrication et les tests de fiabilité, jusqu'au transport vers les sites de lancement, la préparation finale pour le décollage et le lancement. Il tient également compte de la production des ergols nécessaires au lancement.



Le segment spatial comprend l'ensemble des éléments physiques dans l'espace nécessaires au fonctionnement d'un système spatial (ex. : satellites, stations spatiales, sondes spatiales, modules de service, etc.), ainsi que les éléments opérants dans la stratosphère (ballons, HAPS, etc.). Il englobe l'ensemble du cycle de vie des segments spatiaux (satellites, sondes, etc.), depuis leur conception jusqu'à leur mise en service et leur utilisation. Il comprend la R&D, la fabrication des composants, l'assemblage des modules, les tests de fiabilité, le transport vers les sites de lancement, ainsi que les préparatifs finaux avant le lancement et leur utilisation. Cependant, comme pour les lanceurs, il ne prend pas en compte la fin de vie des satellites ni leur éventuelle réentrée, en raison d'un manque de données et d'une forte incertitude concernant les effets haute atmosphère.

On distingue 2 types de segments sol : la gestion et l'exploitation des satellites et de leurs données d'une part, les moyens sols nécessaires à la réalisation d'une mission spatiale d'autre part.



Le segment sol « satellite » comprend l'ensemble des infrastructures nécessaires pour contrôler et exploiter les satellites, mais aussi pour recevoir et analyser les données spatiales. Il inclut la R&D, les centres de contrôle, les centres techniques, les stations de télémesure, de suivi et de commande *Telemetry, Tracking and Command* (TT&C), les systèmes de télécommunication et de réception, de stockage et de traitement des données, et les systèmes de surveillance de l'espace au sol, comme les radars et télescopes de *Space Situational Awareness* (SSA). Il inclut aussi les sites de lancement (ou base de lancement) comme le CSG qui sont des emplacements géographiques spécialement aménagés pour lancer des lanceurs dans l'espace. Ils comprennent généralement plusieurs infrastructures, dont des moyens supports (générateur d'énergie, installations de télémétrie, ensemble de préparation des charges utiles, etc.), un centre de contrôle de mission et un ou plusieurs ensembles de lancement (pas de tir, etc.). Ce segment exclut l'ensemble des équipements appartenant aux utilisateurs, lesquels sont pris en compte dans le segment utilisateur.



Le segment utilisateur comprend les infrastructures et équipements nécessaires aux utilisateurs pour exploiter les données spatiales. Le segment inclut les terminaux qui reçoivent les signaux des satellites, ainsi que les centres de données où ces informations sont traitées, stockées et analysées par les utilisateurs. Il englobe également les données et la consommation d'énergie des centres de données associés pour des applications en aval, telles que les activités de prévision météorologique, de navigation, d'observation de la Terre, et d'Internet des Objets (IoT) qui valorisent ces données pour diverses utilisations terrestres.



Les activités concernées dans la feuille de route de décarbonation du spatial français englobent à la fois les activités civiles et militaires.

Le périmètre opérationnel inclut tous les objets fabriqués ou exploités par un acteur français de la filière spatiale, qu'ils soient situés sur le territoire national ou à l'étranger, afin de prendre en compte l'intégralité de l'empreinte de la filière.

La période de référence retenue pour l'empreinte carbone de la filière est l'année 2023, à l'exception des lanceurs et des satellites, dont les activités sont moyennées sur la période 2018-2023 afin de lisser la variabilité de l'activité du secteur.

Périmètre des données disponibles : Le calcul n'inclut pas encore certains effets potentiellement importants sur la haute atmosphère (suies, alumine, vapeur d'eau lors des lancements et rentrées), faute de données scientifiques suffisantes. La feuille de route prévoit des travaux de recherches afin de les compléter.

Pour chaque type d'objet, une description des données initiales ainsi que de leurs limites a été réalisée :

- **Segment lanceur** : L'analyse inclut et moyenne toutes les émissions CO₂e liées au segment lanceur entre 2018 et 2023. Cependant, à l'instar des lanceurs, il ne prend pas en compte la fin de vie des satellites ni leur éventuelle rentrée atmosphérique, en raison du manque de données disponibles et des incertitudes importantes liées aux effets haute atmosphère. Cependant, les effets haute atmosphère, notamment ceux générés par la production de suie et d'alumine lors des lancements, ainsi que les conséquences de la rentrée atmosphérique, n'ont pas été prises en compte en raison du manque d'informations académiques sur le sujet.
- **Segment spatial** : Toutes les émissions CO₂e liées au segment spatial entre 2018 et 2023 ont également été prises en compte et moyennées. Leurs émissions ont été évaluées au moyen d'ACV de référence pour chacune des catégories de satellite (télécommunication, science, observation terrestre, etc.). Comme pour les lanceurs, les effets haute atmosphère, liés à la réentrée des satellites en fin de vie, n'ont pas été intégrés par manque de données disponibles.
- **Segment sol** : Les ACV de référence ont été appliquées aux antennes et aux centres de contrôle, sans différenciation de taille. Les émissions liées à la recherche et développement (R&D) ont été comptabilisées à l'aide de facteurs monétaires, une méthode qui reste imprécise. Les données sur le CSG/CST ont été fournies par le CNES et se basent sur les ACV disponibles.
- **Segment utilisateur** : L'évaluation des consommations énergétiques des terminaux utilisateurs, notamment pour les télécommunications LEO et GEO, ainsi que du volume de données stockées pour l'observation terrestre, a nécessité de nombreuses hypothèses très dimensionnantes, en raison des incertitudes inhérentes à ces données.

Ce périmètre global permet de tracer une image plus précise de l'empreinte carbone du secteur, tout en mettant en lumière certains axes d'amélioration liés à la disponibilité des données et à la prise en compte des effets haute atmosphère. Il est donc impératif de développer et de maintenir des sources de données fiables afin de garantir la transparence, la vérifiabilité des informations et la crédibilité des conclusions et des actions qui en découlent.

La feuille de route proposée repose ainsi sur un premier lot de données disponibles. Cela signifie qu'elle nécessite des améliorations et comporte des limites. Cependant, cette première classification des données fournit des éléments essentiels pour prioriser les actions. Bien que perfectible, cette étude initiale doit servir de base et de plan directeur pour les années à venir, orientant les efforts futurs avec une approche structurée et progressive, réalisée avec la plus grande robustesse et transparence possible.

Juin 2025



Ce document est édité avec le concours du CNES.

