



— LIVRE BLANC

**Entre Ciel et Espace :
Les grands enjeux
de l'Aéronautique
et du Spatial**

— SOMMAIRE —



p3 Les thématiques communes du secteur spatial et aéronautique

- a. Transition vers un modèle durable
- b. Vulnérabilités face aux changements environnementaux et géopolitiques
- c. Répondre à la demande du marché et rester compétitif
- d. Sécurité et conformité réglementaire
- e. Respect des normes environnementales et pollutions engendrées
- f. Développement des talents et attractivité des secteurs
- g. Formation et recrutement
- h. Évolution des métiers

p19 Le secteur spatial

- a. Accélération des efforts de transformation et défis de la croissance démographique
- b. Risque Liés aux mégaconstellations
- c. La recherche de financement et les défis technologiques
- d. Conquêtes spatiales
- e. Enjeux géopolitiques et militarisation de l'espace

p42 Le secteur aéronautique

- a. L'enjeu crucial de l'augmentation des cadence de production face à une demande en plein essor
- b. Transition écologique et décarbonation
- c. La digitalisation
- d. Maintenir le cap face aux enjeux mondiaux

p54 Les aides et subventions

p57 Le focus de la Pologne et du partenariat ESA

p63 Sources

LES THÉMATIQUES COMMUNES DU SECTEUR SPATIAL ET AÉRONAUTIQUE



Les secteurs du spatial et de l'aéronautique sont à un tournant décisif de leur histoire. Face aux urgences climatiques, aux évolutions technologiques rapides et aux bouleversements géopolitiques, ils partagent des problématiques similaires qui nécessitent une approche intégrée pour assurer un avenir durable et compétitif.

TRANSITION VERS UN MODÈLE DURABLE

Les contraintes réglementaires de décarbonation et les urgences environnementales, illustrées par le franchissement de six limites planétaires sur neuf, obligent le secteur spatial et l'aéronautique à repenser leurs modèles pour réduire leur impact sur la planète [1].

— Réduction de l'empreinte carbone

La réduction des émissions de carbone constitue une priorité stratégique pour les deux secteurs, qui visent une neutralité carbone d'ici 2050. Cette ambition repose sur l'émergence de technologies innovantes, notamment l'aviation électrique, les avions à hydrogène et l'utilisation de carburants durables [2]. Toutefois, cette transition doit s'opérer sans compromettre la sécurité ni l'efficacité des appareils, tout en prévoyant les investissements nécessaires pour soutenir l'innovation au cours des 10 à 15 prochaines années [2].

La grande diversité des activités dans ces secteurs rend par ailleurs la quantification précise et exhaustive de leurs impacts environnementaux particulièrement complexe. Les approches actuelles, telles que l'Analyse de cycle de vie (ACV), exigent en effet d'importantes ressources et sont difficiles à appliquer de manière intégrale dans ce contexte. L'enjeu majeur consiste donc à élaborer des méthodes et des outils mieux adaptés, afin d'évaluer de manière fiable l'empreinte environnementale liée aux activités spatiales [3].



Objectifs du secteur spatial

Bien qu'il ne représente actuellement qu'un pourcent de l'empreinte environnementale mondiale d'origine humaine, le secteur connaît une expansion rapide. L'émergence du NewSpace, porté par de nouveaux acteurs et des projets disruptifs, bouleverse l'ordre établi et exploite pleinement le potentiel du spatial : tourisme « bas carbone », surveillance de données ou encore synchronisation des réseaux électriques terrestres [4].

Dans ce contexte, la part de responsabilité du secteur pourrait grimper jusqu'à 5 % dans les prochaines années, posant un défi majeur pour l'ensemble des parties prenantes. Il devient dès lors indispensable que tous les émetteurs de carbone, y compris la communauté scientifique qui a alerté sur cette problématique, s'impliquent activement dans la réduction globale de l'empreinte carbone [3]. Viser la neutralité carbone à l'horizon 2050 suppose en effet une baisse annuelle de 7 % des émissions de gaz à effet de serre. Un tel objectif exige des changements profonds dans les pratiques actuelles du secteur spatial scientifique : il est essentiel que cette trajectoire de réduction s'applique à toutes les activités, quelles que soient leurs retombées sociétales, afin de respecter les engagements nationaux et internationaux [3].



Objectifs du secteur aéronautique



En dépit de progrès technologiques notables, l'aviation reste l'un des modes de transport les plus polluants. En France, le transport aérien intérieur et international génère 4,4 % des émissions nationales de gaz à effet de serre (GES) [5].

Bien que ce pourcentage puisse paraître faible, il contribue fortement au réchauffement climatique, en raison de la hausse rapide du trafic liée à l'augmentation du nombre de passagers et au volume des échanges, se traduisant par une croissance record des émissions. De surcroît, l'aviation n'a rejoint que récemment les efforts de réduction des GES, à l'échelle

européenne comme mondiale [6].

Néanmoins, la communauté aéronautique travaille depuis plusieurs années, en partenariat avec différents organismes internationaux et industriels, à améliorer les performances environnementales des avions. À cet égard, le Conseil consultatif pour la recherche aéronautique en Europe (ACARE) a fixé des objectifs ambitieux à l'horizon 2050 : réduire les émissions de CO_2 de 75 %, celles de NO_x de 90 % et le bruit de 65 % par rapport aux niveaux de l'an 2000 [7]. Dans cette optique, l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) a conclu des accords mondiaux prévoyant l'introduction d'une norme de performance en matière d'efficacité énergétique lors de la certification de chaque avion [7]. En effet, si les émissions de CO_2 exacerbent l'effet de serre et le réchauffement climatique, les oxydes d'azote (NO_x) et les particules fines ont un impact néfaste sur la qualité de l'air [8].

Parallèlement, pour réduire de 55 % les émissions d'ici à 2030 et atteindre la neutralité carbone en 2050, le Parlement européen envisage plusieurs initiatives, dont l'intégration du transport maritime au système d'échange de quotas d'émission, la révision de celui déjà applicable à l'aviation et l'utilisation de carburants plus durables pour les avions [6].



Dans ce contexte, il est primordial de poursuivre la recherche et le développement afin d'accroître l'efficacité énergétique de l'aéronautique et de limiter son impact sur l'environnement. Parmi les pistes prometteuses figurent notamment l'emploi de biocarburants et le développement d'avions électriques, deux solutions susceptibles de réduire significativement les émissions de gaz à effet de serre [8].

— Gestion des ressources et des matériaux et défis de la chaîne d'approvisionnement

Dépendance aux matières premières critiques et vulnérabilités de la chaîne d'approvisionnement

Face à une concurrence mondiale croissante, les secteurs aéronautique et spatial se trouvent confrontés à de sérieuses vulnérabilités en matière de chaîne d'approvisionnement. La dépendance aux matières premières critiques, parmi lesquelles figure le titane, est particulièrement préoccupante : en 2019, 45 % de la production mondiale de ce métal était destinée à l'aéronautique [9]. Le titane intervient dans la fabrication de composants structuraux essentiels pour les avions civils et militaires (fuselage, moteurs, conduites hydrauliques), ainsi que pour les rotors principaux d'hélicoptères et, dans le domaine spatial, pour les moteurs et réservoirs de fusées comme Ariane [9].

Pour sécuriser ces chaînes stratégiques, plusieurs acteurs majeurs du secteur se mobilisent. En avril 2023, un consortium formé par Airbus, Safran et le fonds Tikehau Ace Capital a ainsi finalisé l'acquisition d'Aubert & Duval, fournisseur français de matériaux et de pièces critiques pour l'aéronautique, la défense, le nucléaire et le médical. Cette opération vise à garantir un accès stable aux matières premières essentielles, tout en permettant à Aubert & Duval d'investir dans la mise au point de nouveaux matériaux. L'entreprise sera détenue par une holding répartie à parts égales entre les trois partenaires [9].

De plus, le secteur spatial repose sur une chaîne d'approvisionnement hautement spécialisée et globalisée, le rendant particulièrement vulnérable aux interruptions de flux de matières premières critiques et de composants



De plus, le secteur spatial repose sur une chaîne d'approvisionnement hautement spécialisée et globalisée, le rendant particulièrement vulnérable aux interruptions de flux de matières premières critiques et de composants électroniques. La forte dépendance de l'Union Européenne aux importations de terres rares, de métaux stratégiques et de semi-conducteurs accentue ces risques.

Les terres rares sont essentielles aux technologies spatiales mais leur approvisionnement est concentré en Chine, qui produit 86 % de l'offre mondiale [10]. L'UE dépend ainsi entièrement de ce pays pour certains éléments clés, tandis que la demande mondiale pourrait quadrupler d'ici 2040 [11]. De plus, l'approvisionnement en titane aéronautique est menacé par les tensions géopolitiques, notamment en Russie, Ukraine et Kazakhstan, tandis que les États-Unis pourraient imposer des mesures protectionnistes. [12]

Les semi-conducteurs, indispensables aux satellites et systèmes embarqués, sont aussi une source de vulnérabilité. En 2024, TSMC (Taïwan) contrôle 62 % des revenus mondiaux du secteur et 91 % de la production est concentrée entre cinq entreprises, majoritairement asiatiques [13] :

1

TSMC

2

Samsung Electronics

3

UMC

4

Globalfoundries

5

SMIC

Les tensions géopolitiques, catastrophes naturelles et crises comme la COVID-19 ont démontré la fragilité des chaînes logistiques, exposant les entreprises européennes à des interruptions pouvant réduire leurs bénéfices annuels de jusqu'à 45 % [14].

Demande croissante et pressions sur les ressources minières



L'essor des technologies spatiale et aéronautique, combiné à la croissance de la demande en électronique, accentue la pression sur les matières premières critiques. La production de semi-conducteurs et d'équipements électroniques dépend de métaux rares dont l'approvisionnement est dominé par des pays asiatiques. L'Europe excelle dans la fabrication et l'assemblage des systèmes spatiaux, mais reste fortement dépendante des importations pour les matières premières et composants électroniques.

Les quantités nécessaires au secteur spatial et aéronautique sont faibles mais très spécifiques, impliquant des normes de qualité et de fiabilité strictes. Cela accroît la complexité d'approvisionnement, car les industriels pourraient prioriser des secteurs plus rentables, comme l'automobile ou l'électronique grand public, au détriment du spatial.

Impact des crises écologiques sur l'extraction des matières premières

Le changement climatique et les événements météorologiques extrêmes impactent l'extraction et le transport des ressources minières. Les inondations, sécheresses et catastrophes naturelles perturbent les opérations minières, réduisant la disponibilité des métaux stratégiques. Une étude de McKinsey (2020) indique que 30 à 50 % des mines mondiales sont situées dans des zones à fort stress hydrique, ce qui complique leur exploitation [15].

En Chine, principal producteur de terres rares, la montée des précipitations extrêmes et des sécheresses risque d'aggraver les tensions sur l'approvisionnement, en particulier dans la région de la Mongolie intérieure, où sont extraites ces ressources essentielles aux technologies spatiales [16].

De plus, les gisements miniers s'appauvrissent, nécessitant plus d'énergie et de produits chimiques pour extraire les métaux, amplifiant les impacts environnementaux. Si le secteur spatial est moins sensible aux coûts des matériaux en raison de son positionnement haut de gamme, il demeure dépendant de la production massive de com-

posants électroniques, notamment pour les infrastructures GNSS (Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites) et satellites, qui nécessitent des milliards de puces électroniques. [16].

Enjeux sociétaux et acceptabilité des industries extractives

L'exploitation minière suscite une opposition croissante en raison de son impact environnemental et social. Dans des pays comme le Canada, des mouvements de contestation émergent face aux risques de pollution des sols et des eaux. Contrairement aux idées reçues, ces exploitations ne concernent pas uniquement les pays en développement, mais aussi des nations industrialisées, qui subissent des pressions pour adopter des pratiques plus durables et transparentes.

VULNÉRABILITÉS FACE AUX CHANGEMENTS ENVIRONNEMENTAUX ET GÉOPOLITIQUES

— Contexte générale

Le changement climatique constitue une menace croissante pour les infrastructures spatiales et aéronautiques. Avec l'évolution rapide des conditions climatiques globales, plusieurs facteurs environnementaux tels que l'élévation du niveau de la mer, les inondations, les tempêtes, les feux de forêts et les glissements de terrain deviennent des risques majeurs pour les installations terrestres. [1] Par ailleurs, les réglementations visant à limiter l'artificialisation des sols accentuent la nécessité d'adapter ces infrastructures afin de garantir la continuité des opérations.

Ces phénomènes peuvent affecter des sites critiques tels que les bases de lancement, les stations de sol, et les centres de contrôle, compromettant ainsi la capacité des agences et opérateurs privés spatiaux à poursuivre leurs missions. Mais aussi les infrastructures aéroportuaires peuvent être endommagées, les centres de contrôles, les opérations de vol, les pistes d'atterrissage et de décollage, les terminaux, etc.

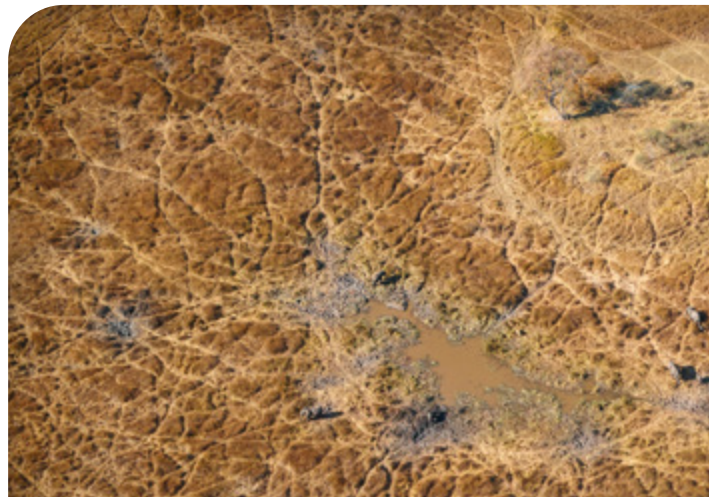
Cette menace environnementale croissante exige une évaluation approfondie des scénarios futurs et des risques associés. Les infrastructures spatiales et aéronautiques se trouvent à la croisée de défis qui nécessitent une anticipation et une adaptation. Une analyse des projections climatiques des phénomènes extrêmes est donc essentielle pour garantir leur résilience et leur viabilité à long terme.

En somme, il est crucial de renforcer les efforts d'adaptation des infrastructures face aux risques climatiques et de minimiser les impacts environnementaux des activités spatiales et aéronautiques afin d'assurer une acceptabilité sociale accrue et de contribuer efficacement à l'adaptation face au changement climatique.

— Les scénarios d'évolution des phénomènes environnementaux

Selon les scénarios du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), la projection d'élévation du niveau de la mer est estimée entre 44 et 74 cm d'ici 2100 en fonction des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Cette élévation affectera les zones côtières et les infrastructures spatiales situées en bord de mer. [1]

Dans les scénarios extrêmes le niveau d'augmentation pourrait atteindre de 2 à 10 mètres. Ce scénario demeure hypothétique, mais pourrait se concrétiser si le réchauffement climatique s'accélère de manière plus importante que prévu, dépassant à la fois les objectifs fixés par les accords de Paris et les estimations actuelles des projections climatiques.





– **Figure 1 :** Élévation moyenne du niveau de la mer depuis 1993, en centimètres par rapport au zéro de référence. [17]

Les deux principaux facteurs d'augmentation sont :



Fonte des calottes polaires

La contribution de la fonte des glaces du Groenland a été multipliée par trois en 20 ans, devenant le principal facteur de l'élévation du niveau de la mer.

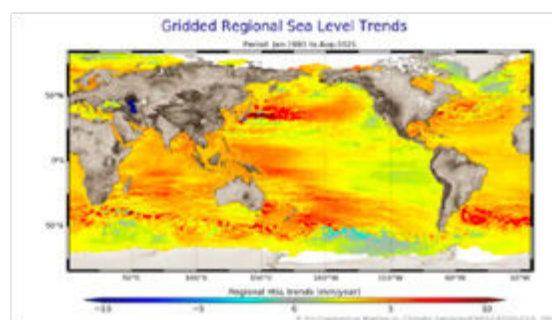


Dilatation thermique des océans

Le gonflement dû à la dilatation de l'eau des océans est le deuxième facteur majeur de l'élévation du niveau de la mer.

La fréquence des événements météorologiques extrêmes sera en augmentation. Les scénarios prévoient une intensification et une fréquence accrue des événements météorologiques extrêmes, augmentant les risques pour les infrastructures côtières.

D'après le GIEC, la poursuite des émissions de gaz à effet de serre intensifiera le réchauffement climatique. Il est quasiment certain que, dans les cinquante années à venir, les vagues de chaleur extrêmes deviendront plus fréquentes sur la majorité des zones terrestres. À titre d'exemple, dans un climat préindustriel, une vague de chaleur se produisait en moyenne une fois par décennie. Aujourd'hui, avec un réchauffement global de 1,2 °C, ce type d'événement se produit environ 2,8 fois sur la même période. Si le réchauffement global atteignait 2 °C, la fréquence des vagues de chaleur serait multipliée par 5,6 accompagnée d'une élévation de température moyenne de 2,6 °C. [1]



– **Figure 2 :** Tendence de l'augmentation annuelle des niveaux des mers et océans.



En conséquence des vagues de chaleur, des régions seront exposées à un risque croissant de sécheresse. Le GIEC y indique qu'une sécheresse qui, auparavant, survenait une fois tous les dix ans se produit désormais 1,7 fois par décennie. En cas de réchauffement global de 2 °C, cette fréquence augmenterait à 2,4 fois par décennie. [1]

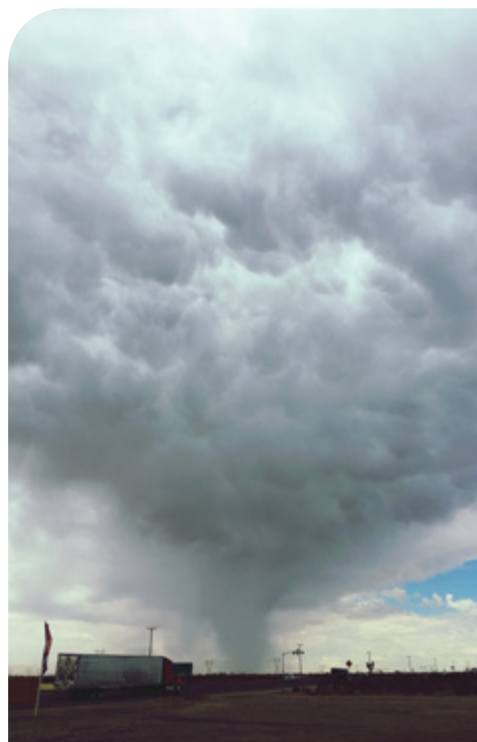
L'analyse des scénarios environnementaux met en lumière les défis croissants auxquels les infrastructures spatiales doivent faire face. Il est maintenant essentiel de décrire certains phénomènes extrêmes qui affectent ces infrastructures, afin de mieux comprendre leur dynamique et leur intensification dans un contexte de changement global.

La fréquence des événements météorologiques extrêmes sera en augmentation. Les scénarios prévoient une intensification et une fréquence accrue des événements météorologiques extrêmes, augmentant les risques pour les infrastructures côtières.

D'après le GIEC, la poursuite des émissions de gaz à effet de serre intensifiera le réchauffement climatique. Il est quasiment certain que, dans les cinquante années à venir, les vagues de chaleur extrêmes deviendront plus fréquentes sur la majorité des zones terrestres. À titre d'exemple, dans un climat préindustriel, une vague de chaleur se produisait en moyenne une fois par décennie. Aujourd'hui, avec un réchauffement global de 1,2 °C, ce type d'évènement se produit environ 2,8 fois sur la même période. Si le réchauffement global atteignait 2 °C, la fréquence des vagues de chaleur serait multipliée par 5,6 accompagnée d'une élévation de température moyenne de 2,6 °C. [1]

En conséquence des vagues de chaleur, des régions seront exposées à un risque croissant de sécheresse. Le GIEC y indique qu'une sécheresse qui, auparavant, survenait une fois tous les dix ans se produit désormais 1,7 fois par décennie. En cas de réchauffement global de 2 °C, cette fréquence augmenterait à 2,4 fois par décennie. [1]

L'analyse des scénarios environnementaux met en lumière les défis croissants auxquels les infrastructures spatiales doivent faire face. Il est maintenant essentiel de décrire certains phénomènes extrêmes qui affectent ces infrastructures, afin de mieux comprendre leur dynamique et leur intensification dans un contexte de changement global.



— Les défis associés au changement climatique sur les infrastructures spatiales et aéronautiques

Le changement climatique entraîne une augmentation de la fréquence et de l'intensité des catastrophes naturelles, affectant directement les secteurs spatial et aéronautique. Ces événements climatiques perturbent les infrastructures, les opérations et la sécurité des équipements, nécessitant des adaptations majeures pour préserver la continuité des activités.

Submersion marine et inondations

L'élévation du niveau des mers et des océans représente une menace majeure pour les infrastructures situées en zone côtière. Les stations sol, terminaux, bases de lancement et centres de contrôle, souvent implantés à proximité du littoral pour des raisons logistiques et techniques, sont particulièrement vulnérables. Une montée des eaux peut provoquer des dommages structurels, compliquer l'accès aux installations stratégiques et entraîner une hausse significative des coûts de maintenance.



Les inondations, accentuées par des précipitations extrêmes, mettent en péril ces infrastructures en les exposant à des submersions temporaires qui peuvent rendre les pistes, sites de lancement ou zones d'opérations inexploitable. La saturation des sols et les coulées de boue risquent d'endommager les systèmes critiques, perturbant ainsi les activités et compromettant la sécurité des opérations. Ces aléas climatiques croissants nécessitent une adaptation rapide des infrastructures pour garantir leur résilience face aux défis environnementaux à venir. [18]

Dans le domaine aéronautique, les risques liés à l'élévation du niveau de la mer sont particulièrement préoccupants. Selon une étude menée par Richard Dawson et Aaron Yesudian de la Newcastle University's School of Engineering, près de 270 aéroports dans le monde sont en danger d'inondations côtières, tandis que 572 pourraient disparaître d'ici 2100 si la température mondiale dépasse les 2 degrés Celsius. Parmi les plus vulnérables, on retrouve l'aéroport de Bangkok-Suvarnabhumi en Thaïlande, l'aéroport international de Wenzhou-Longwan en Chine, ainsi que l'aérodrome de Corvo au Portugal et l'aéroport de Brême en Allemagne. Les États-Unis comptent également plusieurs aéroports exposés, dont ceux de La Nouvelle-Orléans, Key West et New York (La Guardia et Newark-Liberty). [19]

Les bases de lancement spatiales ne sont pas épargnées par ces menaces. En 2024, les trois sites de lancement principaux sur le continent américain sont situés sur les côtes avec des altitudes variées : Kourou (7-8 mètres), Cape Canaveral (6-7 mètres) et Vandenberg (57 mètres). Ailleurs, des bases comme Tanegashima (12 mètres) au Japon, Jeju et Naro en Corée du Sud, ou encore Andoya en Norvège, sont également exposées au risque de submersion. En 2023, 223 lancements ont été réalisés, dont 30 % à partir des cinq sites les plus menacés par une submersion d'ici 2100. L'impact global de la montée des eaux sur les lancements spatiaux reste modéré, mais les capacités américaines et européennes seraient fortement réduites, de 55 % et 100 % respectivement, en cas de perte du Centre Spatial Guyanais. [20]



– Figure 3 : Cartographie des sites de lancement dans le monde

Tempêtes, ouragans et vents violents



Les vents violents peuvent endommager les structures essentielles, notamment les installations de lancement, les antennes de communication et les systèmes électriques. La foudre constitue un danger critique pour les équipements sensibles, pouvant entraîner des annulations d'opérations et des pertes économiques significatives.

Les conditions météorologiques extrêmes perturbent également les phases critiques des opérations, augmentant les risques lors des manœuvres essentielles. Les orages et la foudre peuvent provoquer des dysfonctionnements des sys-

tèmes de navigation et accroître la fréquence des turbulences, compromettant ainsi la sécurité et l'efficacité des missions. En période d'ouragans, la fermeture temporaire de sites stratégiques affecte la connectivité et génère des pertes financières importantes, soulignant la nécessité de renforcer la résilience des infrastructures face aux événements climatiques extrêmes. [21][22]

Sécheresses et incendies de forêt

Les températures élevées et les périodes prolongées de sécheresse accentuent le risque d'incendies de forêt, menaçant directement les infrastructures. À proximité des sites stratégiques, les feux de forêt peuvent endommager les installations essentielles, contraindre à l'évacuation du personnel et entraîner des reports d'opérations. La nécessité de mobiliser des ressources pour lutter contre ces incendies perturbe également la planification des activités, générant des retards et des pertes économiques.

En plus des dommages physiques, les incendies ont un impact significatif sur la visibilité en raison des fumées et particules en suspension, rendant les opérations plus risquées. La fermeture temporaire de sites situés à proximité des zones sinistrées entraîne des perturbations majeures, affectant la continuité des activités. Par ailleurs, les températures extrêmes influent sur la performance des équipements et limitent les capacités opérationnelles, réduisant l'efficacité et augmentant la consommation de ressources. Face à ces défis, l'adaptation des infrastructures et le renforcement des mesures de prévention deviennent indispensables pour assurer la résilience des installations face aux risques climatiques croissants. [23][24]

Mouvements de terrain et érosion

Les routes d'accès aux sites stratégiques peuvent être coupées, perturbant la logistique et compliquant le transport du personnel et des équipements. La stabilité des installations critiques, telles que les antennes, hangars et bâtiments techniques, peut être compromise, nécessitant d'importants travaux de consolidation pour prévenir des dommages structurels.

L'érosion progressive des sols affecte également les surfaces opérationnelles, fragilisant les infrastructures et augmentant les risques liés aux manœuvres au sol. Dans certaines régions, en particulier les zones montagneuses et côtières, la détérioration des surfaces essentielles peut engendrer des fermetures temporaires ou nécessiter des opérations de maintenance fréquentes. Ces contraintes entraînent des coûts supplémentaires et perturbent la continuité des activités, soulignant l'urgence de renforcer la résilience des infrastructures face aux risques géologiques croissants. [25]

Variations extrêmes de température et conditions climatiques instables

La hausse des températures a un impact direct sur la durabilité et la performance des infrastructures et équipements. L'usure prématurée des matériaux, due à des cycles thermiques plus intenses, nécessite des opérations de maintenance plus fréquentes et onéreuses. L'exposition prolongée à des températures extrêmes entraîne la dilatation des structures, pouvant affecter la précision des lancements et la fiabilité des satellites en orbite.

Les températures élevées influencent également les performances opérationnelles. La réduction de la densité de l'air diminue l'efficacité aérodynamique, nécessitant des distances de décollage plus longues et obligeant à limiter la charge embarquée. Ces conditions contraignent à des ajustements logistiques, notamment la modification des horaires d'activité pour éviter les périodes de chaleur excessive. [25]



Perturbations de l'approvisionnement en énergie

Les événements climatiques extrêmes, comme les tempêtes et les canicules, mettent sous pression les réseaux énergétiques, affectant directement le bon fonctionnement des infrastructures spatiales et aéronautiques. En Guyane, où le Centre Spatial Guyanais dépend de la biomasse et du réseau électrique local, une panne prolongée pourrait compromettre les lancements et les activités scientifiques. Bien que des circuits de secours existent, la résilience du système doit être renforcée pour faire face aux risques climatiques croissants. [21]

Dans l'aviation, les coupures d'électricité peuvent perturber les systèmes de contrôle aérien, retardant les vols et augmentant les risques opérationnels. Les installations aéroportuaires nécessitent une alimentation continue pour gérer le trafic et assurer la sécurité des passagers.

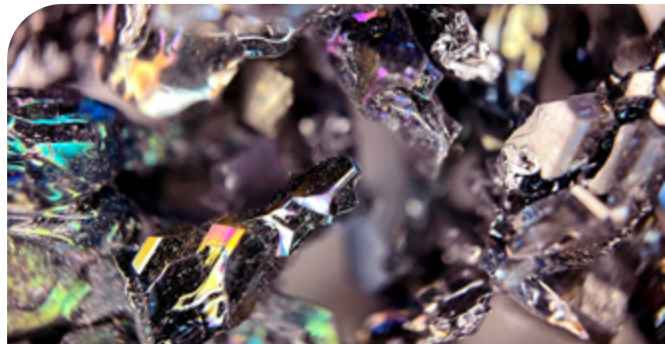


Le changement climatique représente une menace croissante pour les secteurs spatial et aéronautique, en augmentant la fréquence et la gravité des catastrophes naturelles. Ces phénomènes affectent les infrastructures, les opérations et la sécurité, nécessitant des investissements dans l'adaptation et la résilience. Face à ces défis, il est essentiel d'intégrer des stratégies de gestion des risques et de moderniser les équipements pour garantir la continuité des activités et minimiser les impacts économiques et environnementaux.

— Les défis que soulève la guerre en Ukraine

Pression sur l'approvisionnement en titane

La Russie, par l'intermédiaire de l'entreprise VSMPO-Avisma, occupe la deuxième position mondiale en tant que producteur de titane. L'invasion de l'Ukraine par la Russie, combinée aux sanctions économiques imposées, a considérablement perturbé les approvisionnements en titane. Une des premières conséquences de ces tensions a été une augmentation spectaculaire des prix du titane, lesquels ont grimpé de 32 % entre fin janvier 2022 et fin mars 2022 [9]. Cette hausse des coûts fragilise la chaîne d'approvisionnement, indispensable à de nombreux programmes aéronautiques et spatiaux [9].



Après l'augmentation initiale de 32 % des prix du titane entre fin janvier et fin mars 2022, les prix ont atteint un sommet historique de 152,43 CNY/kg en mai 2022. Par la suite, ils ont diminué pour se stabiliser autour de 45,50 CNY/kg en février 2025. Cette baisse représente une diminution d'environ 70 % par rapport au pic de mai 2022. Malgré cette baisse, les prix actuels restent supérieurs à ceux observés avant l'invasion de l'Ukraine. Cette situation continue de fragiliser la chaîne d'approvisionnement, essentielle à de nombreux programmes aéronautiques et spatiaux. [26]

De fait, depuis le début du conflit en Ukraine, réduire la dépendance au titane russe est devenu un enjeu majeur pour l'industrie aéronautique. En moyenne, 40 % du titane utilisé dans le secteur provient de Russie, mais cette proportion grimpe à 50 % pour Airbus et Safran, et peut atteindre 80 % chez certains sous-traitants. [27]

Des acteurs majeurs tels qu'Airbus, Safran et Thales reconnaissent l'importance significative de la Russie dans leur approvisionnement en titane. Afin de mitiger les risques liés aux perturbations, ces entreprises ont constitué des stocks suffisants. Toutefois, un blocage prolongé de la filière russe pourrait sérieusement compromettre la continuité de leur production [28].

En outre, la flambée des prix du titane affecte la rentabilité des programmes aéronautiques et spatiaux. Cette augmentation des coûts est susceptible de se répercuter sur les compagnies aériennes, déjà confrontées à d'autres défis économiques tels que la hausse des prix du carburant et la baisse du trafic liée à la crise sanitaire [29]. Ainsi, la volatilité des prix du titane impose des contraintes financières accrues au secteur aéronautique et spatial, nécessitant des stratégies d'adaptation et de diversification des sources d'approvisionnement.

Dépendance technologique et risques de pénuries

Au-delà du titane, la dépendance à l'égard de la production russe ou ukrainienne de moteurs et de composants se révèle critique [29] :

- 1 Vega**
Son étage supérieur AVUM repose sur un moteur RD-868P fabriqué par la société ukrainienne KB Yuzhnohe. Si les installations de production étaient compromises, l'Europe ferait face à une pénurie de pièces essentielles.
- 2 Antares**
Le lanceur américain de Northrop Grumman inclut un premier étage d'origine ukrainienne propulsé par des moteurs RD-181 russes. L'entreprise dispose d'un stock limité permettant l'assemblage de deux fusées, mais un blocage prolongé mettrait en péril l'exécution des missions suivantes.
- 3 Atlas V**
Propulsé par un moteur RD-180 russe, il dépend néanmoins d'un stock suffisant déjà livré, ce qui atténue temporairement le risque. Le remplacement à terme par la fusée Vulcan, déjà prévu, vise à réduire cette vulnérabilité.

4

Les structures et fuselages d'avions militaires, où le titane représente 30 à 40 % des matériaux utilisés. [27]

5

Les moteurs, où il constitue environ 30 % des composants critiques, notamment les **aubes de turbine**, **les compresseurs et les conduites hydrauliques**. [27] Par exemple, l'Ukraine, via Motor Sich, est un acteur clé dans la production de turbines pour hélicoptères et avions. Une perturbation prolongée de cette industrie pourrait compliquer la maintenance des appareils en service. [30]

Ces vulnérabilités soulignent l'importance pour le secteur aéronautique et spatial de diversifier leurs sources d'approvisionnement et d'accélérer le développement de solutions alternatives pour garantir la résilience des chaînes de production.

Nécessité d'une autonomie stratégique

La guerre en Ukraine met en lumière l'importance, pour les puissances spatiales et aéronautiques, de disposer de filières nationales ou régionales capables de fournir les composants critiques. La dépendance à l'égard de fournisseurs impliqués dans un conflit géopolitique rend l'ensemble des secteurs vulnérables aux variations de prix, aux retards, voire à la suspension totale des coopérations.



Les événements récents montrent combien l'accès autonome à l'espace constitue un enjeu stratégique majeur et un facteur déterminant pour la continuité des programmes de recherche, d'exploration et d'exploitation spatiale. [29]

Le conflit démontre à quel point l'accès indépendant à l'orbite terrestre et aux ressources dont le titane constitue un enjeu majeur. Les incertitudes autour des coopérations internationales renforcent l'urgence de développer et de consolider des capacités industrielles sur le sol européen et chez les partenaires fiables. [28]

Sans autonomie stratégique, la recherche, l'exploration et l'exploitation de l'espace se trouvent constamment exposées aux variations de prix, aux sanctions et aux ruptures d'approvisionnement. Pour l'Europe, tout comme pour d'autres puissances spatiales, la mise en place de solutions souveraines ou diversifiées apparaît désormais incontournable. [28]

En définitive, la guerre en Ukraine exerce une pression considérable sur la filière aéronautique et spatiale : perturbations commerciales, volatilité des prix des métaux stratégiques, incertitudes concernant la coopération autour de l'ISS et risques accrus de pénuries de moteurs et composants critiques. Dans un secteur marqué par de longs cycles de développement et de production, ces tensions accentuent encore la nécessité d'une autonomie stratégique et d'une diversification des sources d'approvisionnement.

RÉPONDRE À LA DEMANDE DU MARCHÉ ET RESTER COMPÉTITIF

— Adaptation des industries aéronautique et spatiale à une demande en forte croissance

Le changement climatique constitue une menace croissante pour les infrastructures spatiales et aéronautiques. Le secteur aéronautique et spatial fait face à une demande croissante, à la fois en ce qui concerne les capacités de transport aérien et les services spatiaux. L'augmentation soutenue du trafic aérien, stimulée par la hausse des échanges internationaux et le développement des pays émergents, se traduit par une envolée des carnets de commandes [31]. Les constructeurs d'avions sont donc contraints d'augmenter significativement leurs cadences de production, avec pour objectif de réduire le temps de production des appareils de 8 à 4 ans [31].

Sur le plan spatial, la réponse à la compétitivité s'organise en deux temps. Dans un premier temps, Ariane 6 se positionne comme une solution « coup de poing » grâce à des technologies largement maîtrisées, permettant de regagner rapidement des parts de marché. Dans un second temps, l'Europe envisage de développer un lanceur réutilisable, nécessitant un investissement en R&D plus important et un calendrier plus long. Ariane 6, héritière de nombreux éléments d'Ariane 5, intègre tout de même plusieurs évolutions :



Boosters à propergols solides remplacés par des corps en composite carbone



Étage supérieur versatile, capable de multiples rallumages pour diverses missions [32].

Cette stratégie vise à lutter contre la concurrence de nouveaux acteurs privés, dont SpaceX, qui s'est imposé grâce au pari réussi des lanceurs réutilisables. Autrefois cantonnées à des partenariats étroits avec les agences spatiales étatiques, ces sociétés privées se montrent désormais plus autonomes, développant leurs propres services et canaux de financement. Néanmoins, les États conservent un rôle clé grâce à leur capacité d'orientation stratégique et de soutien financier à la R&D, soulignant la nécessité de préserver et de développer des partenariats public-privé solides [32].

Quant au marché aéronautique, Airbus devrait pouvoir profiter du résultat décevant de son concurrent Boeing. Ce dernier a annoncé une perte de 11.35 milliards d'euros sur son exercice de 2024, la plus importante depuis la période du COVID-19. Cette perte est en partie due aux difficultés dans ses divisions commerciales et de défense, ainsi qu'à une grève dans ses usines de la côte ouest américaine. [33]

Boeing met en place un plan de redressement structuré pour stabiliser son activité et répondre efficacement à la demande croissante du marché aéronautique.

L'entreprise s'engage sur plusieurs années dans une transformation profonde de sa culture d'entreprise, visant à renforcer la sécurité, la qualité et la transparence. Cette évolution est essentielle pour regagner la confiance des clients et des partenaires. [33]

Pour assurer une meilleure capacité de production, Boeing a également optimisé sa chaîne d'approvisionnement et retrouvé un rythme stable de production de ses avions, notamment avec cinq 787 produits par mois en 2024. Cette régularité permet de réduire les retards et d'honorer les commandes en attente, un élément clé pour rester compétitif face à Airbus. [33]

Par ailleurs, l'entreprise poursuit ses investissements stratégiques tout en rationalisant son portefeuille, afin de se concentrer sur les programmes les plus rentables et innovants. Cette stratégie lui permet de maximiser son efficacité opérationnelle et d'aligner son offre sur les besoins des compagnies aériennes. [33]

En renforçant son efficacité industrielle et en stabilisant ses livraisons, Boeing vise à regagner des parts de marché et à rester un acteur majeur face à la montée en puissance de son concurrent européen. [33]



— Deux secteurs vulnérables aux fluctuations des investissements privés et publics

Toutefois, cette dynamique de croissance et de renforcement industriel se heurte à plusieurs risques financiers qui pèsent sur le développement et la compétitivité du secteur, qu'il s'agisse de l'aéronautique ou du spatial.

Les activités de R&D des deux secteurs, ainsi que certains systèmes satellitaires stratégiques (observation de la Terre, télécommunications, programmes scientifiques), reposent largement sur des budgets publics.

En France, l'État a prévu d'investir 9 milliards d'euros dans sa politique spatiale entre 2022 et 2025 [34], mais ce soutien reste fragile : le Programme 193 « Recherche Spatiale » a déjà subi des annulations, et le contexte finan-

cier global (objectif de 10 milliards d'euros d'économie pour le budget 2025, déficit public de 156,9 milliards d'euros au 31 juillet 2024) pourrait entraîner de nouvelles coupes.

Or, toute baisse de budget affecterait directement la capacité à maintenir ou développer des projets de lanceurs, de satellites ou de nouvelles infrastructures. [35]

La hausse des taux d'intérêt depuis 2022 rend l'accès au capital privé plus coûteux. Pour les entreprises spatiales et aéronautiques, souvent confrontées à de longs cycles de développement et des retours sur investissement incertains, cette situation peut dissuader les investisseurs, en particulier le capital-risque, traditionnellement plus enclin à privilégier des secteurs à cycle court et risques technologiques moindres.



SÉCURITÉ ET CONFORMITÉ RÉGLEMENTAIRE

La sécurité opérationnelle et la conformité aux réglementations constituent des enjeux essentiels pour préserver la confiance du public et des parties prenantes. Avec l'accélération de la digitalisation et l'adoption croissante des technologies spatiales, les secteurs concernés sont de plus en plus exposés à des risques cybernétiques. Il est impératif pour les organisations de sécuriser leurs systèmes et leurs données afin de prévenir les attaques susceptibles de compromettre les opérations [34].

La protection des infrastructures spatiales et terrestres est cruciale pour garantir un déploiement fluide et sécurisé des activités. En outre, la cybersécurité revêt une importance capitale non seulement pour les professionnels, qui doivent assurer la continuité et la sécurité de leurs opérations, mais également pour les particuliers. Ces derniers exigent des outils fiables leur permettant d'accéder aux informations et aux contenus tout en préservant leur vie privée [34].

Ainsi, face à la numérisation croissante et à l'utilisation intensive des technologies spatiales, il est indispensable de développer des stratégies robustes de cybersécurité. Cela permet non seulement de protéger les infrastructures critiques, mais aussi de maintenir la confiance et la sécurité tant au niveau organisationnel qu'individuel.

R RESPECT DES NORMES ENVIRONNEMENTALES ET POLLUTIONS ENGENDRÉES

Les activités spatiales et aéronautiques ont un impact notable sur l'environnement, notamment à travers la gestion des débris spatiaux et la pollution atmosphérique résultant des lancements massifs. Ces impacts peuvent réduire l'acceptabilité sociale de ces secteurs [1][36]. Par exemple, les mégaconstellations de satellites envisagées par des acteurs majeurs posent des défis environnementaux significatifs, notamment des répercussions potentielles sur la couche d'ozone [36].

Les réglementations internationales visant à réduire l'impact environnemental obligent les secteurs à adopter des pratiques plus durables [1][34]. Par exemple, la gestion des débris spatiaux et la réduction des émissions polluantes sont des aspects réglementés qui nécessitent des solutions innovantes.



La première forme de pollution spatiale est causée par les débris spatiaux. Il s'agit d'objets fabriqués par l'Homme pour être lancés en orbite. N'étant jamais récupérés, ils se désintègrent dans l'espace, devenant ainsi des débris dont la taille varie de quelques millimètres à plusieurs mètres. [37]

Une autre forme de pollution spatiale est engendrée lors des lancements spatiaux. L'espace est jonché de débris et est marqué par le passage des humains. Or, la Terre n'est pas épargnée par la conquête spatiale. [37]

En effet, le domaine spatial génère une forte quantité de CO₂ de diverses manières : [37]



Le carburant polluant utilisé par les lanceurs (les ergols)



L'extraction des matériaux permettant la construction des engins spatiaux et des infrastructures de contrôle. Ce procédé engendre une forte pression sur les ressources naturelles et la biodiversité, le tout sans prendre en considération les limites planétaires.



Les débris mal consommés qui retombent de l'orbite lors du lancement et pouvant contenir des matériaux toxiques ou radioactifs. Comme par exemple lors de la désintégration du satellite Kosmos 954, dont ses débris s'étaient dispersés au-dessus du grand nord canadien ;

Dans le domaine de l'aviation, il y a de nombreuses pollutions engendrées par le secteur outre les émissions de CO₂, d'autres effets climatiques, désignés sous le terme « effets non-CO₂ », jouent un rôle important. Ces effets découlent d'interactions complexes entre les émissions des avions et l'atmosphère, principalement liées à la formation de traînées de condensation [38]. Bien que l'évaluation de l'impact climatique de ces effets non-CO₂ comporte encore de nombreuses incertitudes, les recherches récentes indiquent qu'ils contribuent de manière significative au réchauffement climatique, en particulier à court terme, avec une intensité comparable à celle du CO₂ [38].

DÉVELOPPEMENT DES TALENTS ET ATTRACTIVITÉ DES SECTEURS

Face à la transition écologique, à la transformation numérique et à la hausse des cadences de production, les secteurs aéronautique et spatial doivent miser avant tout sur leur capital humain.

Ces domaines de pointe, qui suscitent à la fois fascination et exigence, se trouvent aujourd'hui confrontés à d'importants défis de recrutement et de formation, notamment pour les compétences liées aux nouvelles technologies et au développement durable [1][2].

Malgré leur image souvent prestigieuse, ils peinent parfois à attirer des profils diversifiés et qualifiés, en particulier en raison des craintes et des méconnaissances entourant les métiers de l'aérospatial [39].

Dans ce contexte, les stratégies de formation et d'évolution professionnelle prennent une importance croissante, tant pour renforcer l'attractivité de ces secteurs que pour accompagner les changements de fond qui redessinent les métiers et les exigences du marché.



— Maintenir une perception positive de l'aviation et des vols spatiaux

L'essor des secteurs spatial et aéronautique, marqué par une augmentation des lancements, l'accélération de l'innovation et une médiatisation accrue, suscite un regain d'intérêt pour les carrières liées à ces industries de pointe. Cette visibilité renouvelée met en lumière les avancées technologiques et les opportunités d'innovation, renforçant l'attractivité de ces domaines auprès des nouvelles générations. Cependant, cette nouvelle mise en avant s'accompagne d'une prise de conscience croissante des impacts environnementaux potentiels. Si la pression reste encore modérée, des voix s'élèvent de plus en plus contre certaines pratiques, ce qui pourrait influencer l'image de ces secteurs. L'aviation, en particulier, est confrontée à des attentes fortes en matière de réduction des émissions carbone, avec une exigence croissante d'éco-conception et de technologies plus durables.



L'histoire du spatial et de l'aéronautique a toujours été portée par des récits fascinants, oscillant entre exploration héroïque, progrès technologique et enjeux géopolitiques. La rivalité entre puissances durant la guerre froide a contribué à façonner une culture spatiale et aéronautique profondément ancrée dans l'imaginaire collectif. Aujourd'hui, l'essor du « New Space » dominé par des acteurs privés tels que SpaceX et Blue Origin, ainsi que l'ambition d'une aviation plus durable avec des projets comme l'avion à hydrogène ou l'électrification des transports aériens, ouvrent une nouvelle ère. Toutefois, ces évolutions suscitent des débats : l'espace est perçu à la fois comme un vecteur de progrès et comme un symbole des inégalités croissantes, tandis que l'aviation doit répondre aux critiques sur son empreinte carbone et son rôle dans la mobilité mondiale.

Dans ce contexte, l'attractivité des secteurs aéronautique et spatial repose sur plusieurs leviers essentiels. D'une part, le développement des talents doit s'appuyer sur une formation adaptée aux nouveaux défis technologiques, notamment dans les domaines de la propulsion, de l'intelligence artificielle et des matériaux innovants. L'aviation, notamment, explore des solutions comme les carburants durables, la réduction du bruit et l'amélioration de l'efficacité énergétique. D'autre part, l'industrie doit renforcer son image en mettant en avant son rôle dans la transition écologique et l'amélioration des conditions de vie sur Terre, que ce soit par la surveillance climatique depuis l'espace ou l'optimisation des transports aériens pour une mobilité plus responsable.

Enfin, l'Europe doit affirmer une vision forte pour rester un acteur majeur dans la conquête spatiale et l'aviation du futur. La capacité à mobiliser les talents et à créer un récit inspirant autour du spatial et de l'aéronautique sera déterminante pour attirer les compétences nécessaires à la poursuite de ces ambitions stratégiques.

FORMATION ET RECRUTEMENT

Les secteurs font face à des difficultés de recrutement, en particulier pour les compétences liées aux nouvelles technologies et au développement durable [1][2]. Investir dans la formation et attirer de nouveaux talents sont donc des priorités.

Parmi les Français qui ne se déclarent pas attirés par des études dans l'aéronautique ou le spatial, le besoin d'une formation adaptée aux métiers spécialisés du domaine ressort comme l'un des freins principaux (14% des Français). Dans ce contexte de forte demande exprimée sur les besoins de formation et d'accompagnement, le secteur est prêt à relever ces défis, bien conscient des obstacles et craintes qui peuvent aujourd'hui encore freiner des candidats à postuler. Les secteurs de l'aéronautique et du spatial ont comme mission de répondre à ces enjeux, en orientant les can-



didats grâce à de nombreux événements en Région ou à travers le site web et les réseaux sociaux, plateformes d'informations pour tous. [39]

Tout l'enjeu réside donc dans l'identification de profils particuliers, comme celui des femmes qui ne représente que 23% des postes dans le secteur mais aussi aux personnes travaillant dans un tout autre domaine et qui ont des compétences transférables, afin de les attirer pour développer les programmes liés à la décarbonation de l'aviation et à l'industrie du futur. [39]

ÉVOLUTION DES MÉTIERS



La transformation digitale modifie les métiers et les compétences requises. Les secteurs doivent offrir des perspectives attractives, avec des environnements de travail favorisant la créativité et l'innovation, pour séduire les jeunes générations sensibilisées aux enjeux environnementaux [2].

Il s'avère que l'aéronautique, l'espace et la défense sont des secteurs qui attirent aujourd'hui plus d'un tiers de la population active (35%) dans le cadre d'une possible réorientation professionnelle ou tout simplement pour la poursuite de leur carrière. Le fait que l'aérospatial soit un domaine de pointe est le principal facteur d'attractivité (12% des répondants), devant les carrières rémunératrices (9%) et le fait que le secteur recrute (8%).

Tout l'enjeu réside dans le monde du travail qui est constante évolution ainsi que les dynamiques du marché de l'emploi qui amènent les entreprises à innover dans leurs processus de recrutement. En effet, de nombreux français sont en quête de sens dans leur travail et souhaitent avoir un impact à travers leur emploi. Il est donc un enjeu de taille pour les secteurs spatial et aéronautique d'innover et de mettre en avant le réel impact positif qu'ils peuvent avoir sur la société. [39]

Les secteurs spatial et aéronautique sont confrontés à des défis complexes et interconnectés, allant de la transition vers des modèles plus durables à l'augmentation des cadences de production, en passant par l'innovation technologique et la gestion des ressources humaines. En intégrant ces problématiques de manière cohérente et en travaillant de concert, ils peuvent non seulement surmonter les obstacles actuels, mais aussi jouer un rôle clé dans la construction d'un avenir plus durable et prospère.

LE SECTEUR SPATIAL



L'espace incarne l'un des piliers d'excellence technologique de l'Europe, affirmant son rôle stratégique au cœur des enjeux de souveraineté pour la France et l'ensemble du continent. Véritable levier d'influence et de compétitivité internationale, le secteur spatial occupe une place prépondérante face aux défis stratégiques, économiques et sociétaux de notre époque. Pour préserver cette position de premier plan, l'Europe doit continuer à investir dans des programmes ambitieux, couvrant aussi bien les domaines civils que militaires, tels que l'observation, les télécommunications, la navigation et l'exploration scientifique.

Le secteur spatial est confronté à des problématiques spécifiques liées aux urgences climatiques, aux évolutions technologiques rapides et aux tensions géopolitiques. Ces défis nécessitent une transformation profonde pour assurer un développement durable et une position compétitive sur la scène internationale.

ACCÉLÉRATION DES EFFORTS DE TRANSFORMATION ET DÉFIS DE LA CROISSANCE DÉMOGRAPHIQUE

Face aux contraintes réglementaires de décarbonation et aux urgences environnementales, le spatial européen doit évoluer vers un modèle plus soutenable [1].

— Vulnérabilités et responsabilités du secteur spatial

La chaîne de valeur du spatial s'appuie sur des actifs présentant une sensibilité relativement forte aux submersions et catastrophes climatiques croissantes, qu'il s'agisse des sites de lancement ou des infrastructures de télécommunication. Les réglementations en faveur d'une limitation des zones d'artificialisation des sols peuvent renforcer le besoin d'une politique de résilience des différentes infrastructures.

Les tensions engendrées par les évolutions environnementales font émerger deux principaux risques économiques, associés à l'arbitrage entre des ressources en compétition d'usage. D'une part, il est à craindre une affectation des capitaux à d'autres investissements que le spatial (notamment liés aux enjeux de décarbonation de l'ensemble des industries). D'autre part, il peut devenir compliqué de garantir l'accès aux matières premières nécessaires à la filière européenne.



Plusieurs échelles de risques sociaux sont à anticiper. À l'échelon des talents de la filière, l'impact des pandémies et des tensions économiques peut entraîner une raréfaction des compétences et une difficulté à mener l'ensemble des opérations. Plus globalement, l'impact du spatial sur les populations locales, la faune et la flore, ainsi que l'atmosphère, peut conduire à une moindre acceptabilité sociale et une complexité accrue dans la mise en œuvre des programmes.

L'espace proche de la Terre peut être considéré comme une dixième limite planétaire. La gestion des débris, surtout dans le cadre de scénarios de croissance rapide des activités spatiales, peut entraîner une forte médiation négative et conduire à un rejet du récit du New Space.

Face à ces vulnérabilités croissantes, le secteur spatial doit non seulement renforcer sa résilience mais aussi tirer parti de son rôle stratégique pour répondre aux défis mondiaux, comme la croissance démographique et ses impacts environnementaux.

— Opportunités et efforts de transformation pour relever les défis globaux

La croissance démographique et économique engendre des défis majeurs en matière de gestion des ressources, de durabilité environnementale et d'aménagement du territoire. Les technologies spatiales, notamment le Système mondial de navigation par satellite (GNSS) et l'Observation de la Terre (OT), jouent un rôle clé dans l'optimisation des infrastructures, la gestion des ressources naturelles et l'adaptation aux enjeux climatiques.

Optimisation de l'agriculture et de la sécurité alimentaire



L'augmentation continue de la population et l'impact environnemental des activités humaines soulèvent des préoccupations croissantes en matière de sécurité alimentaire et de gestion des terres agricoles. Grâce aux technologies spatiales, l'agriculture de précision bénéficie de données plus fines permettant une meilleure gestion des cultures, une utilisation optimisée des engrais et une irrigation plus efficace. Le suivi du bétail, la gestion des zones de pêche et la mise en place de systèmes d'alerte précoce en cas de famine sont également améliorés grâce à ces innovations, garantissant une production alimentaire plus résiliente et durable [34].

Gestion des ressources hydriques et préservation des écosystèmes

La pression démographique impacte fortement la gestion de l'eau et la préservation des écosystèmes aquatiques. Une gestion inefficace peut entraîner des pénuries, une pollution accrue et des tensions sur l'accès à l'eau potable. Les technologies spatiales facilitent la cartographie et le suivi des ressources hydriques, tout en permettant une surveillance avancée des infrastructures de distribution et d'assainissement. Elles contribuent ainsi à une gestion plus efficace des services d'hygiène et de salubrité, réduisant les risques sanitaires et environnementaux liés à une mauvaise gestion de l'eau [34].

Planification urbaine et gestion des infrastructures

La croissance démographique est souvent accompagnée d'une urbanisation accélérée, qui peut devenir un moteur de développement économique et social si elle est bien gérée. Cependant, une urbanisation non maîtrisée conduit à des problèmes de surpopulation, de réduction des espaces verts et d'infrastructures inadéquates. Les données satellitaires permettent d'améliorer la planification urbaine, en fournissant des analyses précises sur la répartition des populations, la disponibilité des espaces ouverts et l'évolution des besoins en transport. Elles facilitent également la gestion du trafic automobile, en optimisant les flux de circulation et en réduisant les congestions [34].

Transition énergétique et réduction de l'empreinte carbone

L'expansion économique et démographique s'accompagne d'une augmentation significative de la demande en énergie, posant des défis en matière de sécurité énergétique et de lutte contre le changement climatique. Le GNSS et l'Observation de la Terre jouent un rôle essentiel dans la planification des infrastructures d'énergies renouvelables, en identifiant les emplacements optimaux pour les centrales solaires et éoliennes. Ils contribuent également à la gestion des réseaux intelligents (smart grids), facilitant une meilleure répartition de l'énergie et une réduction des pertes. À l'échelle individuelle, ces technologies permettent aux consommateurs d'adapter leurs habitudes grâce à des prévisions sur la production d'énergie renouvelable et la consommation énergétique [34].



L'essor démographique et économique nécessite une gestion efficace des ressources naturelles, des infrastructures et de l'énergie. Les technologies spatiales apportent des solutions concrètes pour relever ces défis en optimisant l'agriculture, la gestion de l'eau, l'urbanisation et la transition énergétique. Elles favorisent ainsi un développement plus durable et résilient, en fournissant des outils d'aide à la décision pour les gouvernements, les entreprises et les citoyens.

RISQUES LIÉS AUX MÉGAConstellations

Face à ces vulnérabilités, la prolifération des mégaconstellations ajoute une complexité supplémentaire aux enjeux environnementaux, économiques et sociaux du secteur spatial. Ces mégaconstellations désignent un ensemble de satellites interconnectés déployés en orbite terrestre pour fournir des services spécifiques tels que la communication ou l'observation. [40] Bien que ces projets promettent des avancées technologiques majeures et des opportunités économiques considérables, ils soulèvent également des problématiques de durabilité qui exacerbent les défis déjà identifiés. La prolifération des mégaconstellations de satellites représente ainsi un défi majeur pour le secteur spatial [36].



— Constat d'une augmentation exponentielle du trafic spatial

Évolution récente et chiffres clés

Depuis 2015, le nombre de satellites envoyés en orbite connaît une croissance spectaculaire, passant de 213 à 2893 en 2023 (+1258 %) [41]. Plus de 7500 satellites étaient déjà en orbite cette même année [42], et certains prévoient jusqu'à 50 000 satellites d'ici 2030 [41].



Cette dynamique suscite de fortes inquiétudes quant à la pollution spatiale, au point que certains spécialistes considèrent désormais l'espace comme une « nouvelle limite planétaire » à protéger. L'essor des mégaconstellations, amorcé en 2014, a profondément remodelé le paysage spatial. Cette année-là, 92 lancements de fusées ont eu lieu dans le monde, alors qu'en 2023 ce nombre atteignait 211, dont 96 réalisés par la seule entreprise SpaceX (91 Falcon 9 et 5 Falcon Heavy) [36]. Autrement dit, SpaceX a tiré autant de fusées en 2023 que la totalité des lancements mondiaux en 2014.

Sur les 2893 engins spatiaux mis en orbite en 2023, 1984 étaient des satellites Starlink, conçus pour voler à basse altitude afin d'améliorer leurs performances. Ils ne disposent néanmoins que d'une durée de vie de cinq à six ans avant de brûler dans l'atmosphère, et sont très rapidement remplacés par des versions successives (V1, V2, V3, etc.), afin de maintenir leur compétitivité. Si l'on prend en compte les projets Starlink, Kuiper et Guowang, c'est un total de 77 000 satellites qui pourrait être déployé, impliquant le remplacement annuel d'environ 12 000 d'entre eux — presque 100 fois le volume de lancements mondiaux de 2014 [36].

Au-delà du défi que représente la multiplication exponentielle des satellites, l'impact environnemental des fusées suscite aussi des interrogations. Les suies générées dans la haute atmosphère par les carburants ne sont pas encore pleinement évaluées. Le Starship de SpaceX, première fusée de grande taille à propulsion au méthane, demeure notamment une source d'incertitudes, puisque la société ne divulgue pas les données techniques précises de ses moteurs, invoquant le secret industriel [36]. Sans analyses approfondies ni cadre réglementaire adapté, la durabilité de l'espace et les conséquences pour l'atmosphère terrestre restent à ce jour largement méconnues.

Facteurs clés de cette croissance

Selon l'analyse de plusieurs spécialistes, dont Céline Reylé, astronome à l'institut UTINAM & [Directrice adjointe en charge de la politique de site, des SNO et des OSU au CNRS](#), trois facteurs majeurs expliquent cette expansion exponentielle :

1

Miniaturisation des satellites.

Les satellites lancés ces dernières années sont beaucoup plus compacts. Certains cubesats (satellites cubiques miniatures), par exemple, peuvent tenir dans un volume d'à peine un litre et peser moins de 10 kilogrammes. Cette réduction de taille se traduit par une baisse des coûts de lancement, rendant l'accès à l'orbite plus abordable pour un grand nombre d'acteurs.

2

Puissance accrue des lanceurs.

Les lanceurs actuels peuvent placer des charges utiles nettement plus lourdes et plus nombreuses en orbite. Certains peuvent emporter jusqu'à 140 tonnes en orbite basse. Cette capacité élevée permet l'envoi simultané de dizaines, voire de centaines de satellites lors d'une seule mission, ce qui accélère considérablement la croissance du nombre de satellites en orbite.

3

Démocratisation de l'accès à l'Espace.

De plus en plus de pays manifestent la volonté de participer à l'exploration et à l'exploitation de l'espace. Désormais ils sont plus d'une trentaine avec notamment le Brésil, l'Afrique du Sud, la Turquie ou encore les Émirats arabes unis. [43] Par exemple, l'Angola a lancé son premier satellite en 2017 afin de fournir des services de communication et d'accès à Internet sur le continent africain. Le nombre croissant d'acteurs, étatiques comme privés, contribue inévitablement à l'augmentation du trafic spatial.

L'essor des mégaconstellations et constellations

En pratique, la majorité des nouveaux satellites provient de « mégaconstellations » dédiées aux télécommunications, dont la plus avancée est Starlink. D'autres grands projets sont prévus : Kuiper, Qianfan, Guowang, etc. À elles seules, ces mégaconstellations ambitionnent de déployer plus de 77 000 satellites dans les années à venir, dont 42 000 uniquement pour Starlink (6 000 étant déjà opérationnels). Le phénomène n'est pas limité aux seules mégaconstellations : des constellations plus modestes (de quelques dizaines à quelques centaines de satellites) se multiplient également, pour des usages allant des télécommunications à l'Internet des objets, en passant par l'observation de la Terre. Les investissements se chiffrent en milliards de dollars, avec l'espoir de rentabiliser ces infrastructures massives via des services à grande échelle.



Cependant, l'enjeu de la durabilité de l'espace se pose avec acuité. Dépasser le nombre total de satellites lancés depuis le début de l'ère spatiale en quelques années seulement est un signe de bouleversement majeur, dont les conséquences environnementales et économiques sont encore mal maîtrisées [36].

— Les impacts de la croissance du trafic en orbite

Prolifération des débris spatiaux

La multiplication des satellites actifs engendre mécaniquement une augmentation des débris en orbite, qui sont principalement de quatre types :



Les satellites inactifs, restés en orbite après la fin de leur mission.



Les fragments issus d'explosions spontanées d'objets spatiaux, aujourd'hui la source majoritaire de débris.



Les étages supérieurs de lanceurs abandonnés dans l'espace.



Les débris générés par la collision entre objets spatiaux (un phénomène en hausse) ou par des tests d'armes anti-satellites volontaires, tels que celui réalisé par la Chine en 2007, qui a créé à lui seul 25 % de débris spatiaux supplémentaires répertoriés [44].

Cette accumulation de débris affecte la sécurité des satellites opérationnels, contraints à effectuer des manœuvres d'évitement de plus en plus fréquentes. Ces manœuvres consomment du carburant, réduisent la durée de vie des satellites et augmentent les coûts d'exploitation.

Les débris de petite taille, très difficiles à détecter, constituent 95 % du risque de collision pour un satellite en orbite basse (LEO). Un choc avec l'un de ces projectiles, pourtant microscopique, peut suffire à endommager gravement, voire à rendre inutilisable, un satellite. Quant aux débris de grande taille, s'ils percutent un satellite, ils peuvent littéralement le détruire et créer ainsi un nouveau nuage de fragments. Bien que ces gros objets soient en général répertoriés, plus de 90 % d'entre eux ne sont pas manœuvrables, ce qui ne permet pas d'éviter une potentielle collision.

Multiplication des manœuvres d'évitement



L'Agence spatiale européenne (ESA) souligne que la hausse du nombre de débris et de satellites actifs augmente de façon notable les probabilités de collision, notamment sur les orbites situées autour de 500 km d'altitude, où évoluent les constellations récentes (dont Starlink). Dans son rapport annuel de 2024, l'ESA rappelle la difficulté à distinguer clairement les manœuvres d'évitement des manœuvres de maintien d'orbite, ce qui complique la quantification précise du

phénomène. [45] Le chercheur H. Lewis de l'Université de Southampton a néanmoins réalisé une projection qui illustre l'ampleur du problème :

- Dans la trajectoire la plus optimiste, environ 200 000 manœuvres d'évitement par an pourraient se produire en 2027.
- Dans le scénario le plus pessimiste, ce chiffre pourrait atteindre 1 million par an.
- Face à des vitesses relatives très élevées, même une collision apparemment mineure génère d'importantes quantités d'énergie, susceptibles de détruire un satellite et d'amplifier encore le problème.

Réduction des fenêtres de tir et risques pour les lancements futurs

Outre la menace de collision, l'encombrement progressif des orbites rend plus complexe la planification de futurs lancements. Les nouveaux satellites doivent traverser les orbites basses encombrées pour rejoindre leur altitude de service. La NASA s'est ainsi inquiétée des autorisations de déploiement de mégaconstellations à très basse altitude (telles que le projet de Starlink soumis à la FCC, le régulateur américain), craignant pour la sécurité d'accès à la Station spatiale internationale, en particulier en cas d'urgence pour les astronautes.

Insuffisance du retrait actif des satellites en fin de vie

Dans le même temps, trop peu de satellites sont aujourd'hui désorbités ou transférés vers des orbites-cimetières en fin de vie. Or, un retrait systématique et planifié permettrait de freiner significativement la production de débris et de limiter la dégradation de l'environnement spatial. L'absence de réglementation internationale contraignante dans ce domaine demeure l'un des principaux freins à une gestion durable de l'espace circumterrestre.



— L'évolution des usagers des radiofréquences (RF)

L'essor des communications spatiales

L'augmentation du nombre de satellites, utilisés pour des applications variées telles que la télévision, les télécommunications, l'Internet des objets (IoT) et l'observation de la Terre, entraîne une multiplication des transmissions en radiofréquence (RF). Ces signaux sont indispensables pour la télémétrie, le contrôle des satellites et la transmission de données. [46]

Avec la croissance exponentielle des objets connectés, les besoins en bandes de fréquence évoluent rapidement. Bien que ces objets nécessitent des transmissions à faible débit, leur expansion à grande échelle transforme les enjeux de gestion du spectre RF. Les projections estiment que le nombre d'objets connectés passera de 50 milliards en 2025 à 100 milliards en 2030, rendant essentiel le développement de solutions innovantes pour assurer une gestion optimisée du spectre. [47]

En parallèle, l'essor des constellations satellitaires en orbites basses (LEO) et moyennes (MEO) ajoute une nouvelle dimension aux défis liés au spectre RF. Ces constellations offrent une connectivité universelle avec une couverture optimisée, y compris dans les régions polaires mal desservies par les satellites géostationnaires.

Leur latence réduite et leur résilience face aux attaques rendent ces réseaux particulièrement attractifs pour des applications critiques, notamment en matière de télécommunications sécurisées et de surveillance globale. [48]

L'évolution des usages terrestres et leur interaction avec le spatial



Les réseaux de télécommunications terrestres (4G, 5G, et à terme 6G), les radars civils et militaires ainsi que les technologies sans fil comme le Wi-Fi et le Bluetooth connaissent une expansion continue. Malgré une régulation orchestrée par l'Union internationale des télécommunications (UIT), la cohabitation des différents usages sur les bandes de fréquences existantes constitue un défi stratégique. [49]

Dans ce contexte, l'optimisation du spectre devient un enjeu clé pour garantir la coexistence harmonieuse des services terrestres et spatiaux. Des solutions techniques et réglementaires sont nécessaires pour préserver les performances des missions nécessitant une grande sensibilité de réception, telles que la radioastronomie et la navigation satellitaire (GNSS).

Par ailleurs, les constellations satellitaires introduisent une nouvelle dynamique dans la gestion du spectre. Contrairement aux réseaux terrestres, ces constellations ne sont pas soumises aux mêmes contraintes réglementaires nationales. Par exemple, un opérateur de satellites en orbite basse peut offrir des services de communication haut débit dans un pays sans nécessairement passer par les autorités de régulation locales, ce qui interroge sur les enjeux de souveraineté numérique.

De plus, ces constellations, dont le cœur de réseau est souvent basé hors du territoire national (comme Starlink avec AWS aux États-Unis), posent des défis en matière de contrôle des données et de confidentialité des communications. [48]

Vers une gestion durable du spectre RF pour les missions scientifiques et de positionnement

Les avancées scientifiques et technologiques s'appuient sur des transmissions radiofréquences précises et fiables. L'Académie des Sciences souligne que, malgré la mise en place de « zones sanctuaires » à faible émission, les observatoires radioastronomiques sont déjà confrontés à des perturbations croissantes. [48]

L'essor des constellations satellitaires et la généralisation des équipements connectés renforcent ces enjeux. Par ailleurs, les prochaines générations de réseaux mobiles exploitent des bandes de fréquences proches de celles utilisées par les satellites, nécessitant une coordination accrue pour éviter d'éventuelles interférences. Cette évolution invite à repenser la gestion du spectre RF à travers des approches concertées, intégrant innovation technologique et cadre réglementaire adapté.

Au-delà des enjeux civils et scientifiques, les constellations satellitaires revêtent également une importance stratégique et militaire. Elles permettent une observation continue de la Terre, une transmission rapide et sécurisée des données et une résilience accrue face aux cyberattaques et aux tentatives de brouillage. Les réseaux spatiaux sont désormais considérés comme des infrastructures critiques, notamment pour la surveillance militaire et les communications en temps de crise. L'exemple de l'utilisation de Starlink en Ukraine illustre le rôle clé de ces constellations dans des contextes de guerre, où elles offrent une couverture sécurisée et une capacité d'adaptation rapide aux besoins opérationnels. [48]



Dans ce cadre, la mise en place de liaisons laser entre satellites constitue une avancée prometteuse pour sécuriser les communications et limiter les risques d'interception et de brouillage. De plus, la souveraineté technologique devient un enjeu central pour les États et les organisations internationales. L'Europe, à travers le projet IRIS², cherche à développer une constellation souveraine capable de répondre aux besoins en connectivité sécurisée tout en garantissant une indépendance vis-à-vis des infrastructures extra-européennes. [48]

— Pollution atmosphérique et impact environnemental

L'intensification des lancements de fusées pour la mise en orbite de satellites pose un défi environnemental majeur. Contrairement à l'aviation, dont les émissions de CO₂ sont bien documentées, l'industrie spatiale produit des rejets spécifiques qui ont un impact encore peu étudié sur l'atmosphère et la couche d'ozone.

Les émissions directes et leur impact sur l'atmosphère



Les fusées émettent non seulement du dioxyde de carbone (CO₂), mais aussi des suies et des oxydes d'aluminium, dont les effets peuvent contribuer au forçage radiatif et à l'altération de la couche d'ozone. Par exemple, lors du lancement d'une Falcon 9 de SpaceX depuis le centre spatial Kennedy, environ 400 tonnes de carburant sont consommées, produisant en quelques minutes 300 tonnes de CO₂ et 100 tonnes d'eau. Ce carburant est similaire à celui utilisé dans l'aviation commerciale, bien que les conditions de combustion et d'émission soient très différentes [36].

Si l'aviation représente environ 2,5 % des émissions mondiales annuelles de CO₂, la contribution des fusées reste bien plus faible, estimée à 0,0001 %. Toutefois, cette comparaison ne tient pas compte des émissions invisibles, qui constituent la véritable problématique environnementale des lancements spatiaux [36].

Un cycle de vie énergivore et polluant

L'impact environnemental des fusées ne se limite pas à leur lancement. Leur cycle de vie complet implique des processus industriels et logistiques intensifs, ayant des répercussions sur l'ensemble de la chaîne de production.

- 1 Fabrication des fusées :** L'assemblage d'une fusée mobilise des milliers de pièces mécaniques et électroniques, fabriquées à partir de matériaux complexes comme l'aluminium, dont l'extraction et la transformation nécessitent d'importantes ressources énergétiques.
- 2 Transport des composants :** Les pièces sont acheminées vers les centres spatiaux via des réseaux logistiques internationaux, générant des émissions additionnelles de CO₂.
- 3 Approvisionnement en carburant :** Le kérosène utilisé dans de nombreux lanceurs provient de processus d'extraction polluants, impliquant des supertankers et des camions pour son transport. L'oxygène liquide, indispensable à la combustion, est produit via des procédés énergivores comme la distillation fractionnée de l'air [36].
- 4 Infrastructure des sites de lancement :** La construction et l'exploitation des installations spatiales requièrent de vastes quantités de matériaux et d'énergie, ajoutant à l'empreinte environnementale globale du secteur.

Un impact à long terme sur la haute atmosphère

Après leur mise en orbite, les satellites ont une durée de vie moyenne de six ans avant de retomber dans l'atmosphère. Lors de leur rentrée, ils libèrent chacun des centaines de kilos d'oxydes d'aluminium, qui peuvent affecter la couche d'ozone et altérer la composition chimique de l'atmosphère. Ce phénomène, encore peu étudié, représente un risque environnemental sous-estimé [36].

Vers une prise de conscience et des solutions durables

Bien que les émissions directes de CO₂ des fusées restent inférieures à celles d'autres secteurs, leur impact global, notamment à travers les rejets invisibles et le cycle de vie des lanceurs, mérite une attention accrue. En effet, les fusées ne contribuent qu'à hauteur de 0,0001 % aux émissions mondiales de CO₂. Néanmoins, elles rejettent également ce gaz à effet de serre lors de leur propulsion.

Par exemple, une Falcon 9 de SpaceX génère 425 tonnes de CO₂ par lancement, soit davantage qu'un vol Paris-New York en Boeing (350 tonnes). Cependant, en 2022, seulement 180 fusées ont été lancées à l'échelle mondiale – dont 5 par l'Europe et 61 par SpaceX – tandis que plus de 100 000 avions ont survolé la planète chaque jour. [50]

L'adoption d'une approche globale, intégrant la conception de lanceurs plus écologiques, des carburants alternatifs et des méthodes de recyclage des composants, est essentielle pour limiter l'empreinte environnementale du secteur spatial.



L'industrie spatiale doit relever des défis environnementaux spécifiques, allant des émissions de combustion aux impacts sur la haute atmosphère et à la gestion des infrastructures et des ressources. Une meilleure compréhension des effets des rejets spécifiques et une transition vers des technologies plus durables sont essentielles pour concilier exploration spatiale et préservation de l'environnement terrestre.

— Forçage radiatif et effets sur le climat

Ergols	Forçage radiatif direct (mW/m ²)			
	CO ₂	H ₂ O	BC	Al ₂ O ₃
Kérosène	6.10 ⁻⁶	5.10 ⁻³	3,2.10 ⁻¹	
Hydrogène		2.10 ⁻²		
Solide	2.10 ⁻⁶	5.10 ⁻³	1.10 ⁻¹	1,8 ⁻¹
Hypergolique	1.10 ⁻⁶	1.10 ⁻³	6.10 ⁻²	
Hybride	1,5.10 ⁻⁶	3.10 ⁻³	5.10 ⁻¹	

– Figure 4 : Tableau récapitulatif de la contribution au changement climatique pour 500 tonnes de différents types d'ergols au zéro de référence. [17]

Les suies expulsées par les moteurs de fusées provoquent un forçage radiatif jusqu'à 50 fois supérieur à celui de la vapeur d'eau, qui elle-même est presque 1 000 fois supérieur à celui du CO₂. Les moteurs au kérosène, tels que ceux des Falcon 9 de SpaceX, sont particulièrement délétères à cet égard [36].

La dernière colonne correspond à la production d'alumine par les boosters à poudre car les différents types de propulsions existant sur le marché du lanceur libèrent ces composés dans différentes proportions. On constate que les plus délétères sont les moteurs au kérosène de type Falcon 9, les boosters poudres qui accompagnent les fusées à hydrogène comme ariane et des moteurs hybrides plus rares mais développés par certaines startups. [36]

LA RECHERCHE DE FINANCEMENT ET LES DÉFIS TECHNOLOGIQUES

Le domaine spatial est depuis quelques années au cœur d'enjeux énormes, notamment pour la mise en orbite des satellites, où la concurrence s'intensifie [51]. Le secteur spatial doit ainsi innover afin de répondre aux ambitions de conquête spatiale tout en intégrant les enjeux environnementaux. En février 2017, l'Indian Space Research Organisation (ISRO) a illustré ce dynamisme en plaçant 104 satellites sur orbite à l'aide d'un seul lanceur, le PSLV-C37, établissant alors un record de fiabilité et de compétitivité [52].

La propulsion constitue la pierre angulaire des projets de conquête spatiale, en particulier pour les ambitions martiennes. Les lasers font l'objet de recherches pour la propulsion photonique, avec des projets tels que Deep In, qui vise à atteindre Mars en trois jours avec un vaisseau de 100 kg équipé de voiles laser. La feuille de route de ce projet, lancée en 2015-2016, a reçu des soutiens financiers de la NASA. Depuis mi-2016, le projet est entré dans la phase II des recherches. Cependant, de nombreux défis technologiques subsistent, notamment concernant la source du laser, sa position, sa puissance et la conformation des voiles [51].

Malgré les pressions budgétaires, de nouvelles tendances émergent. Le développement de nouvelles formes de financement, l'essor des partenariats public-privé, ainsi que l'évolution des modèles économiques ouvrent des perspectives pour assurer la pérennité du secteur spatial et garantir son indépendance stratégique.

— Adapter les modèles de financement au nouveau paysage spatial

Un modèle économique exigeant et en transformation



Le secteur spatial repose sur des investissements lourds et des retours à long terme, rendant son financement complexe. Alors que les États jouent historiquement un rôle central dans le financement des programmes spatiaux, les évolutions récentes du marché, notamment l'essor du NewSpace et des initiatives privées, modifient la donne. [53]

Les financements publics jouent un rôle essentiel dans le développement du secteur spatial, notamment pour la R&D et les infrastructures non commerciales (satellites de surveillance, systèmes de navigation GNSS, programmes scientifiques et militaires). Toute baisse des budgets gouvernementaux affecterait directement les entreprises du sec-

teur et les projets en cours. Déjà, le Programme 193 « Recherche Spatiale » en France a subi une annulation de 193 millions d'euros sur son enveloppe initiale de 1,8 milliard d'euros en 2024. [35]

À l'échelle mondiale, les agences spatiales comme la NASA ou l'ISRO (Inde) dépendent à plus de 90 % des financements publics, illustrant la vulnérabilité de l'industrie face aux arbitrages budgétaires.

Vers une redéfinition des financements publics et privés

Si les financements publics restent un pilier, les partenariats public-privé (PPP) sont de plus en plus sollicités pour partager les risques et attirer des capitaux privés. Cependant, ces collaborations nécessitent un équilibre financier stable. Certains projets conjoints entre la NASA et la DARPA ont été suspendus faute d'une répartition claire des investissements et des engagements financiers.

En parallèle, l'accès aux capitaux privés se complexifie. La hausse des taux d'intérêt rend les investissements à long terme moins attractifs, tandis que les investisseurs privilégient des secteurs à retour sur investissement rapide. Ainsi, les startups du spatial peinent à lever des fonds, ce qui freine l'innovation et la création de nouveaux acteurs.

Maintenir une innovation de rupture malgré les pressions économiques

L'innovation est un moteur essentiel pour assurer la compétitivité du secteur spatial. Face à l'émergence d'acteurs privés puissants, tels que SpaceX, les États doivent renforcer leur soutien aux technologies stratégiques comme les lanceurs réutilisables, les propulsions avancées, et les satellites de nouvelle génération.

Renforcer l'indépendance stratégique européenne

L'Europe doit préserver son autonomie spatiale face à une concurrence internationale accrue. Des investissements sont nécessaires pour maintenir une capacité de lancement indépendante, éviter une dépendance à SpaceX ou d'autres acteurs non européens, et garantir la souveraineté des infrastructures de communication et d'observation. Dans cette optique, l'Union européenne mise sur IRIS², un projet de constellation souveraine développée en partenariat avec Thales et Airbus. Cette initiative vise à assurer des communications résilientes et sécurisées, tout en renforçant la compétitivité de l'industrie spatiale européenne sur le long terme. [54]



Un avenir à construire entre défis économiques et nouvelles opportunités

Malgré les incertitudes budgétaires et les difficultés d'accès aux financements privés, le secteur spatial continue d'évoluer avec de nouvelles dynamiques économiques. L'essor des services spatiaux commerciaux, l'exploration de nouveaux modèles de financement hybride, et la montée en puissance des technologies duales (civiles et militaires) offrent des opportunités pour garantir la viabilité du domaine spatial.

Pour surmonter ces défis, une approche combinant innovation, partenariats stratégiques et financements adaptés sera essentielle afin de préserver la compétitivité et la souveraineté du secteur spatial dans les années à venir.

De la contrainte budgétaire à l'innovation technologique

Face aux restrictions budgétaires et à la nécessité d'attirer de nouveaux financements, le secteur spatial doit non seulement repenser ses modèles économiques, mais aussi miser sur des avancées technologiques capables d'améliorer la rentabilité et la durabilité des missions. L'innovation joue ainsi un rôle central dans la réduction des coûts et l'optimisation des performances des lanceurs et des systèmes de propulsion.



Dans ce contexte, l'évolution vers des technologies plus efficaces, plus économiques et plus respectueuses de l'environnement devient un levier stratégique pour assurer la compétitivité du secteur. Parmi ces innovations, l'émergence du méthane comme alternative aux ergols traditionnels et le développement de la propulsion électrique constituent des avancées majeures qui façonnent l'avenir de l'exploration spatiale. Ainsi, les sections suivantes explorent ces percées technologiques et leur impact sur le futur des missions spatiales, de la réduction des coûts des lancements aux perspectives d'exploration interplanétaire.

— Le méthane comme alternative aux ergols traditionnels

Face aux défis technologiques et économiques liés aux lancements spatiaux, le secteur explore de nouvelles alternatives aux ergols conventionnels. Le méthane se positionne aujourd'hui comme un carburant prometteur, offrant des avantages significatifs par rapport à l'hydrogène en matière de stockage, de manipulation et de coût. Cette évolution accompagne le développement de lanceurs plus performants et plus rentables, tout en facilitant la réutilisation des moteurs. [55]

Un carburant plus accessible et plus facile à manipuler

La propulsion chimique reste la solution la plus efficace pour l'envoi de charges lourdes en orbite. Toutefois, l'hydrogène, bien que très performant, présente des contraintes majeures en raison de sa température de liquéfaction extrêmement basse (-253°C) et de son faible volume massique. À l'inverse, le méthane liquide, stocké à -161°C , offre une meilleure stabilité thermique et une plus grande facilité de stockage. Sa température étant plus proche de celle de l'oxygène liquide (-183°C), il permet une simplification des réservoirs et des circuits d'alimentation. [56]



En outre, le méthane possède une densité six fois supérieure à celle de l'hydrogène, ce qui signifie que pour une même quantité d'énergie, il nécessite un volume bien moindre. Cette caractéristique réduit la taille des réservoirs, rendant les étages des fusées plus compacts et facilitant ainsi leur récupération et leur réutilisation. [56]

Une optimisation des systèmes de propulsion

L'un des avantages majeurs du méthane est sa capacité à assurer une pressurisation autogène des réservoirs, supprimant ainsi la nécessité de recourir à des systèmes coûteux et complexes à base d'hélium. Cette simplification réduit les coûts de fabrication et améliore la fiabilité des moteurs. De plus, le méthane génère moins de dépôts de suie et de résidus lors de la combustion, ce qui prolonge la durée de vie des composants et facilite leur réutilisation. [56]

Les progrès technologiques actuels s'orientent vers des moteurs fonctionnant au méthane afin d'améliorer la rentabilité des lancements spatiaux. Contrairement aux ergols solides ou aux carburants hypergoliques, le méthane permet un redémarrage plus facile en vol, ce qui est un atout majeur pour les missions nécessitant plusieurs impulsions, comme l'insertion orbitale ou la descente contrôlée des étages réutilisables. [56]

L'Europe et le projet Prometheus



L'Europe mise sur le programme Prometheus (Precursor Reusable Oxygen METHane cost Effective propUlsion System) pour équiper ses futurs lanceurs. Ce moteur de nouvelle génération, fonctionnant à l'oxygène liquide et au méthane, a été conçu pour être réutilisable et réduire considérablement les coûts des lancements spatiaux.

Prometheus offre une poussée variable pouvant atteindre 100 tonnes, et Ariane 6 sera équipée de sept de ces moteurs. Les premiers essais d'allumage ont été réalisés en 2020, et l'intégration de cette technologie sur les lanceurs européens est prévue à l'horizon 2030. En attendant cette transition, la série actuelle de moteurs Vulcain continuera d'être utilisée pour les missions spatiales européennes. [56]

Vers une nouvelle ère pour la propulsion spatiale

L'adoption du méthane comme carburant spatial représente une avancée majeure pour l'industrie spatiale. En facilitant le stockage et la manipulation, en réduisant la complexité des systèmes de propulsion et en améliorant la réutilisabilité des moteurs, cette évolution ouvre la voie à des lanceurs plus performants, plus rentables et plus respectueux de l'environnement. Avec le développement de technologies comme Prometheus, l'Europe se positionne dans la course aux lanceurs nouvelle génération, prêts à relever les défis de l'exploration spatiale et de l'optimisation des lancements orbitaux. [56]

— La propulsion électrique : une révolution en cours

La propulsion électrique représente une avancée majeure dans les technologies spatiales et aéronautiques, avec des applications allant de l'ajustement de l'orientation des satellites aux voyages interplanétaires. Bien que cette technologie ne soit pas encore prête à remplacer totalement les moteurs traditionnels, elle ouvre de nouvelles perspectives pour des missions plus légères, plus efficaces et plus durables.

Une technologie en pleine évolution dans le spatial

Depuis plus de 20 ans, la propulsion électrique connaît des progrès significatifs en matière d'autonomie, de miniaturisation et de performances, ce qui la destine à des projets de plus en plus ambitieux. Cette technologie est déjà utilisée pour ajuster l'orientation des satellites, mais elle joue aussi un rôle clé dans les missions interplanétaires, notamment pour le déplacement des sondes spatiales et des véhicules d'exploration.

Actuellement, le xénon est le carburant privilégié pour la propulsion ionique des engins spatiaux. Il est apprécié pour sa faible énergie d'ionisation et la possibilité d'être stocké sous forme liquide à température ambiante sous haute pression, avant d'être ramené à l'état gazeux pour alimenter les moteurs. Toutefois, le processus d'ionisation nécessite une source d'énergie électrique, qui est aujourd'hui fournie par des panneaux solaires. À l'avenir, cette énergie pourrait être produite par des réacteurs nucléaires à fission ou par des générateurs thermoélectriques fonctionnant grâce à la désintégration d'un isotope radioactif [51][57].

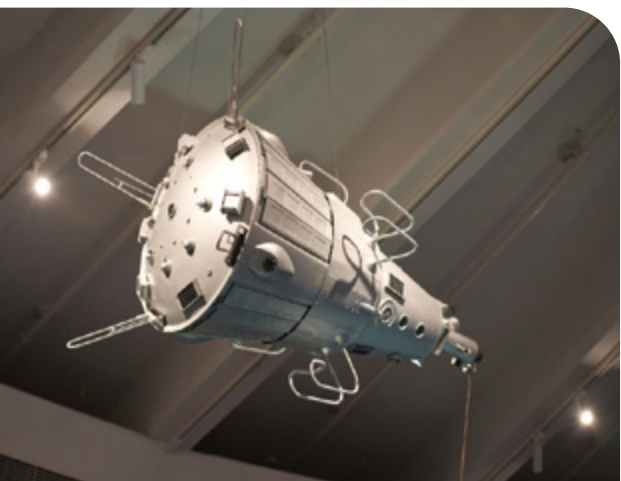


Vers une miniaturisation et une optimisation énergétique

En parallèle de l'augmentation des poussées, les efforts se concentrent sur l'optimisation de l'efficacité énergétique et la miniaturisation des propulseurs électriques, afin d'équiper des satellites de plus en plus petits, allant du Cubesat aux microsatsellites et nanosatsellites. L'objectif est de permettre l'émergence d'une nouvelle génération de satellites et de sondes spatiales, qui seraient moins coûteux, plus nombreux, plus facilement remplaçables et capables de voler en flotte.

Aujourd'hui, les propulseurs de Hall restent dominants dans le domaine de la propulsion ionique, mais les avancées en micro-propulsion pourraient bientôt redéfinir les standards technologiques et ouvrir la voie à une ère spatiale marquée par la prolifération de satellites plus petits et plus autonomes [51].

L'électrification de la propulsion aéronautique



Au-delà du domaine spatial, l'électrification des systèmes non propulsifs a déjà apporté des améliorations continues aux avions et hélicoptères au cours des dernières décennies. Aujourd'hui, l'électrification de la propulsion annonce une véritable révolution dans l'aéronautique, impliquant une refonte complète de la conception des aéronefs, de leur architecture et de leur modèle d'exploitation.

Les projets de recherche actuels montrent que l'aviation de demain sera caractérisée par une plus grande diversité de formes et d'usages, en fonction du degré d'adoption de l'électricité comme source d'énergie propulsive. La phase ultime de cette évolution est la propulsion entièrement électrique, où les moteurs thermiques seraient totalement remplacés par des systèmes fonctionnant exclusivement à l'électricité [58].

Défis et perspectives pour la propulsion électrique

De nombreux projets explorent ces nouvelles possibilités, que ce soit par des acteurs industriels établis ou des start-ups innovantes. Par exemple, la société Wright Electric, en partenariat avec EasyJet, ambitionne de faire voler un avion électrique de 186 places d'ici 2030.

Cependant, des défis majeurs subsistent, notamment en matière de certification et de sécurité. L'un des obstacles principaux est la gestion des risques liés aux batteries, car un risque d'incendie ou de défaillance technique pourrait s'avérer critique pour la sécurité aérienne. Les récents accidents du Boeing 737 MAX ont rappelé l'importance des procédures de certification rigoureuses, ce qui ralentit l'intégration des nouvelles technologies dans l'aviation commerciale [58].



La propulsion électrique marque une avancée majeure pour l'aérospatiale, offrant des perspectives d'optimisation énergétique, de réduction des coûts et d'amélioration des performances. Dans le spatial, elle permet déjà des ajustements précis et ouvre la voie aux missions interplanétaires à faible consommation d'énergie. Dans l'aviation, elle annonce une transformation structurelle du secteur, bien que de nombreux défis techniques et réglementaires doivent encore être surmontés avant une adoption massive.

— Développement des lanceurs réutilisables

Depuis 2015, ArianeGroup et le CNES collaborent au développement de Prometheus, un moteur-fusée à ergols liquides réutilisable et à faible coût, conçu pour maintenir la compétitivité européenne sur le marché des lancements de satellites. Cette initiative s'inscrit dans un contexte de transformation majeure du secteur spatial, marqué par l'essor de SpaceX et de ses lanceurs réutilisables [32].

L'impact de SpaceX et la nécessité d'une réponse européenne

L'apparition des lanceurs réutilisables a profondément modifié le modèle économique du secteur. En moins de dix ans, SpaceX, sous l'impulsion d'Elon Musk, est devenu leader mondial des lancements grâce à son lanceur Falcon 9, capable de revenir sur Terre et d'être réutilisé presque comme un avion [59].

Ce bouleversement est d'autant plus frappant qu'en 2001, un rapport du Sénat français estimait que les lanceurs réutilisables ne permettraient pas de réduire les coûts d'accès à l'espace. Pourtant, dès 2002, Elon Musk fondait SpaceX, misant sur cette technologie pour révolutionner le marché. Depuis, de nombreux acteurs privés et institutionnels ont investi dans des solutions toujours plus innovantes pour rendre l'accès à l'espace moins coûteux et plus flexible [60].

Prometheus : une technologie stratégique pour l'Europe

Face à ces évolutions rapides, Prometheus représente une réponse stratégique française et européenne. Son objectif est d'intégrer des technologies de réutilisation qui, selon le Centre d'inspiration et d'innovation spatiales Way4Space, sont en passe de redéfinir l'équilibre concurrentiel du marché. Cette innovation devrait avoir des répercussions techniques, économiques et environnementales significatives [60].



L'Europe entend ainsi éviter un retard technologique face aux États-Unis, où des entreprises comme SpaceX et Blue Origin visent déjà la réutilisation complète des lanceurs, y compris le second étage, dans un futur proche. Prometheus ambitionne de développer rapidement des briques technologiques essentielles pour permettre à l'Europe de s'imposer dans cette nouvelle ère du spatial [61].

Un enjeu stratégique pour l'Europe spatiale

Selon Christophe Bonhomme, sous-directeur Systèmes de Transport Spatial au CNES, les services de lancement sont devenus un enjeu mondial. Si les grandes puissances disposent de leurs propres lanceurs pour des charges institutionnelles (missions militaires, scientifiques ou de recherche), le secteur commercial a connu un essor considérable. Dans ce contexte, l'Europe ne peut se permettre d'être distancée et doit continuer à innover pour rester compétitive sur les plans industriel et stratégique [32].

Le développement de Prometheus symbolise l'adaptation de l'Europe aux nouvelles dynamiques du marché spatial. À travers ce projet, ArianeGroup et le CNES cherchent à réduire les coûts, améliorer la flexibilité des lancements et renforcer la position de l'Europe dans un secteur de plus en plus compétitif. Avec la montée en puissance des lanceurs réutilisables, l'innovation est indispensable pour garantir l'indépendance et la souveraineté spatiale européenne dans les décennies à venir.



— Le défi de l'isolement en voyages spatiaux

L'un des défis majeurs des missions spatiales de longue durée est la gestion de l'isolement et de la solitude des astronautes. Loin de la Terre, ces derniers doivent faire face à des conditions extrêmes qui peuvent affecter leur santé mentale et leur bien-être psychologique. Pour y remédier, des technologies de communication numérique et de réalité virtuelle ont été développées afin de maintenir un lien avec leurs proches et d'atténuer le sentiment d'isolement [62].

Les limitations des communications dans les missions vers Mars

Les voyages interplanétaires, notamment les missions habitées vers Mars, présentent des contraintes de communication inédites. En raison de la distance moyenne de 225 millions de kilomètres entre la Terre et Mars, toute transmission en temps réel est impossible. En effet, le temps nécessaire pour qu'un signal radio atteigne Mars peut varier de 5 à 20 minutes, rendant toute interaction instantanée impraticable.



Ainsi, durant le voyage de trois ans nécessaire pour atteindre Mars et revenir, les astronautes ne pourront échanger avec leurs proches que par messages préenregistrés, ce qui accentue leur isolement. Pour pallier ce manque, un espace virtuel immersif est en cours de développement, permettant aux astronautes et à leurs familles de partager des moments ensemble via des messages vidéo en différé accessibles grâce à des casques de réalité virtuelle [62].

La santé mentale, un enjeu prioritaire

Le principal risque lié à cet isolement prolongé est son impact psychologique sur l'équipage. Une détérioration de la santé mentale des astronautes pourrait avoir des conséquences graves sur leur performance, leur prise de décision et la cohésion de l'équipage. Il est donc impératif pour les chercheurs et les psychologues d'anticiper les réactions comportementales et de proposer des solutions adaptées pour préserver l'équilibre émotionnel des astronautes.

La digitalisation joue un rôle clé dans cette approche, en apportant des outils interactifs et immersifs permettant de réduire le sentiment de solitude et de renforcer le soutien psychologique durant ces missions [62].



Cimon : un robot compagnon pour l'équipage

En complément des solutions numériques, une équipe d'ingénieurs allemands a développé Cimon, un robot intelligent conçu pour interagir avec les astronautes. Doté d'une interface souriante et intuitive, ce robot est capable d'adapter ses réactions et sa personnalité en fonction des besoins émotionnels des membres d'équipage.

L'objectif de Cimon est double :

- 1 Offrir un support émotionnel aux astronautes, en leur permettant de communiquer avec un compagnon artificiel et de recréer une interaction sociale à bord des vaisseaux spatiaux.
- 2 Faciliter la gestion du stress et des émotions, en donnant aux astronautes la possibilité de se confier à un interlocuteur non humain, réduisant ainsi la pression psychologique du voyage [62].

Les missions spatiales de longue durée posent un défi majeur en matière de gestion de l'isolement et du bien-être psychologique des astronautes. Grâce aux avancées en communication numérique, en réalité virtuelle et en intelligence artificielle, des solutions innovantes sont mises en place pour améliorer le confort mental des équipages et garantir le succès des expéditions interplanétaires. Alors que l'exploration de Mars se profile à l'horizon, la prise en compte des facteurs humains devient une priorité essentielle pour assurer la viabilité de ces missions extrêmes.



CONQUÊTES SPATIALES

L'humanité se prépare à une nouvelle ère de conquêtes spatiales, portée par l'ambition de s'installer durablement sur la Lune et de poursuivre l'exploration vers Mars [32]. Outre l'exploit technologique, il s'agit de tirer parti des ressources disponibles dans l'espace et de développer une véritable « économie lunaire », tout en anticipant les défis scientifiques et environnementaux liés à ces missions. L'Europe, forte de ses capacités d'innovation et de ses partenariats institutionnels, cherche à prendre une place de premier plan dans ce contexte concurrentiel dominé par des agences historiques (NASA, Roscosmos, ESA, CNSA) et de nouveaux acteurs privés audacieux [51].

— Retour durable sur la lune et nouveaux matériaux

L'exploration spatiale et les ambitions de retour durable sur la Lune nécessitent la mise au point de nouveaux matériaux adaptés aux conditions extrêmes de l'environnement lunaire. Parmi ces innovations, les textiles des scaphandres spatiaux font l'objet d'importants travaux de recherche afin de garantir la sécurité et la durabilité des équipements utilisés lors des missions lunaires et futures expéditions vers Mars [32].

Le rôle de COMEX et des collaborations européennes



L'entreprise française COMEX, fondée en 1961, est un acteur clé du développement de technologies d'intervention humaine et robotique en milieux extrêmes. En partenariat avec l'Agence Spatiale Européenne (ESA), COMEX participe à plusieurs projets visant à préparer le retour de l'homme sur la Lune. Par ailleurs, la filiale polonaise d'ABGi est partenaire de l'ESA Technology Broker et de l'ESA Application Ambassador, renforçant ainsi l'implication européenne dans ces avancées technologiques [32].

Le projet PEXTEX : concevoir des scaphandres lunaires résistants

L'un des projets majeurs en cours est PEXTEX, auquel COMEX contribue activement. Ce programme s'inscrit dans une nouvelle vision de l'exploration lunaire, où l'objectif n'est plus seulement de réaliser une présence temporaire sur la surface lunaire, mais d'y établir une présence durable, désignée par la NASA sous l'appellation «sustainable presence on the surface». Contrairement aux missions Apollo qui se limitaient à quelques jours sur la Lune, cette approche vise à installer des infrastructures et équipements de manière permanente [32].

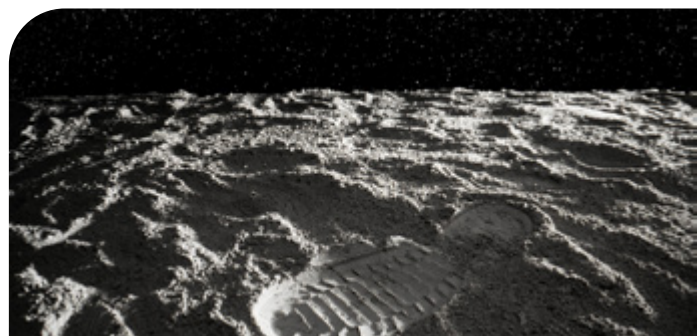
PEXTEx se concentre spécifiquement sur le développement de textiles adaptés aux scaphandres lunaires. L'un des principaux défis à relever est la résistance aux conditions extrêmes de la surface lunaire, notamment à la poussière lunaire (régolithe). Ce matériau, extrêmement abrasif, a causé des dommages significatifs aux scaphandres Apollo lors des sorties extravéhiculaires (EVA). Pour permettre une présence prolongée sur la Lune, il est essentiel de concevoir des équipements capables de résister à une exposition prolongée au régolithe, aux radiations, aux températures extrêmes et à la nuit lunaire [32].

Vers une exploration spatiale plus ambitieuse

Le développement de nouveaux matériaux résistants pour les scaphandres lunaires constitue une étape clé vers une présence humaine durable sur la Lune. En transformant notre satellite naturel en laboratoire pour l'exploration spatiale, ces avancées serviront de base technologique pour des missions plus ambitieuses, notamment en vue de l'exploration de Mars et au-delà [32].

— Économie lunaire et exploration

L'un des défis majeurs de l'exploration spatiale est la construction d'une «économie lunaire», un modèle permettant d'exploiter les ressources lunaires pour soutenir une présence humaine durable sur la surface de la Lune et ouvrir de nouvelles opportunités économiques. Cette vision s'inscrit dans le cadre du projet Moon Village, proposé par Johann-Dietrich Wörner, ancien directeur de l'Agence Spatiale Européenne (ESA). L'idée sous-jacente est que, tout comme l'économie terrestre repose sur l'exploitation des ressources marines profondes, l'avenir pourrait voir l'extraction de ressources dans les profondeurs de l'espace [32].



L'Europe face à la nouvelle course à l'espace

Pour relever ce défi, l'Europe doit intensifier ses efforts et affirmer son rôle dans la nouvelle conquête spatiale. Historiquement terre d'explorateurs et d'innovateurs, le continent a tout intérêt à mobiliser ses talents et ses ressources pour rester compétitif face aux grandes puissances spatiales comme les États-Unis, la Chine, la Russie et l'Inde.

L'essor d'acteurs privés tels que SpaceX et de nouvelles ambitions internationales modifient la dynamique du secteur spatial. Il devient crucial pour l'Europe de ne pas laisser ces opportunités stratégiques lui échapper en investissant dans l'innovation et le développement technologique, notamment dans le cadre d'une économie lunaire viable.

L'importance des matériaux intelligents pour l'exploration lunaire



Outre les recherches sur des matériaux résistants aux conditions lunaires, les scientifiques et ingénieurs explorent le potentiel des « smart materials » ou matériaux intelligents, capables d'adapter spontanément leurs propriétés physiques en réponse à différents stimuli naturels ou induits. Ces stimuli peuvent inclure des variations de température, des contraintes mécaniques, des champs électriques ou magnétiques [63].

Ces matériaux offrent une polyvalence accrue dans la conception des équipements lunaires :

- 1 Certains textiles intelligents peuvent servir d'affichage électronique, facilitant la communication entre astronautes.
- 2 D'autres assurent une protection contre les radiations et agissent comme boucliers contre les impacts de micrométéoroïdes.
- 3 Certains possèdent des propriétés d'autoréparation, augmentant la durabilité des équipements et réduisant les besoins en maintenance.
- 4 D'autres encore permettent de surveiller les mouvements des astronautes afin d'améliorer leur sécurité et d'optimiser leur mobilité.

Ces innovations ne se limitent pas à des matériaux isolés mais reposent sur des assemblages complexes, appelés « stacks », combinant matériaux classiques et matériaux intelligents dans un ordre précis afin d'optimiser leurs performances [32].



L'exploration lunaire ne se limite plus à l'envoi de missions ponctuelles : elle s'inscrit désormais dans une vision à long terme, visant à établir une présence humaine durable sur la Lune. L'économie lunaire, basée sur l'exploitation de nouvelles ressources et technologies, représente une opportunité stratégique pour l'Europe.

Pour tirer parti de cette transformation, il est essentiel de développer des infrastructures adaptées, d'investir dans des technologies de pointe, et d'adopter une approche innovante, notamment en intégrant les avancées en matériaux intelligents. L'objectif final est de faire de la Lune un véritable laboratoire d'expérimentation pour les futures missions spatiales, en préfigurant les défis de l'exploration martienne et interplanétaire.

— Conquête martienne

L'exploration de Mars représente l'un des plus grands défis technologiques et scientifiques du XXI^e siècle. La planification d'une mission habitée vers la planète rouge implique de déterminer la trajectoire, la durée du voyage, le type de véhicule utilisé et les moyens de quitter la Terre. Ces options stratégiques doivent être étudiées et financées bien avant d'envisager les difficultés liées au voyage et à l'atterrissage [51].

Les contraintes des fenêtres de lancement

L'un des premiers obstacles à une mission vers Mars est la périodicité des fenêtres de départ.

Avec les technologies spatiales actuelles, un départ n'est possible que tous les deux ans, en raison des positions relatives de la Terre et de Mars sur leurs orbites.

La distance entre les deux planètes varie entre 56 et 400 millions de kilomètres, ce qui impose d'optimiser la trajectoire pour réduire le temps de voyage. La conjonction idéale pour un voyage rapide se produit lorsque Mars et la Terre sont en opposition, soit tous les deux ans, permettant une traversée d'environ sept mois.



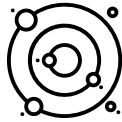
Cette contrainte impose deux options pour le retour :

- 1 Un court séjour de un à deux mois sur Mars avant de repartir immédiatement.
- 2 Un séjour prolongé d'un an et demi, en attendant la prochaine opportunité de retour [51].

Les défis du lancement et de la propulsion

Si le décollage de la Terre est devenu une routine pour de petites charges utiles comme des satellites et des sondes, une mission habitée vers Mars impose de propulser une masse considérable hors de l'attraction terrestre. Une telle mission nécessiterait de lancer entre 300 et 500 tonnes, bien au-delà des capacités des lanceurs actuels.

Deux options sont actuellement envisagées pour transporter une charge aussi massive vers Mars :



Un lancement en plusieurs modules de 50 à 100 tonnes, à assembler en orbite terrestre ou voyageant séparément.



Un vaisseau géant capable de décoller directement depuis la Terre [51].

L'approche de la NASA : un voyage en plusieurs étapes

La NASA privilégie une approche multimodulaire, basée sur le développement d'un nouveau lanceur lourd, le SLS (Space Launch System). Ce lanceur de nouvelle génération doit être capable de placer en orbite basse terrestre environ 130 tonnes et d'envoyer vers Mars un module pesant 50 tonnes.

Le premier vol test du SLS, associé à la capsule Orion, a été lancé le 16 novembre 2022. Ce système modulaire permettrait de réduire les contraintes technologiques et financières en transportant la charge en plusieurs étapes avant l'assemblage en orbite [51]. Le prochain vol, Artemis II, est prévu pour avril 2026 et sera la première mission habitée du programme Artemis. L'équipage effectuera un survol de la Lune avant de revenir sur Terre. [64]

Un défi technologique et financier colossal



À ce jour, aucune autre puissance spatiale ne s'est engagée dans la construction d'un lanceur lourd spécifiquement destiné aux missions habitées vers Mars. La complexité technologique et les coûts faramineux de ce projet freinent les ambitions des agences spatiales comme celles de la Chine, de la Russie ou de l'Europe.

L'exploration martienne reste néanmoins un objectif de long terme, nécessitant des avancées majeures en matière de propulsion, d'autonomie des vaisseaux et de soutien logistique pour garantir le succès d'une présence humaine sur Mars [51].

ENJEUX GÉOPOLITIQUES ET MILITARISATION DE L'ESPACE

L'essor des activités spatiales, autrefois limité à quelques puissances, s'étend désormais à un nombre croissant d'États et d'acteurs privés. Cette diversification, couplée à l'évolution vers un monde multipolaire, fait de l'espace un théâtre d'affirmation des capacités technologiques et militaires, où les tensions internationales se répercutent au-delà de la surface terrestre.

À la poursuite d'intérêts stratégiques et économiques, plusieurs nations renforcent leur présence en orbite, tandis que des entreprises privées jouent un rôle croissant dans la fourniture de services spatiaux.

Cette nouvelle configuration, marquée par la privatisation de certaines capacités et l'émergence de nouveaux usages, interroge les modèles historiques de coopération et de régulation. Elle nourrit des inquiétudes quant à la militarisation de l'espace et à l'essor d'une compétition moins coordonnée, exacerbant les enjeux de sécurité, de souveraineté et de soutenabilité à long terme.

— Polarisation et militarisation



À l'influence outre-Atlantique s'ajoutent les tensions géopolitiques et l'évolution vers un monde multipolaire au sein duquel l'espace devient un territoire de démonstration de puissance, doublé d'une zone militarisée en soutien des activités terrestres, tout comme une zone de conflit en soi.

Les efforts chinois, russes, indiens et japonais, induisent une nouvelle course à l'espace, transformant les modèles de collaboration internationaux vers plus de bilatéralité. Cette mutation des modèles est renforcée par une privatisation accrue des capacités, avec un risque de privatisation de la souveraineté. Tous ces mouvements réduisent le niveau de faisabilité d'une régulation homogène en faveur de la soutenabilité de la filière.

— Foisonnement des nouveaux usages

La multiplication des initiatives privées soutenues grandement par des financements publics, ainsi que l'émergence d'acteurs issus de secteurs en dehors du spatial, semblent dessiner un nouvel espace, dans lequel l'activité économique pourrait investir des champs d'application nouveaux comme le cloud spatial, le mining, la logistique spatiale, les GNSS privés, l'énergie dans et depuis l'espace, la surveillance privée. La confirmation de ces développements conduirait à une démultiplication des lancements et des infrastructures, une pollution accrue de l'espace lui-même, ainsi qu'une dépendance exacerbée vis-à-vis des activités spatiales.

— Le techno optimisme à l'encontre d'un modèle européen plus vertueux

Porté par des acteurs fortement médiatisés, les théories de développement comme l'accélérationnisme efficace et le long-termisme deviennent le fer de lance d'un modèle culturel qui érige la soutenabilité en ennemie, misant sur un investissement massif dans les technologies, ainsi que l'accès à toute ressource possible notamment disponible dans l'espace. Ce courant étant porté par des acteurs aux ressources capitalistiques sans comparaison à celles du continent européen, il est à craindre que cette philosophie se transforme en modèle dominant. Le débat sur la soutenabilité du spatial européen s'inscrit ainsi dans une construction socio-politique de l'éthique humaine, dans laquelle malheureusement la voix européenne reste peu audible.

— La gestion des débris dans l'espace et pollution lumineuse

Depuis le début de l'ère spatiale en 1957, une multitude de lanceurs, satellites et instruments ont été envoyés en orbite sans réelle prise en compte de leur fin de vie. Avec le temps, leur accumulation n'a cessé de croître, entraînant la formation de centaines de milliers de débris issus d'explosions et de collisions. [65]

À ce jour, les explosions en orbite représentent la principale source de débris spatiaux. Elles sont principalement dues à des restes d'énergie encore présents à bord des satellites et des lanceurs, tels que le carburant résiduel ou les batteries. Bien que des mesures préventives aient été mises en place depuis plusieurs années, la fréquence de ces événements ne diminue pas.



Selon Holger Krag, responsable du Programme de sécurité spatiale de l'ESA, les efforts visant à désorbiter les engins en fin de mission progressent, mais de manière trop lente. [65]

Avec l'intensification du trafic spatial, il devient crucial de développer des technologies garantissant l'efficacité des mesures de prévention des débris, un objectif poursuivi par l'ESA à travers son Programme de sécurité spatiale.

En parallèle, une surveillance plus stricte des satellites et du respect des réglementations en matière de réduction des débris est essentielle pour limiter les risques liés à cette pollution orbitale. [65]

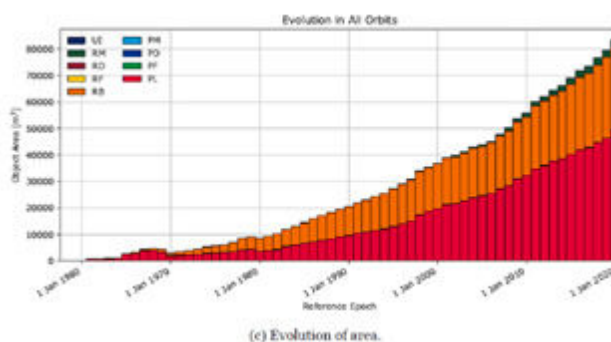
Les directives et normes internationales définissent désormais les bonnes pratiques à adopter pour une exploitation durable de l'espace [65] :

- 1 Concevoir les lanceurs et engins spatiaux de manière à limiter la dispersion de composants, aussi bien au moment du lancement que durant leur mission, malgré les conditions extrêmes du milieu spatial.
- 2 Réduire le risque d'explosions en éliminant l'énergie résiduelle des véhicules en fin de vie, un processus connu sous le nom de passivation.
- 3 Éloigner les satellites hors service des engins en activité, soit en les désorbitant, soit en les transférant sur une orbite cimetière.
- 4 Prévenir les collisions en sélectionnant avec précision les trajectoires orbitales et en réalisant des manœuvres d'évitement si nécessaire.

Un défi technologique et financier colossal

Depuis le début de l'exploration spatiale, la quantité de débris en orbite, leur masse totale et l'espace qu'ils occupent ne cessent d'augmenter. La multiplication des fragmentations de satellites et d'étages de lanceurs en orbite aggrave encore cette problématique. [65]

L'étendue des zones occupées par ces débris est un facteur clé, car elle influence directement le risque de collisions futures. À terme, les impacts entre débris et satellites en activité devraient devenir la principale source de nouveaux débris spatiaux, surpassant ainsi les explosions. [65] Les débris spatiaux peuvent provenir de diverses sources, principalement liées aux activités humaines : lancements de fusées, opérations satellitaires et collisions entre objets en orbite. Chaque fragmentation peut ainsi générer des milliers de nouveaux débris, augmentant les risques pour les infrastructures spatiales. [65]



– Figure 5 : Graphique représentant l'évolution de la surface

Le graphique ci-contre montre que les objets envoyés en orbite occupent de la place, tout comme les débris qu'ils créent. Plus la surface occupée par les objets dans l'espace augmente, et plus la probabilité de collision augmente. En rouge (PL) = les satellites ; orange (RB) = les lanceurs et Vert foncé (RM) = objet lié à un lanceur. [65]

Des événements générateurs de débris de plus en plus fréquents

En moyenne, au cours des deux dernières décennies, douze fragmentations accidentelles se sont produites chaque année dans l'espace, et cette tendance est malheureusement à la hausse. Les fragmentations se produisent lorsque des débris sont créés à la suite d'une collision, d'une explosion, d'un problème électrique ou même d'objets se détachant en raison des conditions hostiles de l'espace. [65]

Des risques de collision de plus en plus importants



L'accumulation exponentielle de débris en orbite entraîne une augmentation significative des risques de collision. En se percutant, ces débris génèrent de nouveaux fragments, qui à leur tour provoquent d'autres collisions, créant ainsi un effet boule de neige. Ce phénomène, décrit en 1978 par l'astrophysicien Donald Kessler, est connu sous le nom de syndrome de Kessler : une réaction en chaîne où les collisions successives augmentent continuellement la quantité de débris spatiaux.

Quelle que soit leur taille, ces débris représentent une menace majeure. À des vitesses avoisinant 28 000 km/h en orbite basse, le moindre impact peut causer des dégâts considérables. Par exemple, un fragment d'à peine un centimètre peut avoir l'énergie équivalente à celle d'une voiture roulant à 130 km/h. Ces collisions peuvent endommager, voire détruire, les satellites essentiels à de nombreux services (Internet, télécommunications, observation terrestre, etc.), compromettant également la sécurité des missions spatiales et aggravant la pollution orbitale.

En plus des collisions accidentelles, certaines sont intentionnelles. Le 15 novembre 2021, la Russie a volontairement détruit son satellite obsolète Cosmos 1408 à l'aide d'un missile, générant plus de 1 500 débris orbitaux traçables. Ce type d'action accroît encore davantage les risques liés à la prolifération des débris spatiaux. [37]

Une pollution lumineuse problématique

La multiplication des satellites en orbite basse engendre non seulement un congestionnement spatial, mais perturbe également les observations astronomiques. D'après une étude parue dans *Nature Astronomy*, ces satellites sont responsables d'une pollution lumineuse croissante qui altère significativement le ciel nocturne.

Ce phénomène s'explique par la réflexion de la lumière solaire par les satellites et par les traînées lumineuses laissées par les débris spatiaux. Cette augmentation de la brillance du ciel inquiète la communauté scientifique. Les astronomes alertent :



« La perte de l'obscurité, qui touche même des lieux reculés comme le sommet du K2, les rives du lac Titicaca ou l'île de Pâques, constitue une menace pour l'environnement et notre patrimoine culturel. » Au-delà de cette dégradation visuelle, ces interférences compliquent la détection d'astéroïdes et de météorites, ce qui pourrait limiter notre capacité à anticiper d'éventuelles menaces pour la Terre. [37]

LE SECTEUR AÉRONAUTIQUE



L'aéronautique se trouve aujourd'hui à la croisée de multiples défis, qui vont de la montée en cadence de la production pour répondre à une demande mondiale grandissante, jusqu'à la nécessité de réduire drastiquement son empreinte environnementale. Porté par l'essor des compagnies low cost, l'ouverture de nouveaux marchés régionaux et l'innovation continue de l'industrie, le secteur doit également composer avec des enjeux de recrutement, de digitalisation et d'automatisation toujours plus prégnants.

Dans ce chapitre, nous proposons d'explorer en détail les défis qui façonnent l'avenir de l'aéronautique et des acteurs qui la composent. Des impératifs de décarbonation aux avancées technologiques autour de la propulsion électrique ou hybride, en passant par les mutations organisationnelles liées à la montée en puissance du numérique, chaque enjeu demande des solutions novatrices. Les équipes spécialisées d'ABGi, grâce à leur expertise sectorielle, accompagnent les entreprises de l'aéronautique afin de les aider à anticiper ces transformations et à construire les stratégies d'innovation nécessaires pour maintenir leur compétitivité sur la scène internationale.

L'ENJEU CRUCIAL DE L'AUGMENTATION DES CADENCE DE PRODUCTION FACE À UNE DEMANDE EN PLEIN ESSOR

Le secteur aéronautique connaît une croissance soutenue du trafic aérien, avec une progression annuelle d'environ 6 % depuis 1994, selon le rapport de la Pipame. Cette dynamique est notamment portée par l'essor des pays émergents, la montée en puissance des compagnies low-cost et l'expansion du marché des vols régionaux et moyen-courriers, particulièrement en Asie et en Afrique. En conséquence, les carnets de commandes des constructeurs aéronautiques atteignent des niveaux record, nécessitant une augmentation des cadences de production pour répondre à la demande croissante [31].

— Un objectif ambitieux d'industrialisation accélérée

Face à cette forte demande, l'enjeu majeur à court terme pour les constructeurs est d'augmenter rapidement leurs capacités de production [31]. En 2019, l'objectif fixé était de réduire de moitié le temps de production, passant d'un cycle de huit ans à seulement quatre ans pour la sortie d'un nouvel avion d'usine. Cette accélération de l'industrialisation repose sur une digitalisation accrue des usines, comparable à celle du secteur automobile : robotisation, optimisation des ressources et des flux, capteurs connectés et maintenance prédictive [31].

Au-delà de cette dégradation visuelle, ces interférences compliquent la détection d'astéroïdes et de météorites, ce qui pourrait limiter notre capacité à anticiper d'éventuelles menaces pour la Terre. [37]

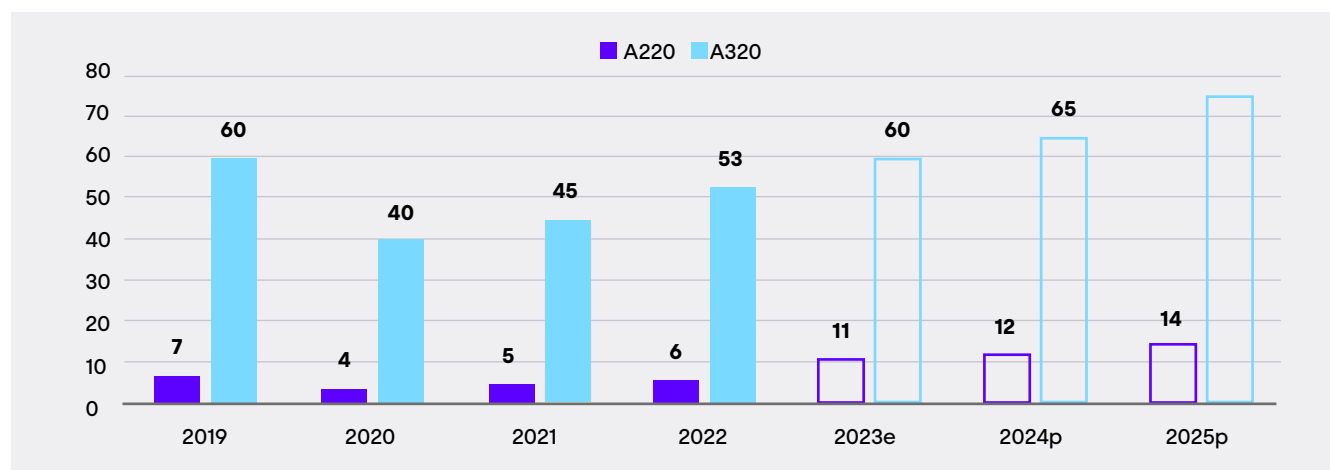
Un des défis majeurs réside donc dans la capacité du secteur à augmenter ses cadences de production tout en maintenant des standards élevés en matière de qualité, conformité et sécurité. L'un des objectifs récurrents consiste à doubler ces cadences en trois ans. Pour y parvenir, l'innovation joue un rôle crucial [2].

— Les contraintes et défis de la montée en cadence

Cependant, ces ambitions de production se heurtent à plusieurs facteurs limitants. La supply chain est confrontée à des difficultés d'approvisionnement, notamment en composants électroniques. De plus, les motoristes peinent à accroître leur cadence, leur écosystème de fournisseurs étant particulièrement complexe et nécessitant une forte coordination [9].

Par ailleurs, le secteur fait face à des défis de recrutement et de pénuries de certains matériaux, ce qui compromet les objectifs de montée en cadence [31].

— L'évolution prévue des cadences chez Airbus



(*) Les niveaux pour la famille A320 en 2024 et 2025 constituent une hypothèse de travail qu'Airbus a soumis à ses fournisseurs et non plus prévision officielle / Traitement Xerfi / Source et prévisions : Airbus Group.

– **Figure 6** : Graphique représentant l'évolutions prévues des cadences de production de monocouloirs d'Airbus Group

Le graphique présenté illustre l'évolution des cadences de production des avions monocouloirs d'Airbus Group, en particulier les modèles A220 et A320, entre 2019 et 2025 (prévisions et hypothèses de travail). [1]

Airbus prévoit une augmentation progressive et significative de la production de ses avions monocouloirs. La famille A320, qui représentait 60 appareils/mois en 2019, pourrait atteindre 75 unités/mois d'ici 2025. De son côté, la production du modèle A220, bien que plus modérée, suivrait également une courbe ascendante, passant de 7 appareils/mois en 2019 à 14 en 2025. [1]

Cette montée en cadence traduit la volonté d'Airbus de répondre à la reprise et à la croissance de la demande post-COVID, tout en consolidant son leadership sur le marché des monocouloirs face à la concurrence, notamment Boeing. [1]



L'augmentation des cadences de production est un enjeu stratégique majeur pour l'aéronautique afin de répondre à une demande en forte hausse, tant pour le transport de passagers que pour le fret aérien.

Toutefois, cette ambition se heurte à des contraintes logistiques, industrielles et économiques, nécessitant une innovation continue, une digitalisation des processus et une meilleure gestion des chaînes d'approvisionnement. Malgré ces défis, les constructeurs comme Airbus poursuivent leur montée en cadence, illustrant leur détermination à soutenir une croissance durable du transport aérien.

TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET DÉCARBONATION

Le secteur aéronautique, soumis à des pressions environnementales croissantes, doit impérativement réduire son empreinte carbone [2]. À moyen terme, son principal défi repose sur la transition écologique, avec pour objectif le développement de solutions innovantes telles que les avions électriques, les avions à hydrogène et les carburants durables.

Actuellement, l'aviation est responsable d'environ 2 % des émissions mondiales de dioxyde de carbone (CO₂), mais cette part pourrait atteindre 16 % d'ici 2050 en l'absence de mesures significatives [31]. Face à ces projections, l'industrie aéronautique se trouve à un tournant décisif, nécessitant des avancées technologiques majeures pour assurer une aviation plus respectueuse de l'environnement.

— Dès 2050, faire décoller l'hybride



– Figure 7 : L'avion électrique Zunum Aero (ZA) [66]

Les initiatives pour des avions plus verts sont en cours. Des avions hybrides, associant réacteurs classiques et batteries, sont en phase de décollage pour de petites tailles. Par exemple, le ZA-10, soutenu par Boeing, un petit avion de 6 à 12 places, entrera en service à horizon 2023 sur de courts trajets. Safran estime la mise en service d'autres avions hybrides de 10 à 19 sièges à horizon 2025. [31] [66]

La propulsion électrique hybride

Plusieurs aéronefs prévoient d'adopter des technologies de micro-hybridation, combinant les moteurs thermiques actuels à de petits moteurs électriques intelligents, à l'image des systèmes « start & stop » largement utilisés dans l'industrie automobile. Dans le secteur aéronautique, cette innovation permet au pilote de mettre en veille l'un des moteurs lors des phases de croisière. Celui-ci peut ensuite être réactivé instantanément à pleine puissance grâce à l'assistance électrique, notamment lors de l'accélération, de l'atterrissage ou en cas de manœuvre d'urgence [58].

Au-delà de cette gestion optimisée de l'énergie, l'hybridation vise à développer des systèmes thermoélectriques plus performants, contribuant directement à la sustentation et à la propulsion de l'aéronef, tout en assurant l'alimentation de ses fonctions non propulsives [58]. Cette approche représente une avancée significative vers une aviation plus efficace et durable.

L'hydrogène, une technologie prometteuse mais encore limitée

Face aux enjeux environnementaux, la décarbonation de l'aviation est devenue une priorité stratégique pour l'ensemble du secteur. Plusieurs solutions technologiques sont envisagées pour réduire les émissions de CO₂, notamment la propulsion hybride électrique et l'utilisation de l'hydrogène [31].

Dans le cadre du plan de soutien du gouvernement français, l'industrie aéronautique a présenté plusieurs concepts d'avions propulsés à l'hydrogène. Ce programme, soutenu par un investissement de 15 milliards d'euros, vise le lancement d'un avion vert à hydrogène d'ici 2035 [58].



Toutefois, malgré son potentiel en tant que carburant propre, l'hydrogène pose des contraintes majeures, notamment en termes de stockage et de remplissage. Il doit être liquéfié et transporté sous cette forme jusqu'aux aéroports, ce qui en limite l'utilisation aux petits aéronefs dans un premier temps. Pour les avions commerciaux de 150 places, qui entreront en service dans les années 2030, la propulsion hybride électrique apparaît comme l'option la plus viable à court terme, tandis que l'hydrogène pourrait être intégré aux appareils de cette taille à plus long terme [58].

Pour en savoir plus, veuillez consulter notre article sur « la production de l'hydrogène vert et son avenir dans le transport » disponible [ici](#).

Les limites actuelles des avions entièrement électriques

Si l'électrification partielle est une avancée majeure, la propulsion 100 % électrique pour les gros avions commerciaux reste un défi. Les batteries actuelles sont encore trop peu denses en énergie : pour faire voler un A320 sur la moitié de sa charge utile, il faudrait des batteries 30 fois plus performantes et la portée serait réduite de cinq fois par rapport à un avion conventionnel [31].

La transition vers une aviation plus propre repose sur une combinaison de technologies. À court et moyen terme, la propulsion hybride électrique représente une alternative crédible pour réduire l'empreinte carbone du secteur.

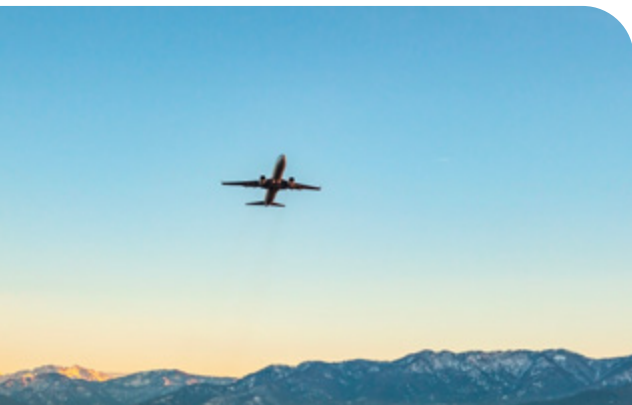
L'hydrogène, bien que prometteur, reste une solution plus lointaine en raison de ses contraintes techniques. En parallèle, l'aviation 100 % électrique est encore limitée aux petits appareils et aux taxis volants, en attendant des avancées majeures dans le stockage énergétique.



— Du biocarburant comme alternative

L'impact environnemental de l'aviation est une préoccupation croissante, notamment en raison des émissions de gaz à effet de serre, principalement le dioxyde de carbone (CO₂), qui contribuent significativement au réchauffement climatique [8]. Face à cette problématique, l'industrie aéronautique explore plusieurs solutions visant à réduire son empreinte carbone, en intégrant notamment des carburants alternatifs et des technologies plus propres.

L'intégration des biocarburants pour réduire les émissions



Pour limiter leur impact environnemental, certaines compagnies aériennes ont commencé à incorporer des biocarburants dans leurs mélanges de carburants traditionnels. Ces carburants, fabriqués à partir de matières premières renouvelables comme les plantes et les algues, permettent de réduire les émissions de CO₂ par rapport au kérosène conventionnel [8].

Toutefois, la production et l'adoption à grande échelle de ces biocarburants restent des défis en raison de contraintes économiques et logistiques. Le développement de solutions complémentaires est donc essentiel pour atteindre une aviation plus durable.

Le gaz naturel liquéfié (GNL) comme solution de transition

Selon Thierry Dubois, chef du bureau français d'Aviation Week, l'utilisation du gaz naturel liquéfié (GNL) constitue une alternative viable à court et moyen terme pour réduire l'empreinte carbone du secteur aéronautique [67]. Comparé au kérosène Jet-A1 conventionnel, le GNL permet de réduire les émissions de CO₂ de 25 à 30 %, bien que des mesures précises en conditions réelles restent nécessaires [68].

En plus de cette diminution du CO₂, le GNL présente d'autres avantages environnementaux. Selon TGE Gas Engineering, une entreprise allemande ayant publié une étude en 2019, son utilisation permet de :

- 1 Réduire de 80 % les émissions d'oxydes d'azote (NO₂) ;
- 2 Éliminer les émissions de suie, de soufre et de composés aromatiques ;
- 3 Diminuer la formation de traînées de condensation ;
- 4 Optimiser la consommation de carburant : un vol théorique entre Munich et New York nécessiterait 47 tonnes de GNL, contre 55 tonnes de Jet-A1 [67].

Vers des solutions plus durables à long terme

Bien que le GNL représente une alternative intéressante, son adoption nécessite des changements d'infrastructure majeurs, notamment pour son stockage et sa distribution dans les aéroports. Pour une solution plus durable, la transition énergétique pourrait à terme reposer sur la biomasse ou sur un processus de conversion d'énergie en gaz permettant de produire un carburant similaire au GNL, mais issu de sources renouvelables [67].



Face aux défis environnementaux, l'industrie aéronautique explore diverses solutions pour réduire son empreinte carbone. Si les biocarburants et le GNL offrent des alternatives prometteuses à court et moyen terme, des efforts supplémentaires en matière d'innovation et d'infrastructure seront nécessaires pour adopter des solutions plus durables et généralisables à long terme.

LA DIGITALISATION

La digitalisation est un enjeu majeur car elle permet de réduire les erreurs, d'accélérer les temps de cycle de développement et d'œuvrer dans un univers virtuel maîtrisé [2]. Elle contribue également à une meilleure planification de la production et à la maîtrise de la qualité, tout en ouvrant la voie à une éco-conception des produits en faveur de la durabilité [2]. Elle est tout autant importante pour l'aéronautique que pour le spatial.

— Digitalisation et optimisation industrielle

L'automatisation et la digitalisation des usines, inspirées du secteur automobile, sont aujourd'hui considérées comme essentielles pour accélérer la production et améliorer la compétitivité du secteur aéronautique. Elles intègrent des technologies avancées telles que la robotisation, l'optimisation des ressources et des flux, l'utilisation de capteurs intelligents et la maintenance prédictive [38][31].

Un outil clé pour une aviation plus durable

La transformation digitale ne se limite pas à une simple amélioration de la productivité : elle est aussi un facteur de durabilité. Elle permet de :



Accélérer le développement de nouvelles technologies, en réduisant les erreurs dès la phase de conception ;



Diminuer les cycles de développement en simulant et testant virtuellement des innovations technologiques en toute sécurité ;



Faciliter la montée en cadence de la production, tout en garantissant une maîtrise optimale de la qualité [2].

Une révolution pour l'ensemble de la chaîne de valeur



Cette évolution ne concerne pas uniquement les fabricants d'avions (OEM), mais également l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement. À long terme, la digitalisation facilitera l'intégration des principes d'économie circulaire, favorisant ainsi une éco-conception des aéronefs. Jusqu'à présent, la priorité industrielle reposait sur un compromis entre qualité et coûts. Désormais, une troisième dimension, la durabilité, doit être intégrée. La transformation numérique permet d'optimiser cette équation en offrant une visibilité accrue sur l'empreinte carbone des produits [2].

Valoriser le potentiel humain et renforcer l'attractivité du secteur

Outre les bénéfices environnementaux et industriels, la digitalisation offre un espace de liberté et de créativité accru pour les ingénieurs et techniciens. En automatisant les tâches répétitives et à faible valeur ajoutée, elle permet d'exploiter pleinement le potentiel humain en faveur d'une innovation plus durable.

Cette transformation doit également renforcer l'attractivité de l'industrie aéronautique, dans un contexte où le secteur fait face à une pénurie de talents. En proposant un environnement de travail plus innovant et stimulant, le digital joue un rôle clé dans l'évolution des métiers et le développement des compétences pour répondre aux défis de demain [2].



La digitalisation est bien plus qu'un simple levier d'optimisation : elle est un élément central de la transformation durable du secteur aéronautique. En améliorant la productivité, la qualité et la durabilité, elle permet non seulement d'accélérer l'innovation technologique, mais aussi de réduire l'empreinte environnementale de l'aviation, tout en valorisant les talents et le potentiel humain.

— La digitalisation du parcours passager en plein essor

L'essor de la digitalisation du parcours passager dans l'aviation

La transformation numérique du secteur aérien, en particulier dans l'optimisation du parcours passager, connaît une accélération majeure. Malgré un ralentissement temporaire des investissements informatiques dû à la crise du COVID-19, la période post-crise marque une relance significative des initiatives numériques visant à améliorer l'expérience des voyageurs.

En 2022, environ 84 % des compagnies aériennes et 81 % des aéroports prévoyaient d'augmenter ou de maintenir leurs dépenses en digitalisation, notamment pour l'automatisation du traitement des passagers. L'objectif principal de ces investissements est de renforcer l'efficacité opérationnelle, la fluidité du parcours voyageur et la sécurité sanitaire. [69]

L'optimisation des flux passagers grâce au suivi en temps réel

Afin de garantir un parcours fluide tout en optimisant la gestion des ressources, de nombreux aéroports et compagnies aériennes déploient des solutions de suivi des flux de passagers, appelées «passenger flow monitoring». Ces outils s'appuient sur des capteurs et des technologies de surveillance pour suivre en temps réel les flux de voyageurs au sein des infrastructures. Ils permettent aux équipes opérationnelles d'anticiper et de gérer les pics d'affluence grâce à l'analyse des données passées et aux algorithmes de machine learning.

En moyenne, un voyageur doit présenter ses documents d'identité cinq fois au cours de son parcours (enregistrement, contrôle de sécurité, police aux frontières, embarquement, contrôle des passeports à destination). Chaque étape représente un point de congestion potentiel.



Selon une étude de l'IATA réalisée en 2019, 70 % des passagers seraient prêts à partager leurs données biométriques en échange d'une expérience de voyage plus fluide. C'est pourquoi plusieurs aéroports et compagnies testent déjà l'authentification biométrique pour accélérer le processus. [70]

La reconnaissance biométrique, un outil au service de la fluidité

L'identification biométrique, reposant sur la reconnaissance faciale et les empreintes digitales, est en train de devenir un standard dans les aéroports du monde entier. Aux États-Unis, Delta Airlines permet à ses passagers d'utiliser ces technologies dans certains aéroports. Des systèmes similaires sont déployés en Chine, au Japon (Tokyo), au Qatar et en Inde.

Selon BusinessTraveler, « dans cinq ans, il sera probablement plus facile de dire où vous ne trouverez pas de systèmes de reconnaissance faciale que l'inverse ».

En France, Paris Aéroport (ADP) et Vinci Airports expérimentent ces solutions pour accélérer l'enregistrement et l'embarquement. Concrètement, lors du dépôt des bagages, une caméra capture le visage du passager, et le logiciel compare ses traits avec les données du passeport. Ainsi, le voyageur n'a plus besoin de présenter son passeport ou sa carte d'embarquement lors des étapes suivantes : enregistrement des bagages, contrôle de sûreté et embarquement. Une fois l'avion décollé, les données sont immédiatement supprimées afin de garantir la confidentialité des informations. [70]

Les défis juridiques et réglementaires

Bien que prometteuse, la généralisation de la reconnaissance faciale reste complexe, notamment en raison de l'absence d'un cadre juridique spécifique en France. À ce jour, aucune réglementation nationale ou européenne ne permet un déploiement généralisé de cette technologie. Il faudra donc attendre l'évolution du cadre réglementaire européen avant d'envisager une adoption à grande échelle

La digitalisation du parcours passager représente un levier majeur d'innovation pour l'industrie aérienne. Grâce aux solutions de suivi des flux en temps réel et aux technologies biométriques, les aéroports et compagnies aériennes peuvent optimiser l'efficacité opérationnelle tout en offrant aux voyageurs une expérience plus fluide et plus sécurisée.

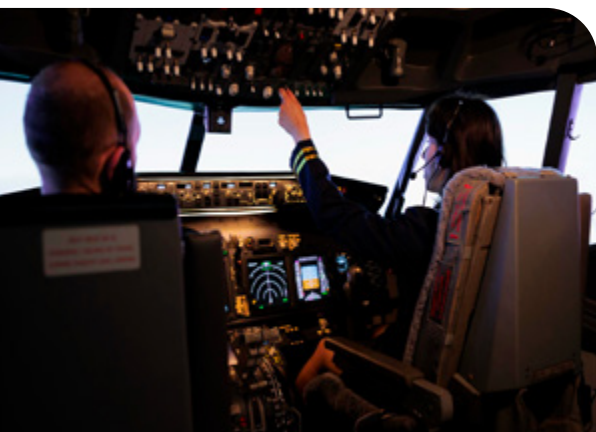
Toutefois, la protection des données et l'encadrement réglementaire restent des enjeux clés pour assurer une adoption responsable et généralisée de ces innovations.



— L'automatisation du pilotage

L'innovation est au cœur du secteur aéronautique, et l'un des défis majeurs à long terme concerne l'automatisation du pilotage. Grâce aux avancées en intelligence artificielle et en systèmes autonomes, cette transformation vise à optimiser l'efficacité des opérations aériennes tout en réduisant les coûts d'exploitation pour les compagnies aériennes.

Vers une réduction de l'équipage de bord



Actuellement, le pilotage des avions repose sur la présence d'au moins deux pilotes à bord. Toutefois, d'ici 2030, l'intelligence artificielle pourrait permettre une réduction progressive de l'équipage en facilitant le roulage, le décollage et l'atterrissage de manière autonome [31].

Sur les tarmacs de Toulouse, un programme de roulage, décollage et atterrissage autonome est testé par Airbus. En 2023, le projet Single Pilot Operation a été présenté aux futurs clients pour les vols longs courriers. [31] Parallèlement, des équipementiers comme Thalès travaillent activement au développement des solutions innovantes de pilotage automatique certifiées par la FAA et l'EASA, utilisées sur différentes plateformes, y compris des avions commerciaux. [71]

Une réponse aux enjeux économiques du secteur

La réduction du nombre de pilotes constitue également un levier d'optimisation financière pour les compagnies aériennes. Selon Air France, environ 30 % des pilotes perçoivent un salaire brut de 200 000 euros par an (chiffres de juin 2019) [31].

D'après la banque UBS, à plus grande échelle, l'automatisation du pilotage pourrait générer des économies significatives :

15

milliards de dollars d'économies pour
un équipage réduit à un seul pilote

35

35 milliards de dollars d'économies
pour un avion entièrement autonome [31]

Toutefois, si ces évolutions offrent des opportunités financières majeures, elles suscitent également des interrogations et des résistances.

Réticences des passagers face aux avions autonomes

Malgré les perspectives économiques et technologiques, l'acceptation du public demeure un enjeu central. Selon un sondage UBS, 63 % des personnes interrogées refuseraient de monter à bord d'un avion entièrement autonome [38][31].

Cette réticence repose sur plusieurs facteurs :

- 1 • Un manque de confiance dans les systèmes autonomes, notamment en cas d'urgence
- 2 • La peur d'une perte de contrôle humaine sur des appareils transportant des centaines de passagers
- 3 • Le besoin de garanties en matière de cybersécurité et de fiabilité des systèmes

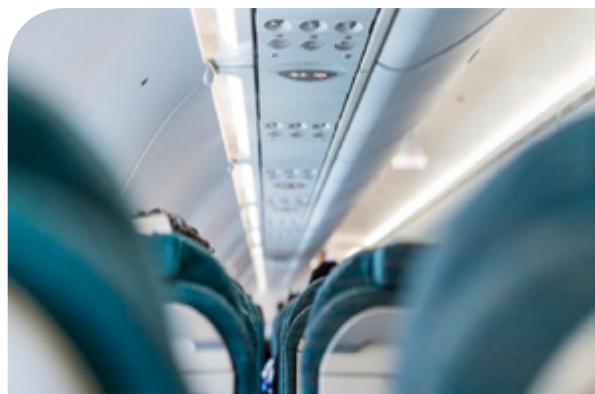
Ainsi, au-delà des avancées techniques, un travail important devra être mené pour rassurer les passagers, les compagnies aériennes et les régulateurs.

L'impact sur les métiers de l'aéronautique

L'automatisation et la digitalisation ne transforment pas seulement le mode de pilotage, elles redéfinissent également les compétences et les emplois du secteur.

L'émergence de l'intelligence artificielle dans l'aéronautique impose de préparer la «Workforce of the Future», en formant des ingénieurs et techniciens capables de travailler avec ces nouvelles technologies [2].

L'objectif est de créer un environnement de travail plus innovant, où l'automatisation des tâches répétitives libère du temps pour la créativité et la gestion des opérations complexes.



L'automatisation du pilotage représente un tournant majeur pour l'aéronautique, avec des bénéfices économiques et opérationnels indéniables. La réduction du nombre de pilotes, rendue possible par l'intelligence artificielle et les technologies autonomes, pourrait générer des économies substantielles pour les compagnies aériennes.

Cependant, plusieurs défis restent à relever. L'acceptabilité par les passagers, la fiabilité des systèmes et l'évolution des métiers de l'aéronautique seront des enjeux clés pour assurer une transition réussie vers cette nouvelle ère du pilotage autonome.



MAINTENIR LE CAP FACE AUX ENJEUX MONDIAUX

Dans un contexte de concurrence mondialisée, l'aéronautique doit sans cesse innover pour conserver une longueur d'avance. L'accélération du trafic aérien, notamment portée par le développement des pays émergents et l'essor des compagnies low-cost, se conjugue à des pressions environnementales et réglementaires croissantes. Les entreprises du secteur doivent ainsi faire preuve de réactivité face aux évolutions technologiques et géopolitiques, tout en poursuivant leurs objectifs de décarbonation.

— Croissance du trafic aérien

Le trafic aérien mondial connaît une croissance soutenue, portée par plusieurs dynamiques majeures. Le développement des économies émergentes et la montée en puissance des compagnies low-cost favorisent l'accès au transport aérien pour un nombre croissant de passagers. En parallèle, l'essor du marché des vols régionaux, notamment en Asie et en Afrique, contribue à accélérer cette tendance [38][31].

Un doublement du trafic mondial attendu d'ici 2037



Selon l'Association du transport aérien international (IATA), le trafic aérien mondial devrait doubler au cours des douze prochaines années, pour atteindre 8,2 milliards de passagers en 2037 [72]. Cette croissance s'inscrit dans une dynamique de reprise après la crise du COVID-19, avec un retour progressif aux tendances de croissance pré-pandémie.

L'année 2024 a marqué un tournant important pour l'aviation. Après l'effet de «voyage revanche» observé dans la période post-COVID, le secteur retrouve un rythme de croissance plus stable, oscillant entre 8 % et 2 % par an, selon les zones géographiques. Si le cap des 5 milliards de passagers devrait être franchi en 2025, un jalon symbolique a été atteint en 2024 : 100 milliards de passagers transportés depuis l'entrée en vigueur de la Convention de Chicago en 1947, qui régit le secteur aérien [73].

Une croissance durable malgré des défis régionaux

Cette reprise est générale et durable, y compris en Europe, malgré un contexte marqué par des incertitudes économiques et réglementaires. Selon les dernières prévisions d'Eurocontrol, le trafic aérien en Europe devrait croître de 52 % d'ici 2050, avec une hypothèse haute à +78 % et une hypothèse basse à +20 %. Concrètement, cela représenterait 15,4 millions de vols annuels en 2050, soit plus de 42 000 vols quotidiens, contre 28 000 actuellement [73].

Des répercussions majeures sur l'industrie aéronautique

L'augmentation continue du trafic aérien a des conséquences directes sur l'ensemble de la filière aéronautique.

- 1 Pression sur la production d'aéronefs : La demande croissante en avions oblige les constructeurs et leurs sous-traitants à accélérer les cadences de production tout en poursuivant les innovations technologiques pour répondre aux besoins du marché.
- 2 Adaptation des infrastructures : Les aéroports et les systèmes de gestion du trafic aérien doivent s'adapter pour absorber le flux croissant de passagers et de vols, nécessitant des investissements massifs dans les infrastructures et la modernisation des équipements.
- 3 Enjeux environnementaux accrus : La croissance du trafic intensifie la pression sur le secteur pour limiter son empreinte carbone. Cela pousse les acteurs de l'aviation à développer des solutions plus durables, notamment à travers l'usage de carburants alternatifs, d'avions plus efficaces et de technologies réduisant la pollution sonore.



Le trafic aérien mondial est engagé dans une croissance structurelle, soutenue par des dynamiques économiques et technologiques.

Cette expansion représente une opportunité majeure pour l'industrie aéronautique, tout en posant des défis en matière d'infrastructures et d'impact environnemental. Les prochaines décennies seront déterminantes pour concilier développement du transport aérien et transition écologique, dans un secteur en constante évolution.

— Adaptation aux évolutions technologiques

Les défis techniques, les trajectoires de décarbonation, l'évolution des usages et les bouleversements géopolitiques obligent le secteur à s'adapter en permanence pour répondre aux besoins du marché tout en respectant les contraintes environnementales et réglementaires.

Le secteur aéronautique doit aujourd'hui faire face à des défis variés : réduction de l'empreinte carbone, pression concurrentielle croissante et mutations géopolitiques. Pour maintenir sa compétitivité et répondre aux attentes du marché, il est contraint d'innover en permanence, aussi bien sur le plan technologique que dans l'organisation de ses activités.

Adaptation du secteur aéronautique

L'industrie aéronautique est en pleine mutation, portée par des avancées technologiques majeures. L'optimisation des processus de production, la transformation numérique des chaînes d'approvisionnement et le développement de nouveaux aéronefs permettent d'améliorer l'efficacité, la flexibilité et la durabilité du secteur.

Modernisation de la production : l'essor de l'Industrie du Futur

L'Industrie du Futur (IDF), ou Industrie 4.0, révolutionne la conception et la fabrication des avions en intégrant l'automatisation, l'intelligence artificielle (IA) et des systèmes interconnectés. Airbus, par exemple, a inauguré en 2019 sa première «Usine du Futur» à Hambourg, où les tâches répétitives sont désormais effectuées par des robots, permettant ainsi une réduction des erreurs et une amélioration de la productivité. L'utilisation de capteurs connectés et de l'analyse de données en temps réel facilite la surveillance des opérations de production et optimise la gestion des flux industriels [74].

Optimisation des chaînes d'approvisionnement et de la conception

La digitalisation transforme également les chaînes d'approvisionnement et la gestion des composants. Grâce à la Supply Chain 4.0, qui repose sur des technologies comme la blockchain, l'IA et l'Internet des Objets (IoT), les constructeurs peuvent améliorer la traçabilité des pièces, renforcer la transparence et minimiser les erreurs de production.



Par ailleurs, l'utilisation de jumeaux numériques permet de modéliser un aéronef ou une chaîne de production en environnement virtuel avant même son lancement. Ces modèles numériques facilitent la simulation et l'optimisation des processus, réduisant ainsi les coûts et les délais de mise en service. Cette approche améliore également la maintenance prédictive en identifiant les pannes potentielles avant qu'elles ne surviennent, garantissant ainsi une plus grande fiabilité des avions [74].

Innovation technologique et transition écologique des aéronefs

L'innovation technologique ne se limite pas à la production, elle impacte directement la conception des avions. Airbus et Boeing développent des appareils à faible consommation énergétique, exploitant des matériaux composites plus légers et des moteurs de nouvelle génération. L'A350 d'Airbus et le Boeing 787 Dreamliner illustrent cette évolution avec leur structure en fibre de carbone, qui permet d'améliorer l'efficacité énergétique et de réduire les émissions de CO₂.

Dans une optique de transition écologique, les constructeurs travaillent également sur des projets d'avions hybrides et à hydrogène, afin d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. Ces innovations reposent sur le développement de carburants durables, l'amélioration des performances aérodynamiques et l'intégration de systèmes électriques avancés [75].

Transformation des compétences et nouvelles exigences du marché du travail

L'essor des technologies intelligentes impose une évolution des métiers de l'aéronautique. L'automatisation et la digitalisation modifient les compétences requises, avec un besoin croissant en ingénierie des données, cybersécurité et gestion des systèmes autonomes. Les entreprises investissent dans la formation continue pour permettre aux équipes de s'adapter aux nouvelles exigences technologiques et de maximiser l'efficacité des nouveaux outils industriels.



L'adaptation du secteur aéronautique aux évolutions technologiques repose sur une digitalisation accrue, l'intégration des systèmes autonomes et l'optimisation des chaînes de production. Ces transformations, bien que complexes, ouvrent la voie à une aviation plus performante, résiliente et durable, répondant aux défis de demain tout en maintenant des standards élevés en matière d'efficacité et d'impact environnemental.

LES AIDES ET SUBVENTIONS



LES ENJEUX DU FINANCEMENT DANS LES SECTEURS AÉRONAUTIQUE ET SPATIAL

L'innovation dans les secteurs aéronautique et spatial est un moteur essentiel du développement technologique et économique. Cependant, le coût élevé de la recherche et du développement constitue un défi majeur pour les entreprises et institutions qui souhaitent se positionner sur ces marchés stratégiques. Face à cette réalité, de nombreux dispositifs de financement ont été mis en place par des organisations publiques et privées afin de soutenir la compétitivité des acteurs du domaine. Ce livre blanc vise à explorer ces opportunités de financement, en mettant en lumière les principaux appels à projets et programmes d'aides accessibles aux entreprises et aux institutions de recherche en France et en Europe.

L'accès aux financements publics et privés permet aux entreprises et centres de recherche d'innover en réduisant les risques financiers liés aux investissements dans des technologies de pointe. Dans le domaine spatial, les avancées en matière de services en orbite, de réduction des débris spatiaux et de maintenance des infrastructures spatiales nécessitent des investissements considérables. De même, l'aéronautique est confrontée à des défis technologiques et environnementaux, notamment l'amélioration de l'efficacité énergétique des avions et le développement de nouvelles solutions de propulsion plus durables.

Pour répondre à ces enjeux, plusieurs institutions comme le CNES, l'ESA et la Commission Européenne mettent en place des dispositifs de financement dédiés. Ces dispositifs, sous forme d'appels à projets, permettent de soutenir des initiatives innovantes dans divers domaines, allant des systèmes orbitaux à la robotique spatiale, en passant par les solutions de transport et la cybersécurité.

LES PRINCIPAUX DISPOSITIFS DE FINANCEMENT

Institution	Nom du programme	Lien	Deadline
CNES	Appel à idées R&T	Appel à idées R&T	Not specified
	Appel à idées « Services en orbite »	Services en orbite	15/10/2024
	Appel à idées « Innovations du Transport Spatial »	Appel à idées «Innovations du Transport Spatial»	30/09/2024
	Appel à idées GSTP	AAI GSTP	31/12/2024
EUSPA	Récepteurs de synchronisation Galileo mettant en œuvre les normes CEN/CENELEC	Galileo Timing receivers implementing CEN/CE-NELEC standards	28/10/2024
	Mise en œuvre de signaux quasi-pilot G2G	Grants EU Agency for the Space Programme	14/04/2024
	Balises de détresse 406 MHz avec fonctions étendues de liaison retour Galileo	Grants EU Agency for the Space Programme	30/04/2024
ESA	Kick-starter : Espace pour une industrie pharmaceutique durable	Espace pour une industrie pharmaceutique durable	03/11/2024
	Kick-starter : Solutions basées sur la nature	Solutions basées sur la nature	20/11/2024
	Espace pour l'électromobilité	Espace pour l'électromobilité	29/11/2024
	Espace pour la protection des enfants	Espace pour la protection des enfants	06/11/2024
	Applications commerciales de la robotique spatiale : maritime et marine	Applications commerciales de la robotique spatiale : maritime et marine	23/11/2024
	Espace pour les infrastructures	Espace pour les infrastructures	01/12/2024
	Espace pour une foresterie durable	Espace pour une foresterie durable	Not specified
	Décarbonisation du transport maritime	Décarbonisation du transport maritime	28/02/2025
	Espace pour les Jeux Olympiques	Espace pour les Jeux Olympiques	31/12/2025
UE	Clean Aviation 3	Clean Aviation	Not specified
	Fonds européen de défense : EDF-2024-DA-EUCI	EDF-2024-DA-EUCI	05/11/2024
	Fonds européen de défense: Appel à manifestation d'intérêt - EU Space ISAC	Call for Expressions of Interest - EU Space ISAC	31/10/2024
	Fonds européen de défense: Démonstration/validation en orbite	In Orbit Demonstration/Validation	15/03/2025
	Fonds européen de défense: Forme d'onde sécurisée pour les communications par satellite EDF-2024-DA-SPACE-EPW-STEP	Secure waveform for satellite communications EDF-2024-DA-SPACE-EPW-STEP	05/11/2024
	Fonds européen de défense: Analyse d'images satellitaires multi-sources - Participation à un défi technologique EDF-2024-LS-RA-CHALLENGE-SPACE-MSIAP	Multi-source satellite image analysis – Participation in a technological challenge EDF-2024-LS-RA-CHALLENGE-SPACE-MSIAP	05/11/2024
	Fonds européen de défense: Analyse d'images satellitaires multi-sources - Organisation d'un défi technologique EDF-2024-LS-RA-CHALLENGE-SPACE-MSIAO	Multi-source satellite image analysis – Organisation of a technological challenge EDF-2024-LS-RA-CHALLENGE-SPACE-MSIAO	05/11/2024
	Horizon Europe : Développer et déployer un réseau de gravimètres quantiques en Europe HORIZON-CL4-2024-DIGITAL-EMERGING-02-01	Developing and deploying a network of quantum gravimeters in Europe HORIZON-CL4-2024-DIGITAL-EMERGING-02-01	17/10/2024
	EIC Pathfinder : Renforcer la durabilité et la résilience des infrastructures spatiales de l'UE HORIZON-EIC-2024-PATHFINDERCHALLENGES-01-05	Strengthening the sustainability and resilience of EU space infrastructure HORIZON-EIC-2024-PATHFINDERCHALLENGES-01-05	16/10/2024
	HORIZON-CL4-2025-02-SPACE • Digital solutions for autonomy for space transportation systems • ISOS Pilot Mission Detailed Design • Earth Observation and Satellite telecommunication • Copernicus • Space Critical Equipment	Publication à venir	13/11/2025

Ce tableau recense divers appels à projets (AAP) et initiatives liés au domaine spatial, émis par plusieurs institutions européennes et internationales. Il met en évidence les opportunités de financement et d'innovation dans des secteurs variés, notamment la recherche et technologie, les services en orbite, la mobilité, la durabilité et la sécurité.

- **CNES (Centre National d'Études Spatiales)** propose plusieurs appels à idées portant sur la recherche et technologie (R&T), les services en orbite et l'innovation dans le transport spatial, ainsi que des initiatives spécifiques via l'AAI GSTP.
- **EUSPA (Agence de l'Union européenne pour le programme spatial)** se concentre sur les récepteurs Galileo et leur compatibilité avec les normes CEN/CENELEC.
- **ESA (Agence Spatiale Européenne)** met l'accent sur des applications spatiales pour des secteurs variés tels que l'industrie pharmaceutique, la foresterie durable, l'électromobilité, la protection des enfants, les infrastructures et la décarbonisation du transport maritime. Elle soutient également l'intégration de solutions spatiales pour les Jeux Olympiques et l'industrie maritime et marine.
- **L'Union Européenne (UE)** propose plusieurs initiatives couvrant des domaines comme l'aviation propre (Clean Aviation 3), la démonstration et validation en orbite, les communications satellitaires sécurisées, et le développement d'une infrastructure spatiale résiliente. Elle soutient également des défis technologiques et le développement d'un réseau de gravimètres quantiques en Europe.
- **HORIZON Europe**, à travers divers appels, encourage le développement technologique et la résilience des infrastructures spatiales de l'UE, notamment via des projets émergents et des défis du programme Pathfinder.

Ces initiatives reflètent une volonté commune de promouvoir l'innovation spatiale, de renforcer l'autonomie stratégique de l'Europe et d'explorer de nouvelles applications des technologies spatiales dans des secteurs variés.

CONCLUSION

L'innovation dans les secteurs aéronautique et spatial est un enjeu majeur pour l'avenir technologique et économique de l'Europe. Grâce aux différents dispositifs de financement mis en place par le CNES, l'ESA et l'Union Européenne, les entreprises et centres de recherche peuvent bénéficier d'un soutien crucial pour développer des solutions de pointe et répondre aux défis stratégiques de demain.

Toutefois, obtenir ces financements nécessite une préparation rigoureuse et une bonne compréhension des critères d'éligibilité. Dans les chapitres suivants, nous explorerons les meilleures pratiques pour maximiser les chances de succès lors des candidatures aux appels à projets et analyserons plusieurs études de cas illustrant des réussites emblématiques dans ces domaines.

LE FOCUS DE LA POLOGNE ET DU PARTENARIAT ESA



L'Agence spatiale européenne (ESA) est une organisation intergouvernementale établie par la Convention signée à Paris le 30 mai 1975. Sa mission est de mettre en œuvre un programme européen commun pour l'exploration et l'utilisation de l'espace extra-atmosphérique. L'Agence soutient également le développement d'une industrie moderne et compétitive dans les États membres.

Les pays suivants sont membres de l'ESA : Autriche, Belgique, République tchèque, Danemark, Estonie, Finlande, France, Grèce, Espagne, Irlande, Luxembourg, Pays-Bas, Allemagne, Norvège, Pologne, Portugal, Roumanie, Suisse, Suède, Royaume-Uni, Hongrie et Italie. La Slovaquie, la Slovénie, la Lituanie et la Lettonie sont membres associés de l'ESA. Dans le cadre d'un accord distinct, le Canada, la Bulgarie, la Croatie, Chypre et Malte participent également aux activités de l'ESA.

LA MISSION

L'ESA a été créée dans le but premier de mettre en commun les ressources et l'expertise des pays européens afin d'être compétitif dans l'industrie spatiale mondiale. Elle est issue de l'Organisation européenne pour le développement des lanceurs (ELDO) et de l'Organisation européenne de recherche spatiale (ESRO). L'agence a pour mission l'exploration et l'utilisation pacifiques de l'espace extra-atmosphérique au profit de l'humanité tout entière.

STRUCTURE ET FINANCEMENT DE L'ESA

La structure organisationnelle de l'ESA est conçue pour promouvoir l'efficacité et la collaboration. L'agence est dirigée par le Conseil, qui se compose de représentants de chaque État membre. Ce Conseil est chargé de définir les politiques et d'approuver le budget, ce qui garantit que tous les États membres ont leur mot à dire dans l'orientation de l'agence. L'ESA est financée par ses États membres, les contributions étant basées sur le produit national brut (PNB) de chaque pays. Ce modèle de financement collaboratif permet à l'ESA d'entreprendre des projets ambitieux qui pourraient être hors de portée des nations individuelles.

PRINCIPALES RÉALISATIONS

L'une de ses réalisations les plus remarquables est le développement de la famille de fusées Ariane. Le programme Ariane, lancé dans les années 1970, a fourni des services de lancement fiables et rentables pour toute une série de missions. Ariane 5, en particulier, a permis de lancer de nombreux satellites commerciaux et missions scientifiques.

En 2004, l'ESA a fait la une des journaux en réussissant l'atterrissage de la sonde Huygens sur Titan, la plus grande lune de Saturne. Cet exploit s'inscrivait dans le cadre de la mission Cassini-Huygens, une collaboration avec la NASA et l'Agence spatiale italienne (ASI). Les données recueillies par Huygens ont permis de mieux comprendre l'atmosphère et la surface de Titan, révélant un monde similaire à celui de la Terre primitive.



Dans le domaine de l'observation de la Terre, la principale réalisation est le programme Copernicus, une initiative phare pour la surveillance de l'environnement et du climat. Lancé en partenariat avec la Commission européenne, Copernicus consiste en une série de satellites appelés Sentinelles. Ces satellites fournissent des données essentielles pour un large éventail d'applications, notamment la surveillance du changement climatique, la gestion des catastrophes et la planification agricole. Les données collectées par les satellites sont disponibles gratuitement et sont constamment utilisées pour développer des produits spatiaux innovants.

PROGRAMMES D'EXPLORATION SPATIALE

L'ESA gère divers programmes de financement destinés à soutenir ses objectifs en matière d'exploration spatiale et de développement technologique. L'un des principaux mécanismes de financement est le programme obligatoire, financé par les contributions des États membres basées sur leur produit national brut (PNB). Ce programme couvre le budget général, y compris les coûts administratifs, l'infrastructure de base et certaines activités fondamentales telles que le programme scientifique. Le programme scientifique est au cœur de la mission de l'ESA, permettant la recherche fondamentale et les missions exploratoires qui améliorent notre compréhension de l'univers. Grâce à ce programme, l'ESA a pu lancer des missions telles que Gaia (pour créer une carte tridimensionnelle des étoiles de la Voie lactée) et Rosetta (pour suivre et éventuellement atterrir à la surface d'une comète), qui ont contribué de manière significative à notre connaissance de l'espace.



Outre les contributions obligatoires, l'ESA gère également des programmes facultatifs, financés par les États membres sur une base volontaire. Ces programmes permettent aux pays d'investir dans des projets spécifiques qui correspondent à leurs intérêts et priorités nationaux. Parmi les programmes optionnels, on peut citer le programme EOEP (Earth Observation Envelope Program), qui finance des missions telles que les satellites Copernicus, et le programme de vols habités, qui soutient les contributions de l'ESA à la Station spatiale internationale (ISS) et aux futures missions avec équipage.

La stratégie de financement de l'ESA comprend également des partenariats avec l'industrie et d'autres agences spatiales internationales. Grâce à des initiatives telles que le modèle de partenariat public-privé (PPP), l'ESA collabore avec des entités commerciales pour partager la charge financière et les risques associés aux missions spatiales. Ce modèle a été particulièrement fructueux pour le développement des satellites de télécommunications et des lanceurs Ariane.

La stratégie de financement de l'ESA comprend également des partenariats avec l'industrie et d'autres agences spatiales internationales. Grâce à des initiatives telles que le modèle de partenariat public-privé (PPP), l'ESA collabore avec des entités commerciales pour partager la charge financière et les risques associés aux missions spatiales. Ce modèle a été particulièrement fructueux pour le développement des satellites de télécommunications et des lanceurs Ariane.

En outre, la coopération de l'ESA avec des partenaires mondiaux, notamment la NASA, Roscosmos et la CNSA (China National Space Administration), implique souvent des accords de partage des coûts qui permettent des missions plus ambitieuses telles que Cassini-Huyghens (mission ESA-NASA pour l'atterrissage sur la lune de Saturne), ExoMars (mission ESA-Roscosmos pour l'étude de l'atmosphère martienne et la recherche de signes de vie passée ou présente sur Mars) ou Double Star (mission ESA-CNSA pour l'étude des effets du Soleil sur l'environnement de la Terre).

P POSSIBILITÉS DE FINANCEMENT DE L'ESA POUR LES ENTREPRISES

L'ESA offre de nombreuses possibilités de financement aux entreprises par le biais de ses différents appels à propositions. Ces initiatives sont conçues pour encourager l'innovation, soutenir le développement de nouvelles technologies et renforcer la compétitivité de l'industrie spatiale européenne. L'un des principaux mécanismes de financement est constitué par les centres d'incubation d'entreprises de l'ESA (ESA BIC), qui offrent aux jeunes entreprises et aux petites entreprises un soutien financier, une expertise technique et l'accès aux installations de l'ESA. Ces centres sont stratégiquement situés dans toute l'Europe et ont nourri avec succès des centaines d'entreprises, les aidant à transformer des idées innovantes en produits et services commerciaux viables.



L'ESA propose également des financements dans le cadre du Programme général de soutien technologique (GSTP), qui invite les entreprises à soumettre des propositions de développement de nouvelles technologies susceptibles d'améliorer les missions de l'ESA et l'industrie spatiale au sens large. Le GSTP est particulièrement axé sur le soutien à la maturation des technologies, depuis le concept initial jusqu'aux essais finaux et à la validation. En fournissant un financement et un soutien technique à différents stades de développement, l'ESA aide les entreprises à franchir la « vallée de la mort » de la maturation technologique, en veillant à ce que les innovations prometteuses puissent atteindre le marché et être utilisées dans les missions spatiales.



Le programme Advanced Research in Telecommunications Systems (ARTES), qui soutient le développement de technologies et de services de communication par satellite innovants, constitue une autre possibilité de financement importante. Grâce à divers éléments du programme ARTES, tels que ARTES Core Competitiveness et ARTES Partner, les entreprises peuvent recevoir des fonds pour développer de nouveaux produits, mener des études de faisabilité et créer des projets pilotes. Ces appels de fonds donnent souvent la priorité aux projets qui répondent aux besoins des marchés émergents, renforcent l'autonomie stratégique de l'Europe en matière de télécommunications et apportent des avantages à la société. En s'engageant dans le programme ARTES, les entreprises peuvent non seulement obtenir un soutien financier, mais aussi collaborer avec des experts de l'ESA et accéder à un réseau de partenaires industriels, ce qui renforce leurs perspectives de réussite commerciale.

L'ESA ET LE PROGRAMME DE LA STATION SPATIALE INTERNATIONALE

L'ESA est un partenaire clé du programme de la Station spatiale internationale (ISS), auquel elle contribue principalement par l'intermédiaire du module laboratoire Columbus (livré à l'ISS en 2008). Columbus est l'un des principaux modules de recherche de l'ISS, offrant une installation de pointe pour des expériences en sciences de la vie, en science des matériaux, en physique des fluides et dans d'autres disciplines. Les astronautes de l'ESA mènent régulièrement des expériences scientifiques à bord de l'ISS, tirant parti de l'environnement de microgravité unique pour obtenir des informations impossibles à obtenir sur Terre.

APPORTER LA TECHNOLOGIE DE L'ESPACE À LA TERRE

L'ESA investit massivement dans le développement de technologies qui non seulement font progresser l'exploration spatiale, mais profitent également à la vie sur Terre. L'une de ces innovations est le développement d'une technologie de fusée réutilisable dans le cadre du projet Prometheus. Cette initiative vise à créer un moteur de fusée réutilisable à faible coût, réduisant ainsi considérablement le coût de l'accès à l'espace.

Un autre exemple quotidien est le système de navigation par satellite Galileo, développé par l'ESA en collaboration avec l'Union européenne. Ce système fournit des informations de positionnement très précises pour un large éventail d'applications, de la navigation aux services de chronométrage. Galileo représente l'alternative indépendante de l'Europe au système américain GPS.



ORIENTATIONS FUTURES

L'ESA participe activement au programme Artemis, dirigé par la NASA, qui vise à envoyer des humains sur la Lune (y compris la première femme en 2026) et, à terme, à y établir une présence durable. Les contributions de l'ESA comprennent le module de service européen pour le vaisseau spatial Orion, qui fournira la propulsion, l'énergie et le soutien de la vie pour les missions avec équipage sur la Lune.



L'ESA est également partenaire de la mission de retour d'échantillons de Mars, une collaboration avec la NASA visant à ramener sur Terre des échantillons de sol martien collectés par le rover Perseverance, afin de les analyser en détail. Cette mission a le potentiel de répondre à des questions fondamentales sur la possibilité de vie sur Mars et sur l'histoire géologique de la planète.

L'ESA se concentre également sur la durabilité de l'espace, en reconnaissant le problème croissant des débris spatiaux. L'initiative Clean Space de l'agence vise à développer des technologies de prévention, d'atténuation et d'élimination des débris spatiaux.

L'ESA ET ABGI-POLOGNE

En 2022, l'ESA a signé un contrat avec ABGi-Pologne (Absiskey Polska Sp. z o.o. à l'époque) pour qu'ABGi-Pologne agisse en tant que courtier technologique de l'ESA et ambassadeur des applications commerciales de l'ESA pour la Pologne. Le rôle du courtier et de l'ambassadeur est de soutenir les entreprises polonaises dans leur croissance et le développement de leurs produits avec l'aide des technologies spatiales et des fonds de l'ESA. Les activités du courtier sont soutenues par le parc technologique de Cracovie et l'association polonaise de l'industrie spatiale.

Le rôle du courtier est de faciliter le transfert des technologies spatiales vers des secteurs non spatiaux tels que les soins de santé, l'énergie, l'automobile ou l'agriculture. Les courtiers recherchent des technologies prometteuses dans le portefeuille de l'ESA ou des entreprises spatiales polonaises et étrangères et les mettent en relation avec les besoins des entreprises à la recherche de solutions innovantes. Ils apportent un soutien personnalisé aux entreprises, les guidant tout au long du processus de transfert de technologie, de l'évaluation initiale à la commercialisation. Il s'agit notamment d'offrir une expertise technique, d'identifier les possibilités de financement et de faciliter les collaborations entre les entreprises et les institutions de recherche. Les courtiers sensibilisent les industries non spatiales aux technologies spatiales et les aident à mieux les comprendre. Les entreprises non spatiales peuvent également présenter leurs besoins technologiques susceptibles d'adopter des technologies spatiales potentielles.

Depuis le début de l'année 2024, les courtiers de l'ESA d'ABGi-Pologne gèrent le programme « ESA Spark Funding » conçu pour soutenir le transfert et la commercialisation des technologies spatiales dans des secteurs non spatiaux. Ce programme fournit une assistance financière de 75 000 EUR aux petites et moyennes entreprises (PME), aux startups matures et aux entrepreneurs qui cherchent à adapter et à appliquer des technologies dérivées de l'espace pour développer des produits et des services innovants. Avec des représentants de l'ESA et du ministère polonais du développement économique et de la technologie, ils sont membres du comité d'évaluation de l'appel d'offres. Bien que le premier cycle de soumissions ait pris fin en mai 2024, d'autres appels à candidatures sont prévus dans les mois à venir (les annonces sont publiées sur <https://esabroker.pl/spark-funding/>).



Le rôle de l'ambassadeur des applications commerciales de l'ESA est de soutenir la participation des entités polonaises (principalement des entreprises) au programme des applications commerciales et des solutions spatiales. Ce programme finance le développement de produits et de services innovants et durables basés sur des données satellitaires, qu'il s'agisse d'imagerie, de navigation ou de télécommunications. L'ambassadeur fait office de premier point de contact national pour les entreprises potentiellement intéressées par la participation au programme. Il fait connaître les appels à propositions ouverts, consulte les idées de projets et participe au processus de préparation des propositions, jouant souvent le rôle d'interface entre le candidat et l'homologue de l'ESA. Ils participent également aux groupes d'évaluation chaque fois que des propositions polonaises sont évaluées par des experts techniques de l'ESA.

En 2024, les postes de courtier de l'ESA et d'ambassadeur des applications commerciales de l'ESA sont occupés respectivement par M. Pawel Kwiatkowski et M. Wojciech Adamiak, tous deux issus du bureau de Varsovie d'ABGi-Pologne. Afin de s'assurer que les activités du courtier et de l'ambassadeur sont cohérentes avec les priorités nationales, tous deux collaborent étroitement avec les départements spatiaux du ministère du développement économique et de la technologie.



<https://space.biz.pl/czlonkowie/kapitech/>

En raison de son expertise, ABGi-Pologne a été engagé pour jouer le rôle d'« expert commercial » au sein du Centre d'incubation d'entreprises de l'ESA en Pologne (ESA BIC Pologne). L'initiative ESA BIC est gérée par l'Agence de développement industriel en Pologne et offre des financements incitatifs, un soutien technique, des sessions de mentorat et des services de soutien au développement des entreprises pour les start-ups qui utilisent des technologies spatiales dans leurs produits ou services.

En occupant les postes de courtier et d'ambassadeur de l'ESA,

ABGi-Poland joue un rôle important dans l'écosystème spatial polonais. Les deux organismes facilitent le transfert de technologies, soutiennent le développement des entreprises et améliorent la commercialisation des innovations spatiales, en comblant continuellement le fossé entre les secteurs spatial et non spatial, une mission que l'ESA a confiée à ABGi-Poland il y a quelques années.

SOURCES

- [1] Etude Xerfi : [3829517-24MTR01-slyflaPa.pdf](#)
- [2] Dassault Systèmes : plongez au cœur des enjeux de l'industrie aérospatiale : [Plongez au cœur des enjeux de l'industrie aérospatiale - Blog Dassault Systèmes \(3ds.com\)](#)
- [3] S. Baillarin, E. Berthier, CNES, Réduction de l'empreinte environnementale des activités scientifiques spatiales, publié le 10.07.2024, Disponible sur : SPS_2024_Group-Spécifique-#5 - Rapport v2-0 2024-07-10
- [4] Polytechnique insights , Qu'est-ce que le « New Space », cet écosystème émergent du spatial ? Disponible sur : [« Qu'est-ce que le « New Space », cet écosystème émergent du spatial ? »](#)
- [5] S.N., République Française, Les émissions de gaz à effet de serre du secteur des transports, publié le 25 février 2021, Disponible sur : [« Les émissions de gaz à effet de serre du secteur des transports - notre-environnement »](#)
- [6] S.N., Parlement Européen, Emissions de CO2 des avions et des navires : faits et chiffres, publié le 14 juin 2022, Disponible sur : [« Émissions de CO2 des avions et des navires : faits et chiffres \(infographie\) | Thèmes | Parlement européen »](#)
- [7] Salon international de l'aéronautique et de l'espace, Le Bourget, L'aviation et le développement durable, publié le 18 juin 2019, Disponible sur : [Final-Aviation-CTOs-Sustainability-State-ment_FR.pdf](#)
- [8] Projetvert, Les avions : un défi écologique à surmonter, publié en septembre 2023, Disponible sur : [Les avions : un défi écologique à surmonter - Projet Vert](#)
- [9] Autre étude Xerfi : [3829516-23ENT39-MaHifyzo.pdf](#)
- [10] S.N., Parlement européen, Des approvisionnements durables en matières premières critiques cruciales pour l'industrie européenne, publié le 13 décembre 2023, Disponible sur : [« Des approvisionnements durables en matières premières critiques cruciales pour l'industrie européenne | Thèmes | Parlement européen »](#)
- [11] S.N., IEA, Global rare earths demand in the Net Zero Scenario, 2023-2040, publié le 13 mai 2024, Disponible sur : ["Global rare earths demand in the Net Zero Scenario, 2023-2040 – Charts – Data & Statistics - IEA"](#)
- [12] Hughes-Marie AULANIER, CNES, Analyse prospective pour la filière spatiale Des risques liés aux limites planétaires et aux disponibilités des ressources, publié en septembre 2024, Disponible sur : [« Rapport-DDD-Filiere-Spatiale-Risques-Limites-Ressources-2024.pdf »](#)
- [13] Florian ZANDT, Statista, Who Leads the Semiconductor Foundry Market?, publié le 19 juillet 2024, Disponible sur : ["Chart: Who Leads the Semiconductor Foundry Market? | Statista"](#)
- [14] S. LUND, J. MANYIKA, L.WOETZEL, E. BARRIBALL, McKinsey & Company, Risk, resilience, and rebalancing in global value chains, publié le 6 août 2020, Disponible sur : ["Risk, resilience, and rebalancing in global value chains | McKinsey"](#)
- [15] L. DELEVINGNE, W. GLAZENER, L. GREGOIR & K. HENDERSON, McKinsey, Climate risk and decarbonization: What every mining CEO needs to know, publié le 28 janvier 2020, Disponible sur : ["Climate risk and decarbonization: What every mining CEO needs to know | McKinsey"](#)
- [16] Huopo CHEN, Chinese Science Bulletin, Projected change in extreme rainfall events in China by the end of the 21st century using CMIP5 models. Publié en avril 2013, Disponible sur : ["\(PDF\) Projected change in extreme rainfall events in China by the end of the 21st century using CMIP5 models"](#)
- [17] S.N., 20 minutes, Réchauffement climatique : l'accélération de la montée des eaux est confirmée par la NASA, publié le 15 juin 2022, Disponible sur : [« Réchauffement climatique : l'accélération de la montée des eaux est confirmée par la NASA »](#)
- [18] S.N., UNESCO, Risque d'inondation : renforcer la résilience des communautés côtières en améliorant les prévisions et les projections, publié le 27 avril 2023, Disponible sur : [« Risque d'inondation : renforcer la résilience des communautés côtières grâce à l'amélioration des prévisions et des projections - Décennie de l'Océan »](#)
- [19] S.N., Forbes, Avec le réchauffement climatique, plus de 10 000 aéroports sont menacés dans le monde, publié le 25 janvier 2021, Disponible sur : [« Avec le réchauffement climatique, plus de 10 000 aéroports sont menacés dans le monde - Forbes France »](#)
- [20] S.N., Cité de l'espace, Bilan 2023 des lanceurs, publié le 4 janvier 2024, Disponible sur : [« Bilan 2023 des lanceurs - Cité de l'espace »](#)
- [21] S.N., Les risques et limites de la filière spatiale, Disponible sur : [« Filière-Spatiale_Risques-Limites-Ressources_v2024-09.pdf »](#)
- [22] S.N., OTAN, Espace et climat : de nouvelles approches pour accroître la résilience de l'OTAN, Disponible sur : [« Revue de l'OTAN - Espace et climat : de nouvelles approches pour accroître la résilience de l'OTAN \(nato.int\) »](#)
- [23] S.N., Worldbank, Tendances et variabilité, projection en Guyane, Disponible sur : [« Guyane - Tendances et variabilité - Projections | Portail de connaissances sur les changements climatiques \(worldbank.org\) »](#)
- [24] S.N., Think Hazard, Les feux de forêt à Kourou, Disponible sur : [« Think Hazard - Kourou - Feu de forêt »](#)
- [25] S.N., Worldbank, Portail de connaissances sur les changements climatiques, Disponible sur : [« Guyane - Résumé | Portail de connaissances sur les changements climatiques \(worldbank.org\) »](#)
- [26] S.N., Trading economics, Titane – Contrat à terme – Prix, données de 2017 à 2025, Disponible sur : [« Titane - Contrat À Terme - Prix | 2017-2025 Données | 2026-2027 Prévisions »](#)

- [27] S.N., GIFAS, Comment l'aéronautique s'organise pour trouver des alternatives au titane russe, Disponible sur : « [Comment l'aéronautique s'organise pour trouver des alternatives au titane russe](#) »
- [28] Olivia, Airjournal, Crise Ukrainienne : quelles sont les conséquences pour l'industrie aéronautique européenne ?, publié le 27 février 2022, Disponible sur : « [Crise ukrainienne : quelles conséquences pour l'industrie aéronautique européenne ? | Air Journal](#) »
- [29] Philippe VOLVERT, Destination Orbite, La guerre en Ukraine : Quelles conséquences pour le spatial ? Pblié le 27 février 2022, Disponible sur : « [La guerre en Ukraine : Quelles conséquences pour le spatial ?](#) »
- [30] S.N., Wikipédia, Motor Sich, Disponible sur : « [Motor Sich — Wikipédia](#) »
- [31] 3 grands défis de l'aéronautique : [Les 3 grands défis de l'aéronautique - Agora Technique \(agora-technique.com\) \(a mixer avec le paragraphe d'avant\)](#)
- [32] Les ambitions française sur le marché spatial mondial : [livre_blan_c_les-ambitions-francaises-sur-le-marche-spatial-mondial.pdf](#)
- [33] Tristan GAUDIAUT, Statista, Semi-conducteurs : cinq fonderies détiennent 90% du marché mondial, publié le 5 avril 2023, Disponible sur : « [Graphique: Semi-conducteurs : cinq fonderies détiennent 90 % du marché mondial | Statista](#) »
- [34] EUSPA Market Report : [EUSPA Market Report 2024.pdf \(europa.eu\)](#)
- [35] M. Jean-François RAPIN, Sénat, Rapport d'information, publié le 19 juin 2024, Disponible sur : « [r23-6971.pdf](#) »
- [36] Vidéo youtube : « [Il faut qu'on parle des MEGACONSTELLATIONS : la bombe à retardement : Il faut qu'on parle des MEGACONSTELLATIONS : la BOMBE à retardement - On Se l'Demande #118 - Le JDE \(youtube.com\)](#) »
- [37] Greenly, pollution spatiale : les problématiques et les enjeux en 2023, publié en mars 2023, Disponible sur : [Pollution spatiale : les problématiques et les enjeux en 2023](#)
- [38] Airfrance, les impacts de l'aviation sur le climat : [Les impacts de l'aviation sur le climat](#)
- [39] L'aéro recrute, GIFAS, Disponible sur : [CP-LAero-Recrute-Enquete-YouGov-1.pdf](#)
- [40] S.N., La langue française, Définition des mégaconstellations, publié le 27 août 2024, Disponible sur : « [Définition de mégaconstellation | Dictionnaire français](#) »
- [41] [Année spatiale 2023 - Bilan lancements orbitaux - Fusées et satellites - Evolution 2015-2023.jpg \(2000x1125\) \(un-autre-regard-sur-la-terre.org\)](#)
- [42] S.N., CNES, Les satellites, Disponible sur : « [Les satellites | CNES](#) »
- [43] S.N., Sénat, Financement de la recherche spatiale, publié le 19 juin 2024, Disponible sur : « [Financement de la recherche spatiale - Sénat](#) »
- [44] S.N., The European Space Agency, About space debris, Disponible sur : « [ESA - About space debris](#) »
- [45] S.N., The European Space Agency, ESA Space Environment Report, Disponible sur : « [ESA - ESA Space Environment Report 2024](#) »
- [46] Remy FAUVEL, l'MTech, L'interférence : une source de problèmes télécommunicationnels, publié le 16 février 2022, Disponible sur : « [l'interférence : une source de problèmes télécommunicationnels](#) »
- [47] James BOWERS, site du gouvernement, Objectifs connectés : 50 milliards d'émetteurs de CO2 ?, publié le 24 septembre 2021, Disponible sur : « [Objets connectés : 50 milliards d'émetteurs de CO2 ?](#) »
- [48] S.N., Rapport de l'Académie des sciences, Grandes constellations de satellites : Enjeux et Impacts, publié le 30 mars 2024, Disponible sur : https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/rapport_constellations_satellites_2024.pdf
- [49] Stephenn ENGLISH, ECMWF 50, Radio frequency interference : an NWP perspective on the RFI 2022 workshop, publié le 14 mars 2022, Disponible sur : « [Radio Frequency Interference: an NWP perspective on the RFI 2022 workshop | ECMWF](#) »
- [50] S.N., CNES, Quel est l'impact d'une fusée pour l'environnement, publié en 2024, Disponible sur : « [Quel est l'impact d'une fusée sur l'environnement ? | CNES](#) »
- [51] [livre_blan_c_livre-blanc-la-propulsion-spatiale-nouvel-enjeu-dinnovation.pdf](#)
- [52] S.N., Wikipédia, PSLV-C37, Disponible sur : « [PSLV-C37 - Wikipedia](#) »
- [53] S.N., France science, L'émergence et le développement du New Space aux Etats-Unis, publié le 6 juillet 2022, Disponible sur : « [L'émergence et le développement du New Space aux États-Unis - France Science](#) »
- [54] S.N., Airbus, European space and telecoms players sign partnership agreement to bid for IRIS2 constellation, publié le 2 mai 2023, Disponible sur : « [European Space and Telecoms Players Sign Partnership Agreement to Bid for IRIS2 Constellation | Airbus](#) »
- [55] BFM Business, Et si demain, les airbus volaient grâce au méthane produit par les vaches ?, publié en juin 2013, Disponible sur : [Et si demain, les Airbus volaient grâce au méthane produit par les vaches?](#)
- [56] Sophie HOGUIN, Technique de l'ingénieur, Propulsion chimique : méthane à tous les étages, publié le 30 mai 2018, Disponible sur : « [Propulsion chimique : méthane à tous les étages | Techniques de l'Ingénieur](#) »

[57] Wikipédia, le Xénon, Disponible sur : « [Xénon — Wikipédia](#) »

[58] Surfeo, la propulsion électrique des aéronefs, entre progrès et défis, Disponible sur : [La propulsion électrique des aéronefs : entre progrès et défis - Surfeo](#)

[59] Anne BAUER, Les Echos, 2010-2019 : quand SpaceX invente la fusée réutilisable, publié le 29 décembre 2019, Disponible sur : « [2010-2019 : quand SpaceX invente la fusée réutilisable | Les Echos](#) »

[60] S.N., Way4Space, Les lanceurs réutilisables : enjeux, économie et perspectives pour l'Europe, Disponible sur : « [Les lanceurs réutilisables : enjeux, économie et perspectives pour l'Europe - Way 4 Space](#) »

[61] S.N., Wikipédia, Programme de développement de lanceurs réutilisables de Space X, Disponible sur : « [Programme de développement de lanceurs réutilisables de SpaceX — Wikipédia](#) »

[62] S.N., Wikipédia, Base de lancement d'Andøya, Disponible sur : « [Base de lancement d'Andøya — Wikipédia](#) »

[63] Arte, Dans la solitude de l'espace – le défi de l'isolement, publié en septembre 2024, Disponible sur : [Dans la solitude de l'espace - Le défi de l'isolement | ARTE](#)

[64] S.N., Wikipédia, Programme Artemis, Disponible sur : « [Artemis program - Wikipedia](#) »

[65] Point de situation sur les débris spatiaux, Disponible sur : [ESA - Point de situation sur les débris spatiaux](#)

[66] S.N., Actu Aero, le ZA 10, publié le 5 octobre 2018, Disponible sur : « [ZA10 – ACTU AERO /// AAF](#) »

[67] Aviation Week, Can aviation use Liquified Natural Gas to reduce its carbon footprint ? publié en mars 2021, Disponible sur : [Can Aviation Use Liquified Natural Gas To Reduce Its Carbon Footprint? | Aviation Week Network](#)

[68] S.N., Indemniflight, l'aviation peut-elle utiliser le gaz naturel liquéfié pour réduire son empreinte carbone ?, Disponible sur : « [L'aviation peut-elle utiliser le gaz naturel liquéfié pour réduire son empreinte carbone ? - Indemniflight](#) »

[69] GIFAS, la digitalisation des compagnies aériennes et des aéroports va progresser en 2022, Disponible sur : [La digitalisation des compagnies aériennes et des aéroports va progresser en 2022](#)

[70] S.N., mc2i, Digitalisation du parcours client : des innovations au service des voyageurs, publié le 29 juin 2021, Disponible sur : « [Digitalisation du parcours client : des innovations pour les voyageurs](#) »

[71] S.N., Thales, Solutions de pilote automatique Thales pour avion et hélicoptère, Disponible sur : « [Solutions de Pilote Automatique Thales pour avion et hélicoptère | Thales Group](#) »

[72] Bruno TREVIDIC, Les Echos, Le trafic aérien mondial va encore doubler d'ici à 2037, publié le 24 octobre 2018, Disponible sur : « [Le trafic aérien mondial va encore doubler d'ici à 2037 | Les Echos](#) »

[73] Chef Rémy, Quantstreams, Vers une nouvelle année de croissance : les chiffres fous du transport aérien, publié le 2 janvier 2025, Disponible sur : « [Vers une nouvelle année de croissance : les chiffres fous du transport aérien - Quantstreams](#) »

[74] N. NEVADO, E. TRICHARD & S. BAROUX, Exeiconseil, Les Ailes de la Transformation : l'Industrie du Futur dans l'Aéronautique, publié en mai 2023, Disponible sur : « [Les Ailes de la Transformation : L'Industrie du Futur dans l'Aéronautique | Exeis](#) »

[75] S.N., Ailehop, L'Aéronautique : Evolution, Innovations et Enjeux Ecologiques, Disponible sur : « [L'Aéronautique : Évolution, Innovations Et Enjeux Écologiques - AileHop](#) »



contact@abgi-france.com

www.abgi-france.com