

Produire dans l'espace ?

Par Auriane Decker ¹, Sébastien Lombard ²
et Patrice Pierrat ³

On observe, ces dernières années, le retour d'une course à la puissance dans le domaine spatial, entre grands pays (États-Unis, Chine, Inde, États européens), à laquelle participent plus ou moins directement un certain nombre d'acteurs privés, notamment issus des Big Tech, qui bouleversent le secteur. Ce versant géopolitique et géoéconomique de la compétition spatiale fait régulièrement la une des médias. Mais parallèlement à cela, l'espace sert aussi, de plus en plus, de laboratoire d'innovation dans divers secteurs économiques plus classiques (agroalimentaire, industrie pharmaceutique, matériaux, énergie). Cet article propose un coup de projecteur sur un de ces aspects : la fabrication de produits dans l'espace (in-orbit manufacturing en anglais).

Après avoir rappelé pourquoi le milieu spatial peut se révéler intéressant pour certains procédés industriels (en lien avec la micropesanteur) et les débuts du « made in space », Auriane Decker, Sébastien Lombard et Patrice Pierrat soulignent le rôle joué par la Station spatiale internationale (ISS) dans la recherche en matière de fabrication dans l'espace. Puis ils présentent un panorama des activités de recherche appliquée et expérimentale qui y prennent place, les différents acteurs impliqués, les technologies clefs, ainsi que les défis et limites qui perdurent. Si beaucoup de ces activités sont encore embryonnaires, la perspective de l'après-ISS (au-delà de 2030) et l'accélération des performances technologiques des dernières années (SpaceX, Blue Origin) pourraient favoriser l'essor de certaines productions en orbite dans des volumes et à des coûts plus exploitables. De même, la relance de l'exploration spatiale habitée et la nécessité de revoir la gestion de l'infrastructure satellitaire pourraient aussi accroître l'intérêt de cette niche industrielle. S.D.

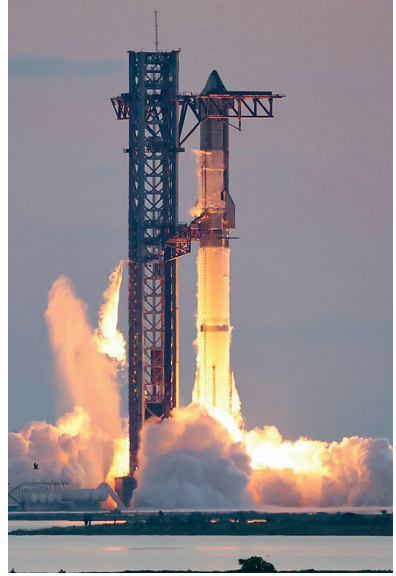
1. Étudiante en master 2 Relations internationales à Sciences Po Strasbourg et alternante en prospective au Centre national d'études spatiales (CNES), l'agence spatiale française.

2. Ingénieur en charge des activités de prospective au CNES.

3. Directeur du Centre de prospective et de veille aérospatiales à l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA).

Les activités spatiales (lancements, opérations en orbite, missions d'exploration lointaine ou encore usages des services satellitaires) connaissent, depuis quelques années et au plan international, une intensification spectaculaire. Fruit d'une nouvelle dynamique économique et technologique baptisée *NewSpace*, ou bien de programmes gouvernementaux d'ampleur (parfois émergents) signant le retour de la projection dans l'espace des rivalités géopolitiques, cette évolution s'accompagne de ruptures consommées comme l'industrialisation de la fabrication des satellites (plus de 150 satellites Starlink ⁴ par mois aujourd'hui, par exemple) ou de composants de lanceurs ⁵ ; ou encore comme les lancements à haute cadence : actuellement, un lancement est réalisé tous les deux jours dans le monde. S'ajoutent à ces ruptures des perspectives de plus en plus tangibles comme le lancement dit superlourd (plus de 100 tonnes de fret en orbite en un seul lancement) ou encore la réduction drastique des coûts de lancement, avec des objectifs de l'ordre de 100 dollars US le kilogramme (kg) contre encore 20 000 dollars US le kg mis en orbite il y a quelques années.

Progrès technologique, dynamique économique, industrialisation de l'outil de production sur Terre, augmentation capacitaire ravivent les spéculations, à divers horizons de temps, sur une forme d'industrialisation de l'espace, depuis de très grandes infrastructures orbitales (mégaconstellations ⁶, grandes stations spatiales, futures centrales solaires orbitales ?) jusqu'à une logique d'exploitation minière de la Lune ou d'astéroïdes ⁷, en passant par l'idée ancienne de la production dans l'espace, cristallisée par le concept d'usine spatiale.



Mise à feu du lanceur superlourd américain Starship, 13 octobre 2024
© Steve Jurvetson / Wikipedia Commons

4. Starlink est la constellation de connectivité d'Internet par satellites de SpaceX, géant de l'industrie spatiale américaine et mondiale, dirigé par Elon Musk.

5. C'est-à-dire les fusées transportant en orbite des satellites, du matériel, des astronautes.

6. Starlink compte environ 7 000 satellites en orbite ; d'autres mégaconstellations américaines et chinoises sont en projet : Kuiper, Guowang, Thousand Sails.

7. Entre Mars et Jupiter existe une zone d'accumulation appelée ceinture principale d'astéroïdes, dont certains recèleraient des métaux (fer, nickel par exemple) en quantités significatives.

Pourquoi produire dans l'espace ?

Le milieu spatial

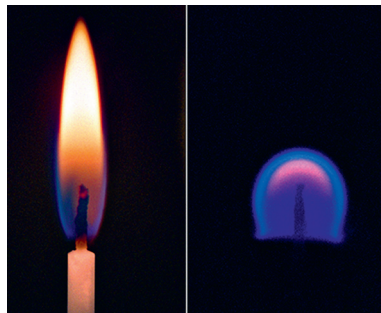
Historiquement, le concept de production dans l'espace s'est construit sur l'idée de tirer parti des propriétés naturelles d'un environnement spatial radicalement différent de celui qui est notre quotidien et référence sur Terre. Si le vide spatial ou bien les environnements radiatifs de l'espace sont potentiellement intéressants⁸, c'est bien la micropesanteur⁹ (celle qui fait « flotter » les astronautes) qui constitue LE changement radical par rapport aux conditions terrestres.

Des processus physiques au cœur de nombre de procédés de fabrication industrielle courants (en métallurgie ou en chimie par exemple), comme la convection¹⁰, la poussée d'Archimède, la sédimentation¹¹ sont très sensiblement modifiés par la micropesanteur, ouvrant des champs d'investigation, à la recherche et à l'innovation d'abord, et ensuite à la fabrication en orbite de produits à haute performance et haute valeur ajoutée.

L'objectif est ici de fabriquer dans l'espace, puis de ramener sur Terre et commercialiser, par exemple, des matériaux avancés pour des utilisations exigeantes.

Les débuts

Ainsi, dès les années 1970, de premières expérimentations sont menées en sciences et techniques des matériaux (soudure, croissance de cristaux, alliages, semi-conducteurs) depuis les premiers laboratoires en orbite comme le Skylab américain.



Combustion comparée d'une flamme sur Terre (à gauche) et en micropesanteur (à droite) © NASA (National Aeronautics and Space Administration)

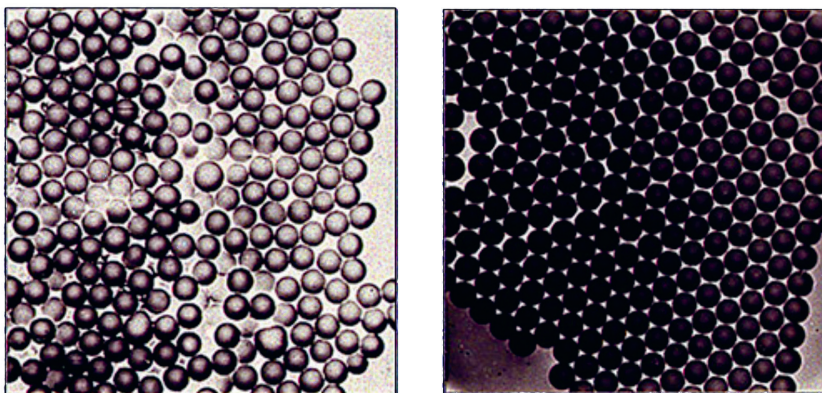
8. Ces deux environnements peuvent cependant être reproduits sur Terre sans trop de difficultés.

9. La micropesanteur est la pesanteur quasi nulle ressentie en orbite et résultant de la combinaison de la pesanteur produite par l'attraction gravitationnelle terrestre et des forces d'inertie liées au déplacement sur orbite à grande vitesse. Elle peut être reproduite sur Terre (dans une tour de chute libre) ou dans des avions « zéro gravité » uniquement pendant de très courtes durées.

10. La convection est le transport de chaleur par le mouvement d'un liquide ou un gaz (le vent par exemple).

11. Dépôt des particules en suspension dans un fluide « au fond » (d'un récipient) sous l'effet de la gravité.

En 1985, le premier produit « *made in space* », fabriqué dans la navette spatiale américaine est commercialisé de manière anecdotique : il s'agissait de lots homogènes de microbilles en latex d'une sphéricité exceptionnelle et d'un diamètre très précis. Dix milliards de ces microbilles auraient été produites ; le flacon d'une quinzaine de millions de microbilles était vendu environ 400 dollars US par la société Particle Technology Inc. Le produit répondait à un besoin du Bureau national des *standards* américain (aujourd'hui l'Institut national des *standards* et des technologies), lequel commercialisait des substances étalons utilisées par exemple pour le contrôle dimensionnel en microélectronique, pour le contrôle de systèmes de filtration ou de membranes poreuses, ou pour la calibration de compteurs particulaires et cellulaires.



Microbilles de latex produites sur Terre (à gauche) et en orbite (à droite). Source : COZMUTA Ioana, *Industry Innovation and Microgravity Lead*, Space Portal, NASA Ames Research Center, p. 15. URL : https://sites.nationalacademies.org/cs/groups/ssbsite/documents/webpage/ssb_172011.pdf. Consulté le 30 juin 2025.

Ce premier produit *made in space* ne se révèle pas vraiment un *best-seller* et n'aura pas de successeur avant longtemps. Les anticipations commerciales excessives des débuts du *made in space* vont progressivement laisser la place à des objectifs plus réalistes.

Dans les années 2000, la quête du produit à succès *made in space* se poursuit néanmoins : les candidats sont des produits à très forte valeur rapportée à leur poids (des produits légers et chers comme des principes actifs de médicaments par exemple), car il faut en effet pouvoir répercuter sur le prix, les coûts très significatifs de lancement des matières premières et intrants de fabrication, puis de retour sur Terre du produit fini, lesquels dépendent directement de la masse à transporter et restent très élevés à l'époque s'agissant de la navette spatiale (une dizaine de milliers de dollars de l'époque

au kilogramme). Enfin, ce *best-seller made in space* se doit d'être fabricable exclusivement dans l'espace, ou bien d'offrir une amélioration drastique des performances par rapport à sa fabrication sur Terre afin d'en justifier le surcoût.

La recherche en micropesanteur dans l'ISS

La construction et le développement de la Station spatiale internationale (ISS) durant les années 2000 vont venir consacrer et étendre des activités en micropesanteur axées sur la recherche, au profit des sciences et de l'amélioration de procédés de fabrication sur Terre : micro-



La Station spatiale internationale (ISS) en orbite autour de la Terre
(certains éléments de cette image ont été fournis par la NASA)

© Dima Zel / Shutterstock

électronique, optique, sciences de la vie, chimie pharmaceutique, ou encore des activités de fabrication additive variées (métallique, polymère ou même alimentaire !). Il se dessine également un nouveau besoin puissant et toujours actuel : doter les astronautes en missions spatiales, dans les stations en orbite basse — et un jour séjournant sur la Lune ou en route vers Mars — d'une nouvelle autonomie et résilience aux aléas, via la capacité à fabriquer, à bord et à la demande, des outils ou des pièces de rechange simples, ou encore à cultiver en environnement spatial les produits alimentaires nécessaires à la subsistance (cette agriculture en environnement contrôlé n'étant pas exempte de connexions avec des applications bien terrestres).

« Make it — don't take it » et au-delà

Cette formule de la NASA (National Aeronautics and Space Administration), que l'on peut traduire par « Fabriquez-le ; ne l'emportez pas », condense efficacement le propos, en occultant cependant le fait que le vide spatial n'offre aucune matière première, laquelle devra donc bien être emportée avec soi ; mais l'on pourra alors en tirer, grâce à la capacité de fabrication à la demande en orbite, le produit idoine répondant à tel ou tel aléa rencontré en cours de mission.

Cette idée d'autonomiser les activités spatiales en produisant le nécessaire directement dans l'espace, non plus pour la Terre

donc, mais pour les activités spatiales, trouve ensuite deux prolongements naturels encore en gestation. Le premier couvre la fabrication et / ou l'assemblage de systèmes spatiaux en orbite : fabrication et assemblage robotisés d'éléments d'infrastructure, d'équipements de grande dimension (complexes à embarquer sous la coiffe d'une fusée) pour les satellites, de modules spatiaux, jusqu'à de futures opérations de maintenance complexes mobilisant des procédés de fabrication (comme la découpe, la soudure).

Le second conduit au concept d'ISRU (*In Situ Resource Utilization*) dont le principe est d'utiliser les ressources lunaires ou martiennes en soutien aux missions d'exploration sur ces corps (lors de missions habitées notamment, avec cette perspective d'assurer à l'avenir une présence permanente sur la Lune) : production d'eau et d'oxygène nécessaires à la vie, de métaux, de matériaux de construction, d'outils, de pièces, voire de carburants de moteurs de fusée à partir de régolithe¹², de roches, de glace, de gaz atmosphériques, par exemple.

Exploiter les ressources de l'espace et délocaliser les productions terrestres ?

D'un ISRU de subsistance à une exploitation des ressources de l'espace (certes encore très spéculative, mais bien ancrée dans les récits du spatial américain ou encore intégrée au projet spatial du Luxembourg, par exemple), il n'y a qu'un petit pas, au plan intellectuel du moins. Le minage d'astéroïdes (et de leur manne en métaux) est ainsi le point de mire de ce concept d'exploitation des ressources

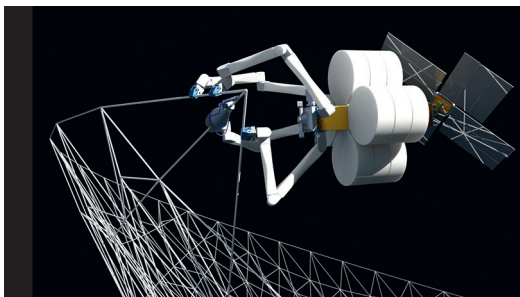
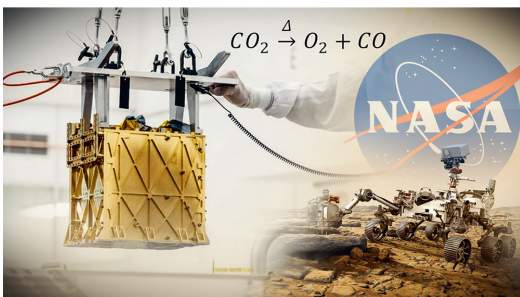


Image concept d'un robot « araignée » de fabrication de structure spatiale légère en orbite
© Tethers Unlimited Inc.



La petite expérience MOXIE (*Mars OXYgen ISRU Experiment*), montée sur le rover *Perseverance*, actuellement sur Mars, a produit cinq grammes de dioxygène (l'oxygène nécessaire à la respiration humaine) à partir du CO_2 présent dans l'atmosphère martienne. © NASA

12. Le régolithe est la poussière superficielle lunaire ou martienne qui couvre la roche mère.

de l'espace, qui ramène, depuis l'ISRU, à une collecte et production de ressources dans l'espace à nouveau au profit de la Terre.

Enfin, plus récemment, l'idée — aux accents très futuristes, si ce n'est utopistes — d'une délocalisation dans l'espace d'activités industrielles terrestres à risque, énergivores ou encore à fort impact environnemental ¹³, a pu être avancée de manière également très spéculative, notamment par un certain Jeff Bezos, propriétaire à la fois d'Amazon et de l'entreprise spatiale Blue Origin ¹⁴.

Panorama des activités de recherche et fabrication dans l'espace

Une orientation vers la recherche appliquée et l'expérimentation

À ce jour, la fabrication dans l'espace demeure principalement une activité de recherche (laquelle reste certes une production de connaissances !) réalisée en orbite basse dans les stations spatiales ¹⁵ : la Station spatiale internationale ISS (qui associe États-Unis, Russie, Europe, Japon et Canada) et la station spatiale chinoise Tiangong (environ quatre fois plus petite) ¹⁶. Il n'existe donc aucune production industrielle de série, ni d'usine spatiale.



Module de fonderie de superalliages en micropesanteur
© Redwire

L'ISS comprend plusieurs laboratoires dédiés, comme le module européen Columbus, ainsi que des équipements d'expérimentation spécialisés, mais reste un pied-à-terre fort limité en capacité d'accueil. Les activités y couvrent, par exemple, les matériaux et les procédés de fabrication avancés : superalliages métalliques résistant aux hautes températures et à l'usure ; matériaux multiphasés comme les aérogels qui

13. Indépendamment de défis technologiques majeurs, les idées les plus courantes tournent autour de *data centers* en orbite, par exemple.

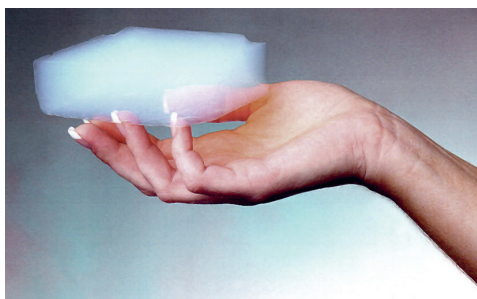
14. Voir « Jeff Bezos Wants Manufacturing to Move off Planet and NASA Is Exploring the Possibilities », *21st Century Tech Blog*, 7 mai 2022. URL : <https://www.21stcentech.com/jeff-bezos-manufacturing-move-planet-nasa-exploring-possibilities/>. Consulté le 30 juin 2025.

15. Et dans quelques satellites ou avions spatiaux orbitaux (aujourd'hui militaires) dédiés à cet usage.

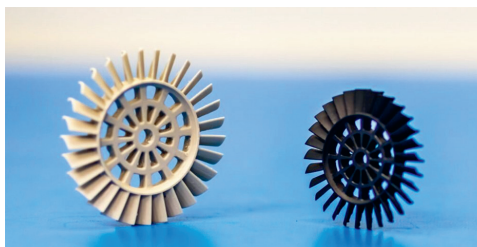
16. Des activités plus limitées (offrant quelques minutes de micropesanteur) peuvent être menées lors de vols aériens « zéro gravité » ; Novespace (filiale du CNES) ou Zero-G (société américaine) proposent ces vols à bord d'Airbus A310 ou de Boeing 727. Ces activités, accessibles à partir d'une dizaine de milliers d'euros et dans des délais raisonnables, constituent généralement un préalable à une activité dans l'ISS. Les vols suborbitaux proposés par Virgin Galactic permettent également de faire l'expérience de la micropesanteur.

sont des isolants thermiques et acoustiques ; verres spéciaux et fibres optiques — autant de matériaux pour lesquels les microstructures élaborées en micropesanteur sont plus régulières et moins sujettes à défauts — ; ou encore pièces fines en céramique et impressions 3D polymères, métalliques et multimatériaux.

Quant aux segments des opérations de fabrication et d'assemblage en orbite ou bien de la transformation de ressources *in situ*, ils font principalement l'objet de recherches académiques et de projets de démonstrations technologiques au sol et en orbite, dont une petite fraction seulement a abouti à ce jour.



Aérogel de silice © Courtesy NASA / JPL - Caltech



Pièces complexes en céramique *made in space*.
© Sierra Turbines

Quelques coups de projecteur

La fabrication additive fait l'objet de nombreuses recherches et d'une utilisation industrielle croissante sur Terre. Si des imprimantes 3D « plastique » compatibles avec la micropesanteur sont utilisées depuis plus de 10 ans dans l'ISS, l'Agence spatiale européenne (ESA) a démarré en 2024 les essais de la première imprimante 3D métallique¹⁷ jamais mise en orbite, fournie par l'industriel Airbus Defence and Space.

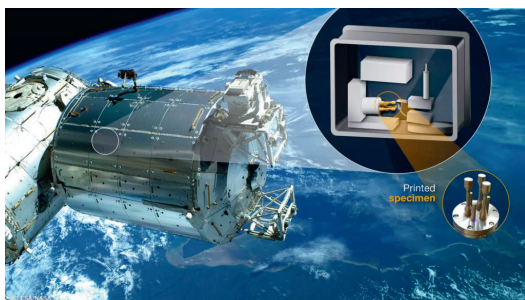


Image composite du module Columbus photographiée par l'astronaute de l'ESA Luca Parmitano, avec ajouts d'Airbus DS (imprimante Metal 3D d'Airbus Defence and Space et AddUp opérant à bord de l'ISS / ici fabrication d'éprouvettes de test) © ESA / NASA / Airbus DS

En optique, les recherches sur les fibres optiques se sont intensifiées depuis 10 ans autour des fibres en verre fluoré ZBLAN¹⁸ afin

17. Capable de fabriquer des pièces en métal et non plus seulement en thermoplastique.

18. La dénomination ZBLAN renvoie aux éléments chimiques constitutifs (sous forme de fluorures) : zirconium, baryum, lanthane, aluminium et sodium.

de mettre au point un concurrent à la fibre optique traditionnelle en silice utilisée dans les grands réseaux de communication, mais avec une meilleure performance en termes d'atténuation du signal. La fibre optique ZBLAN cristallise depuis plusieurs années les projets dans l'ISS, ainsi que les attentes de la communauté spatiale autour d'un produit qui comblerait l'écart entre une activité de recherche et une véritable production récurrente et commercialisable. Mais l'aboutissement reste incertain, car si la micropesanteur conduit à un verre de meilleure qualité optique, elle suppose aussi de revoir des *standards* industriels mis au point sur Terre pour la fabrication de fibres optiques en général ! Des longueurs commerciales de fibre (de l'ordre d'un kilomètre) ont cependant pu être produites récemment.

Des expérimentations sur la croissance de cristaux (cristaux organiques pour la chimie pharmaceutique ou inorganiques pour applications industrielles ; cristaux de matériaux semi-conducteurs par exemple) sont également menées. La société américaine Redwire, très active dans la fourniture d'équipements et la conduite de recherches dans l'ISS, a ainsi vendu, mais de manière assez symbolique et artificielle, deux grammes de cristaux optiques à un laboratoire américain spécialisé en microscopie électronique pour leur caractérisation fine.

Les laboratoires Merck & Co conduisent également des recherches en micropesanteur sur la cristallisation du Keytruda, un anticancéreux d'ores et déjà utilisé en immunothérapie contre plusieurs cancers. L'enjeu est ici de mettre au point, pour des raisons d'économie des systèmes de santé ¹⁹ et de confort des patients, non pas la macromolécule du principe actif (déjà connue), mais bien la formulation optimale d'une dose de médicament (suspension liquide de cristaux de principe actif), qui soit administrable en injection sous-cutanée (à domicile) et non plus en intraveineuse (à l'hôpital).

D'autres travaux de recherche sont consacrés aux dépôts de couches minces, c'est-à-dire à la fabrication de films de matériaux optiques ou d'isolants électriques de quelques nanomètres d'épaisseur. La société américaine LambdaVision utilise par exemple ces recherches pour mettre au point une rétine artificielle au profit de patients atteints de maladies dégénératives de la rétine.

Enfin, si l'espace présente globalement un certain nombre d'intérêts naturels pour la médecine dégénérative (accélération de certains

19. En 2022, 20 000 patients étaient traités en France pour un prix unitaire d'injection de 5 200 euros.

processus de vieillissement durant les séjours en orbite des astronautes), la micropesanteur trouve aussi des perspectives en médecine régénérative. Cela concerne la culture de cellules souches ou bien de tissus humains, et la croissance d'organoïdes²⁰ humains en trois dimensions, à des fins de recherche ou d'essais thérapeutiques.

En dehors de l'ISS, la Chine, autre grand acteur spatial au plan international, n'est pas en reste et mène également, depuis le début des années 2010, des recherches en micropesanteur dans des domaines analogues (biotechnologies, matériaux ou encore physique des fluides), notamment dans les stations successives de son programme Tiangong.

Modalités et défis

En pratique, toutes ces activités scientifiques sont conduites en automatique ou en semi-automatique dans des satellites ou bien des stations spatiales habitées, soit à l'intérieur des modules de station, soit à l'extérieur au contact direct du milieu spatial. Elles sont commanditées par les agences spatiales, par des institutions de recherche ou bien par des sociétés privées (*start-ups*, industriels, y compris en dehors du secteur spatial), et organisées, voire conçues, par des intermédiaires tels que les agences spatiales (c'est le rôle spécifique du Centre d'aide au développement des activités en micropesanteur et des opérations spatiales, le CADMOS, au CNES) ou bien par des intermédiaires spécialisés — on peut citer la société SpacePharma sur le segment de la chimie pharmaceutique. Les résultats sont généralement transmis (données expérimentales) ou un peu plus rarement rapatriés sur Terre (produits d'expérience) à l'occasion de la rentrée sur Terre d'astronautes dans une capsule habitée.

L'ensemble de ces activités reste toutefois d'extension assez confidentielle car fortement contraint par divers aspects :

- Les capacités d'accueil dans les stations spatiales existantes sont réduites du fait de l'espace intérieur disponible et du volume d'activité gérable par les astronautes. Il peut en découler des délais de réalisation prohibitifs.
- Les coûts associés sont très élevés, relativement à des recherches équivalentes sur Terre : mise au point des expériences, lancement, temps d'astronaute, rentrée et récupération des résultats alourdissent les frais. Il faut compter aujourd'hui, au minimum,

20. Petites structures biologiques répliquant certains aspects du fonctionnement d'un organe humain.

plusieurs centaines de milliers d'euros (« clef en main ») pour une petite expérimentation scientifique, et plus s'il faut recourir à des dispositifs expérimentaux non *standards*. Certains futurs opérateurs de transport annoncent des prix d'expérience en orbite de 20 000 à 40 000 euros le kilogramme (hors retour sur Terre).

- Le contexte international de l'ISS offre peu de garanties en matière de confidentialité.
- Il reste un certain nombre de complexités réglementaires en matière de sécurité ²¹ ou sur le plan juridique ²².
- Les possibilités offertes restent encore très méconnues en dehors du secteur spatial.

Un écosystème diversifié, tourné vers le futur et majoritairement en phase d'incubation

Outre les acteurs institutionnels traditionnels (agences, laboratoires publics), l'écosystème de la fabrication en orbite se composait en 2024 d'environ 300 entités, dont une grosse moitié aux États-Unis et environ 70 en Europe. La grande majorité est constituée par des *start-ups* en phase d'incubation, nées des perspectives de réduction des coûts d'accès à l'espace avec les avancées de SpaceX dans les lancements, notamment, ou bien de défis (avec prix à la clef) organisés par les agences spatiales (*Deep Space Food Challenge* de la NASA en 2021, autour de l'alimentation d'un équipage en mission vers Mars, par exemple). Par conséquent, une fraction très minime de ces acteurs a déjà réalisé une expérience de recherche dans l'ISS ou bien une démonstration de fabrication en orbite.

Leurs orientations les plus courantes sont la fabrication future de grandes infrastructures orbitales, l'alimentation dans l'espace (soit des préoccupations tournées plutôt vers les activités spatiales que vers la Terre, contrairement à nombre de recherches dans l'ISS) et la chimie. En France, on recense une petite dizaine d'acteurs, parmi lesquels les sociétés Airbus Defence and Space, Alatyr, Interstellar Lab, Space Cargo Unlimited, SpacePharma ou Thales Alenia Space.

21. La sécurité des astronautes impose le respect d'un cahier des charges strict pour toute activité dans l'ISS.

22. Même si le cadre juridique d'exploitation de l'ISS précise les choses, il n'est pas toujours facile de faire franchir les frontières à un échantillon biologique (par exemple) fabriqué en orbite et passé par le territoire américain pour rentrer sur Terre, et devant ensuite revenir dans l'Union européenne...

Et demain ?

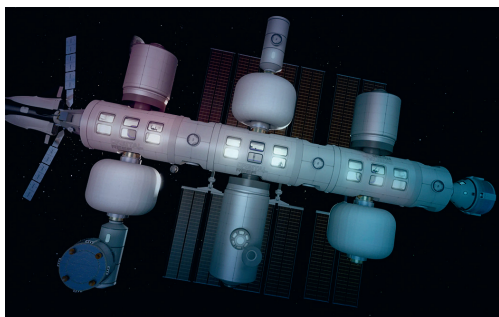
La situation qui prévaut depuis une vingtaine d'années en matière de production en orbite est donc celle d'une activité de recherche appliquée et de quête d'un produit *made in space best-seller*, activité menée principalement depuis les rares stations spatiales en orbite : l'ISS et Tiangong. Si les perspectives de production dans l'espace ont toujours, historiquement et à l'international, fédéré un écosystème constitué de *start-ups* technologiques, d'acteurs de la recherche académique et d'entreprises spatiales établies, le contexte actuel est propice aux nouveaux projets.

Les opportunités de l'après-ISS

C'est d'abord la fin de vie programmée de l'ISS (vieillissante), à l'horizon 2030, qui motive la recherche de solutions de substitution pour les activités qui y étaient menées (au premier rang desquelles le séjour d'astronautes) et invite à dépasser les limitations des activités possibles jusqu'ici dans l'ISS. Outre de nouveaux projets nationaux de petites stations spatiales (future station spatiale indienne BAS, Bharatiya Antariksha Station, par exemple), la politique spatiale américaine incite à l'exploitation commerciale de l'orbite terrestre basse en général, et en particulier à la mise en place de stations spatiales privées commerciales. Ce schéma pourrait favoriser un essor des activités de recherche et de production en orbite, en offrant un plus grand volume exploitable : si l'ISS est la plus grande station spatiale jamais mise en orbite, son volume utile (tant pour l'habitat que pour les activités) reste limité à 400 mètres cubes, et celui de Tiangong n'en compte qu'une centaine.

Mais c'est sans doute la mise à disposition, dans un cadre commercial attractif, de capacités de recherche et de production en orbite qui pourrait constituer la véritable rupture, notamment via le *marketing*, la professionnalisation, l'innovation et la performance des offres proposées. Plusieurs projets, aux destinées encore très incertaines mais déjà passés par des phases de consolidation et visant un déploiement opérationnel avant 2030, sont en lice :

- la station Orbital Reef proposée par les américains Blue Origin et Sierra Space ;



Représentation de la station Orbital Reef © Blue Origin.
URL : <https://www.blueorigin.com/fr-FR/destinations>

- la station Starlab, version privée de l'ISS, proposée par un consortium d'industriels des pays partenaires de l'ISS hors Russie (l'europpéen Airbus Defence and Space, le japonais Mitsubishi, les américains Nanoracks et Northrop Grumman, etc.).



Station spatiale Starlab © Airbus 2023

- la station Axiom, proposée par l'américain Axiom Space.

Les *business models* de ces projets incluent tous des activités de recherche et de fabrication en orbite (sans viser de production de série) ; Orbital Reef, pensée comme un parc d'affaires mixte ²³, proposerait en plus une activité de tourisme spatial.

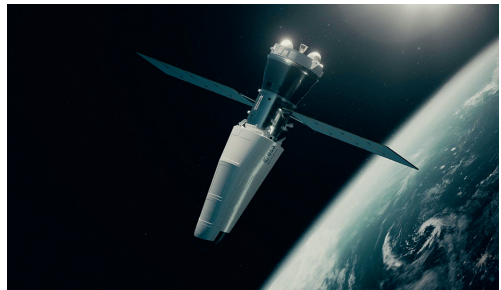
Des capacités alternatives

Un certain nombre d'acteurs se focalise davantage sur l'accessibilité aux activités en misant sur l'abaissement des coûts et l'automatisation ; logistique et heures d'astronaute (130 000 dollars US l'heure !) sont en effet des postes particulièrement lourds qui brident le développement des activités de recherche et fabrication tant par leur prix que par la limitation des capacités.

Ainsi des acteurs comme l'américain Varda Space Industries, ou des acteurs avec un ancrage France ou Europe, historiques ou récents, comme SpacePharma, The Exploration Company, Dassault Aviation, Thales Alenia



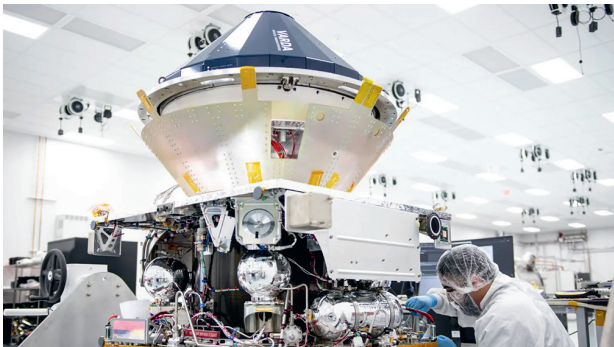
Le projet d'avion spatial orbital de Dassault Aviation, Vortex, pour répondre à des besoins de recherche en micropesanteur © Dassault Aviation / Cyrille Cosmao



Vue d'artiste de l'avion spatial de l'ESA Space Rider, qui devrait voler vers 2027 et pourra emporter des expériences en micropesanteur © ESA

23. *Mixed-use business park* selon les mots de Blue Origin.

Space, Space Cargo Unlimited ou Alatyr, misent sur des alternatives moins onéreuses : nano-satellites autonomes d'expérimentation, capsules récupérables et avions spatiaux (capables de rentrer sur Terre et réutilisables), petits laboratoires orbitaux automatisés (sans présence humaine) desservis par une logistique Terre-espace compétitive. Les perspectives applicatives en chimie pharmaceutique sont souvent ciblées.



La capsule Varda W-1 (en partie haute), ici en intégration, a mené en 2024 des expériences en orbite sur le médicament anti-VIH Ritonavir © Rocket Lab

La société Varda a, par exemple, récemment mis en orbite et récupéré plusieurs capsules orbitales, dont deux étaient munies de petits réacteurs de chimie pharmaceutique.

Tableau 1. Politique tarifaire et capacitaire de la NASA pour des activités commerciales dans l'ISS*, 2021

Ressource	Prix	Ressource annuelle disponible	Maximum autorisé par entreprise par année
Fret montant vers l'ISS	20 000 \$/kg	175 kg	50 kg / un sac de transport ¹
Fret évacué de l'ISS (déchets)	20 000 \$/kg	175 kg	50 kg
Fret ramené sur Terre	40 000 \$/kg	125 kg	35 kg
Fret aller-retour conditionné ²	90 000 \$/kg	Selon la disponibilité de la NASA	—
Fret aller-retour avec alimentation ³	120 000 \$/kg	Selon la disponibilité de la NASA	—
Temps d'équipage ISS	130 000 \$/h	90 heures	25 heures

*Uniquement pour les activités relevant de domaines de recherche sélectionnés par la NASA.

\$ = dollars US.

1. Masse de 50 kg maximum et volume maximum de 45 litres environ correspondant au volume d'un sac *standard* de transfert entre le véhicule de desserte et l'ISS.

2. C'est-à-dire maintenu en environnement contrôlé (pression, température par exemple).

3. Nécessitant une alimentation électrique notamment.

Source : extrait de « International Space Station Program - Commercial and marketing pricing policy », NASA, 2021 (traduction des auteurs).

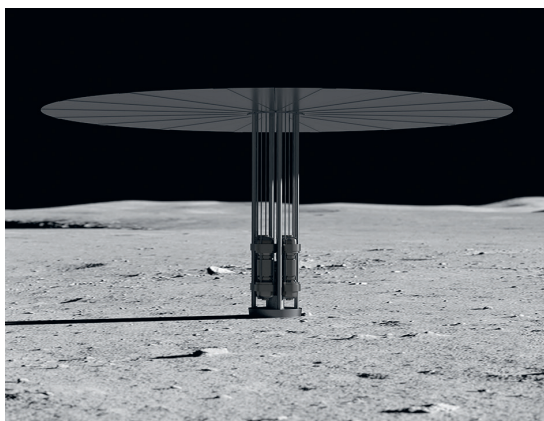
Les besoins liés au redémarrage de l'exploration spatiale habitée

L'exploration spatiale connaît, depuis une petite décennie, un regain d'intérêt, incarné en particulier par une seconde course à la Lune entre les États-Unis et la Chine (et leurs alliés respectifs). Mais le retour de l'humanité sur la Lune, prévu un peu avant ou après 2030, s'accompagne d'un rattrapage général de la Chine en matière d'exploration, d'initiatives de nations émergentes dans le spatial et même de l'implication accrue du secteur privé dans l'exploration spatiale. Les développements en cours sont encore largement robotiques (et pas encore habités, c'est-à-dire impliquant des astronautes) : grandes premières chinoises comme le retour d'échantillons de la face cachée de la Lune, projets lunaires des Émirats arabes unis ou de la Turquie, ou encore essais d'alunissage (pas toujours réussis) de sociétés privées américaines ou japonaises ces deux dernières années.

Au-delà, l'exploration habitée de la Lune avec l'ambition d'une présence permanente (qui projetterait le contexte connu avec l'ISS ces 20 dernières années, jusque sur la Lune), voire de Mars d'ici quelques décennies, devrait stimuler notablement le développement de capacités de production énergétique, de fabrication à la demande en orbite, d'agriculture spatiale et d'exploitation de ressources *in situ*. Si les défis technologiques restent considérables, il en va, selon les cas, de la faisabilité même de ces ambitions, voire de la sécurité des humains qui participeront à ces missions.

La production énergétique est prioritaire. Elle fait ainsi l'objet de travaux de développement des technologies des énergies solaire, chimique et nucléaire dans l'espace, et de microréseaux électriques à la surface de la Lune (en gravité réduite donc).

La production agricole en orbite et à la surface de corps célestes est actuellement expérimentée sous l'angle de la croissance spécifique des plantes en micro-pesanteur et en environnement fermé, d'apports



Concept NASA de réacteur nucléaire électrogène à fission semi-enterré sur la Lune © NASA

de croissance (eau, lumière, nutriments) particulièrement contraints et optimisés, ou encore sous l'angle de la lutte contre des micro-organismes indésirables. Elle est par ailleurs particulièrement importante du fait de ses liens avec les systèmes de support de vie des astronautes (cycles de l'oxygène et du dioxyde de carbone du vivant). La société Interstellar Lab, implantée en France et aux États-Unis, a par exemple été lauréate, en 2024, du *Deep Space Food Challenge* de la NASA pour son concept Nucleus de production de légumes, champignons et insectes comestibles. Elle prévoit des démonstrations en orbite dans les prochaines années.



Système de production alimentaire en environnement contrôlé NuCLEUS (Nutritional Closed-Loop Eco-Unit System), d'Interstellar Lab © Interstellar Lab

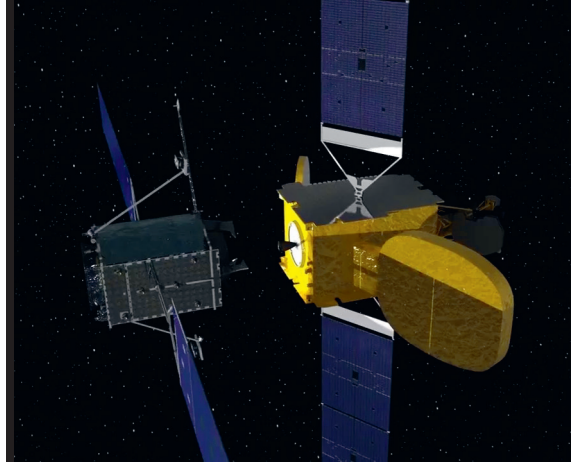
Les applications d'ISRU restent quant à elles encore éloignées car énergivores, mais les études se focalisent notamment sur la production à la surface lunaire d'eau et d'oxygène à partir des glaces du pôle Sud lunaire.

Une nouvelle gestion de l'infrastructure satellitaire

Le déploiement de mégaconstellations de satellites en orbite, comme Starlink (connectivité Internet par satellites) qui comprend désormais plusieurs milliers de satellites pour quelques milliers de tonnes en orbite et devrait être suivi de concurrents, comme Kuiper²⁴ et le chinois Guowang, est à la fois le signe d'une massification des actifs en orbite (de véritables flottes de satellites) et le signal faible d'une possible congestion du milieu spatial à certaines altitudes, sous l'effet des débris créés par les vieux satellites devenus inactifs ou du trafic densifié des nouveaux satellites. Si le modèle économique dominant à ce jour va plutôt au remplacement des satellites en fin de vie par de nouveaux modèles lancés depuis la Terre, des perspectives se font jour quant à une gestion plus durable des actifs en orbite comme le *refuelling* (ravitaillement en carburant) des satellites, ou bien leur augmentation par des *patches* de propulsion, pour au final prolonger leur durée de vie.

24. La constellation de Jeff Bezos / Amazon.

Il se développe ainsi une palette de concepts d'opérations en orbite, élémentaires ou complexes, sur les satellites, appelés services en orbite. Certains ont déjà fait l'objet de démonstrations en orbite (*refuelling* de satellites chinois, découpe métallique en orbite côté américain), voire d'applications opérationnelles (missions d'extension de durée de vie menées par Northrop Grumman). Ces opérations peuvent recourir à des tâches élémentaires, qui à la fois relèvent d'une fabrication robotique en orbite (découpe / soudure, démontage / montage, capture en orbite, amarrage / séparation entre objets) et préparent des réalisations à venir comme la fabrication d'équipements de satellites (assemblage et / ou fabrication additive de panneaux solaires, antennes, éléments de structure) directement en orbite, voire à un horizon plus lointain l'assemblage de satellites en orbite. S'il paraît en effet inenvisageable de fabriquer l'intégralité des équipements d'un satellite en orbite, la fabrication dans l'espace de pièces de grandes dimensions ou le seul assemblage à partir d'un *kit* pourraient révolutionner l'architecture actuelle des satellites (lesquels doivent aujourd'hui être repliés sous la coiffe exigüe des lanceurs ou bien résister aux vibrations et chocs de la phase de lancement) et ainsi améliorer leurs performances.



Vue d'artiste du véhicule d'extension de mission (MEV-1) du satellite *Intelsat 901* en 2020 (adjonction d'un module propulsif sur le satellite) © Northrop Grumman

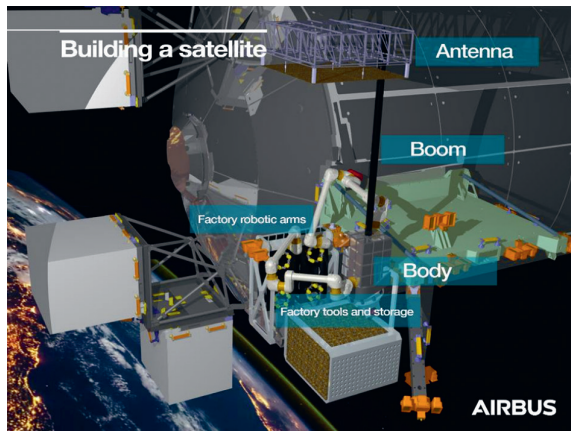


Illustration du démonstrateur PERIOD (PerAspera In-Orbit Demonstration) pour la fabrication et l'assemblage en orbite de satellite en *kit* d'Airbus © Airbus

Enfin, un concept d'économie circulaire partielle pourrait être mis en œuvre sous quelques décennies, via le recyclage plus ou moins poussé d'éléments de satellites en fin de vie pour équiper de nouveaux satellites assemblés en orbite.



Les bras robotiques spatiaux VISPA (Versatile In-Space and Planetary Arm) d'Airbus Defence and Space pour la réalisation d'opérations en orbite
© Airbus Defence and Space / tiré de la vidéo de démonstration
<https://www.youtube.com/watch?v=FrABdrcqL5g>

La perspective de grandes infrastructures orbitales de production

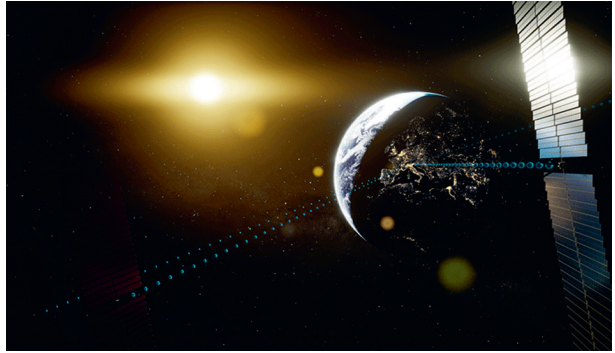
Le secteur spatial a imaginé, pratiquement depuis ses débuts, de très grandes infrastructures orbitales au service de la Terre : géo-ingénierie spatiale²⁵, grands télescopes scientifiques pour l'observation de l'Univers et, sur un registre productif, fermes solaires orbitales (captant pratiquement sans intermittence jour-nuit une énergie solaire transférable sur Terre) ou *data centers* en orbite (allégeant les consommations énergétiques et thermiques des *data centers* terrestres, et s'interfaçant aux infrastructures satellitaires de connectivité et de production de données spatiales). Si la viabilité de ces concepts n'est pas encore démontrée, c'est en particulier que leur analyse fine s'est toujours heurtée aux coûts de lancement prohibitifs d'éléments d'infrastructures si massifs.

Or, la mise en orbite progressive de la mégaconstellation Starlink vient questionner cet obstacle, d'autant plus que la rupture du lancement superlourd semble proche. En effet, SpaceX conduit actuellement les essais d'un lanceur superlourd, Starship, qui serait capable d'emporter plus de 100 tonnes en orbite en un seul lancement pour un prix au kilogramme qui pourrait être très compétitif (un à deux ordres de grandeur sous les prix de marché actuels, soit entre 100 et 1 000 dollars US le kg en orbite).

Une telle capacité de lancement pourrait ouvrir la voie à l'assemblage en orbite robotisé de grandes infrastructures spatiales (et aux activités de maintenance associées). Les centrales solaires orbi-

25. La géo-ingénierie est un ensemble de techniques visant le contrôle du climat ; le volet spatial de la géo-ingénierie reste très spéculatif.

tales pourraient constituer la cible la plus intéressante et jouer un rôle de production énergétique pour la Terre dans un contexte de crises énergétiques récurrentes, si toutefois l'intérêt net (incluant les performances de rendement énergétique ou bien les impacts environnementaux) en était démontré.



Le concept de ferme solaire du projet Solaris de l'ESA
© ESA / Andreas Treuer, 2022

En attendant de disposer d'une solution compétitive de mise en orbite de milliers de tonnes de structure et de panneaux solaires, le paysage des centrales solaires reste celui de quelques projets privés ou institutionnels (Chine, Japon, Inde, Russie, États-Unis, Royaume-Uni) au stade du papier, émaillés de quelques démonstrations technologiques intermittentes (transmission d'énergie par faisceaux laser ou micro-ondes de l'espace vers la Terre, par exemple). Mais les centrales solaires orbitales sont sans doute à ce jour les candidates les plus pertinentes à une première réalisation des concepts de chantier orbital et d'usine spatiale. ■

SESSIONS DE FORMATION FUTURIBLES

PROSPECTIVE | TERRITOIRES | VILLES | SCÉNARIOS | VEILLE | STRATÉGIE

Causal Layered Analysis Masterclass

Masterclass conducted in English by Sohail Inayatullah, political scientist and futurist
Thursday 18 September 2025 • Fees: 1,116 euros (including VAT)*

La prospective pour les territoires

Animée par Frédéric Weill, directeur d'études à Futuribles,
et Quentin Bisalli, chargé d'études à Futuribles
Jeudi 25 et vendredi 26 septembre 2025 • Prix : 1 716 euros TTC*

Futurs de villes

Animée par Isabelle Baraud-Serfaty, directrice d'Ibicity, avec la participation
de plusieurs intervenants (présentation détaillée en p. 44 de ce numéro)
Jeudi 2 et vendredi 3 octobre 2025 • Prix : 1 716 euros TTC*

Pratiques de la prospective stratégique

Animée par François Bourse, directeur d'études à Futuribles,
Cécile Désaunay, directrice d'études à Futuribles, et Quentin Bisalli
Jeudi 9 et vendredi 10 octobre 2025 • Prix : 1 716 euros TTC*

Introduction à la prospective

Animée par François de Jouvenel, délégué général de Futuribles International
Jeudi 16 octobre 2025 • Prix : 1 116 euros TTC*

La veille et l'analyse prospective

Animée par Cécile Désaunay, François de Jouvenel et Jérôme Bondu, directeur
d'Inter-ligère, spécialiste en veille et intelligence économique,
avec la participation d'un grand témoin
Jeudi 6 et vendredi 7 novembre 2025 • Prix : 1 716 euros TTC*

Atelier de construction de scénarios prospectifs

Animée par Cécile Désaunay, Quentin Bisalli et Antoine Le Bec, chargé d'études à
Futuribles, en novembre, et par François de Jouvenel, Juliette Guilbaud, chargée
d'études à Futuribles, et Antoine Le Bec, en décembre
Jeudi 20 et vendredi 21 novembre 2025 • Prix : 1 716 euros TTC*
Jeudi 4 et vendredi 5 décembre 2025 • Prix : 1 716 euros TTC*

Le design fiction et la narration au service de la prospective

Animée par Pierre-Antoine Marti, directeur d'études à Futuribles, et Antoine Le Bec
Jeudi 27 et vendredi 28 novembre 2025 matin • Prix : 1 356 euros TTC*

*Remise de 10 % pour inscription multiple dès la deuxième inscription ; dispense des frais d'inscription pour
les membres partenaires de Futuribles International (valable pour une personne par formation dans la limite
des places disponibles). Futuribles est un organisme de formation certifié Qualiopi.

Informations et inscription : Corinne Roëls • Tél. : + 33 (0)1 53 63 37 71 • croels@futuribles.com
Site Internet : <https://www.futuribles.com/formations/calendrier-des-formations/>