

N° 300
HORS SÉRIE

SCIENCE & VIE

Espace

une
nouvelle
histoire

**DANS
CE NUMÉRO
À GAGNER:
UN VOL EN
APESANTEUR**



Projet de base lunaire // Rover martien //
Enjeux géopolitiques // Course aux métaux //
Missions à venir // Télescope James Webb



BEL: 6,10 € - ESP: 6,20 € - GRC: 6,20 € - DOM S: 6,60 € DOM A: 7,90 €
ITA: 6,20 € - LUX: 6,10 € - PORT CONT: 6,20 € - CAN: 8,95 CAD - MAR: 63 MAD
TOM S: 850 CFP - TOM A: 1 600 CFP - CHE: 9 CHS - TUN: 13 TND

M 02579 - 300H - F: 5,95 € - RD



cité

sciences
et industrie



planétarium

haute définition 360°

Illustration: Hubert / J. Hubert, L. Stangor, M. P. 2014

Une publication du groupe
RE WORLD MEDIA
LEADING MEDIA GROUP

ÉDITEUR
Reworld Media Magazines SAS
Siège social: 40 avenue Aristide-Briand, 92220 Bagneux
Directeur de la publication: Gautier Normand
Actionnaire: Président Reworld Media France
(RCS Nanterre 477 494 371)
Tél. accueil: 01 41 33 55 00
www.science-et-vie.com
SERVICE LECTEURS: sev.lecteurs@reworldmedia.com

RÉDACTION
DIRECTRICE DE LA RÉDACTION: Karine Zagaroli
DIRECTEUR ADJOINT DES RÉDACTIONS SCIENCE & VIE:
Philippe Bourbeillon
ASSISTANTE DES RÉDACTIONS SCIENCE & VIE ET SCIENCE & VIE
HORS-SÉRIE: Christelle Borelli
CHEF DU SERVICE DOCUMENTATION: Marie-Anne Guffroy

RÉALISATION SCIENCE & VIE HORS-SÉRIE

COM'Presse, 6 rue Tamaç, 47220 Astaffort. Tél. 05 53 48 17 60
RÉDACTRICE EN CHEF: Danielle McCaffrey
RÉDACTRICE EN CHEF ADJOINTE: Amanda Schrepf
DIRECTEUR ARTISTIQUE: Émilien Guillon
RÉDACTRICE PHOTO: Géraldine Lafont
SECRÉTAIRES DE RÉDACTION: Amélie Borgne, Nicolas Chrétien,
Gaelle Combacon, Jérôme Le Dantec, Marion Pires,
Charlène Torres, Olivier Vignancour
ONT COLLABORÉ À CE NUMÉRO: Kheira Bettayeb, Adrien
Denèle, Simon Devos, Pascale-Emmanuelle Lapernat-
Guilhaumon, Hugo Leroux, Magali Rebeaud, Patrick Rebeaud

DIRECTION-ÉDITION
ÉDITEUR: Germain Périnet
ÉDITRICE ADJOINTE: Charlotte Mignerey

PUBLICITÉ
DIRECTRICE GÉNÉRALE: Élodie Bretaudeau-Fontailles
CONTACTS PUBLICITÉ: Nathalie Barboux (43 90),
Virginie Commun (50 28), Lionel Dufour (50 79)
PLANNING: Angélique Consoli (53 52),
Stéphanie Guillard (53 50)
RESPONSABLE TRAFIC: Catherine Leblanc (43 86)

MARKETING / INTERNATIONAL
RESPONSABLE MARKETING: Giliane Douls
PROMOTION ET PARTENARIATS: Mathilde Janier-Bonnichon

ABONNEMENTS ET DIFFUSION
DIRECTRICE MARKETING CLIENT: Catherine Grimaud
DIRECTEUR DES VENTES: Christophe Chantrel
RESPONSABLE VENTES MARCHÉ: Siham Daassa
RESPONSABLE DIFFUSION: Jacky Cabrera

RELATIONS CLIENTÈLE ABONNÉS
Une question sur votre abonnement ? Appelez-nous au 01 46 48 48 96
(de 8 h à 20 h, du lundi au samedi, prix d'un appel local).
Ou rendez-vous sur www.serviceabonmag.fr, dans votre espace client
Vous voulez vous abonner ? Rendez-vous sur www.kiosquemag.com
Par courrier: **Service abonnement Science & Vie,**
59898 LILLE Cedex 9

Pour les États-Unis et le Canada: Express Mag, 8155, rue Larrey,
Anjou (Québec), H1J 2L5, Tél. 1 800 363-1310 (français)
et 1 877 363-1310 (anglais); fax (514) 355-3332.
Pour la Suisse: Edigroup Suisse, 022 860 84 50
reworld@edigroup.ch
Pour la Belgique: Edigroup Belgique, 070 233 304
reworld@edigroup.be
Autres pays: nous consulter.
Commande d'anciens numéros et de reliures au 01 46 48 48 83

FABRICATION
DIRECTION DES OPÉRATIONS INDUSTRIELLES: Bruno Matillat
CHEFS DE FABRICATION: Agnès Chatelet, Daniel Rougier

PRÉPRESSE
RESPONSABLE DE SERVICE: Sylvain Boularand
ADJOINT: Christophe Guérin
Imprimeur: Elcograf - Italie
N° ISSN: 1966-9437
N° de commission paritaire: 1020 K 79977

Dépôt légal: février 2022



AFFICHAGE ENVIRONNEMENTAL	
Origine du papier	Finlande
Taux de fibres recyclées	0%
Certification	PEFC
Impact sur l'eau	Ptot 0,006 kg/tonne



L'énergie des étoiles

Caprice de milliardaires "testostéronés" et gabegie énergétique ?
Ou inclination naturelle de l'être humain à explorer et challenge pour
brillants innovateurs ?

Si les sommes colossales investies dans la course aux étoiles
divisent, on peut saluer ce qu'elles ont déjà apporté à notre quo-
tidien. Dans les années 1960, la recherche en innovation à la Nasa
est en ébullition. Les ingénieurs mettront au point les purificateurs
d'eau à base d'ions argent pour détruire les bactéries sans altérer
le goût. Ils optimiseront les analyses d'images par ordinateur, amé-
liorant la technique du CT-scan, le scanner de nos radiologues. Ils
inventeront l'aspirateur de poche pour emprisonner la poussière
de Lune et, quand Neil Armstrong prononce "Un petit pas pour
l'homme...", c'est muni du premier casque sans fil. Les semelles
antichocs, la lyophilisation, la couverture de survie, la souris d'ordi-
nateur, les airbags, la mousse à mémoire de forme qui rend nos
nuits plus douces, les capteurs d'images miniaturisés qui nous per-
mettent de prendre un selfie, les fermes verticales imaginées pour
les missions spatiales, le thermomètre auriculaire à infrarouge ins-
piré de la mesure de la température des étoiles. *Et cætera.*

La nouvelle conquête spatiale est désormais en marche. Et, tout
comme elle s'est emparée des panneaux solaires pour équiper ses
satellites, elle mettra une partie de ses forces dans la recherche
d'optimisations énergétiques. Avec à la clé, peut-être, de futures
solutions pour le climat des Terriens.

Danielle McCaffrey

9 C'est dit

Quand les personnalités sont inspirées par l'espace

RÊVER

12 Objectif Mars

Course politique, découvertes scientifiques, hypothèse de colonisation... les regards se tournent vers la Planète rouge.

18 Objectif Lune

Notre satellite naturel sera le tremplin de la nouvelle conquête spatiale.

24 Lanceurs réutilisables, le bond technologique

La *rocket science* se spécialise dans la récupération et l'optimisation.

28 Objectif Vénus

Trois nouvelles missions se préparent à étudier celle qui ressemble le plus à la Terre sur le plan physique.



EXPLORER

36 Un manuel de géopolitique à ciel ouvert

De nouveaux pays se lancent dans la course aux étoiles, défiant les grandes puissances pionnières.

44 Là-haut, ça tourne !

Exit les effets spéciaux, le 7^e art russe et américain parie désormais sur les effets spatiaux, rappelant de vieilles rivalités politiques.

46 Tourisme, pour quelques minutes d'impesanteur

Virgin Galactic, SpaceX, Blue Origin, Axiom Space... Le guichet de réservation de vols orbitaux et suborbitaux privés est ouvert.

54 À quoi servent les vols zéro-G ?

Les avions zéro-G sont des laboratoires scientifiques permettant de s'approcher des conditions d'impesanteur de l'ISS.

56 Animostronautes

Avant l'homme, il y a eu dans l'espace ces héros à quatre pattes et plus.

DANS
CE NUMÉRO
À GAGNER:
UN VOL EN
APESANTEUR
en page 6

Recevez Science & Vie
et ses Hors-Série

Votre bulletin d'abonnement
se trouve en p. 81. Pour commander
d'anciens numéros, rendez-vous
sur www.kiosquemag.com

Vous pouvez aussi vous abonner
par téléphone au 0146 48 47 08 ou
par internet sur www.kiosquemag.com



DÉCOUVRIR

- 64** Prêts à tout pour internet ?
L'accélération des lancements de constellations de satellites pose la question de l'obstruction de l'orbite terrestre et du risque de collisions.
- 70** Gaz à effet de serre, la traque depuis l'espace
Ces satellites surveillent les émissions de méthane et, bientôt, de dioxyde de carbone.
- 76** Dans la valise de Thomas Pesquet
Six mois de mission à bord de l'ISS et une centaine d'expériences scientifiques effectuées.
- 82** Une journée dans l'ISS
Comment se lave-t-on ? Quels sont les aliments autorisés et sous quelle forme ? Quelle législation régit la station ?
- 84** La ruée vers les astéroïdes
Les scientifiques travaillent sur la façon d'extraire les minerais dont regorgent ces objets célestes.



IMAGINER

- 90** Le télescope spatial du siècle paré à sonder
Lancé le jour de Noël, James Webb se prépare à révéler les secrets des premières galaxies.
- 98** Les limites humaines de la conquête spatiale
Adapté à la vie terrestre, notre corps n'est pas encore prêt à affronter les conséquences d'un long voyage dans l'espace.
- 102** "Explorer est à la fois un droit et un devoir"
Jacques Arnould, docteur en histoire des sciences et en théologie, veille également sur l'éthique de l'espace au Cnes.



INTERROGER

- 110** Questions Réponses
- 114** On en parlait déjà
- 118** Et ça, l'avez-vous lu ?
- 120** Space culture

ERRATUM

n° 298 – page 59
Une erreur s'est glissée dans la citation de Charlotte Martial, neuropsychologue au Coma Science Group de l'université de Liège. Il fallait lire : "Cela reste une hypothèse, nous restons très prudents car nous n'avons pas de preuves empiriques."



ÉVÈNEMENT

TENTEZ DE GAGNER

un vol en apesanteur

avec

SCIENCE & VIE

cnes

Pour son numéro anniversaire, Science&Vie et le CNES vous font gagner **un vol en apesanteur à bord de l'Airbus A310 Zéro-G** de la société Novespace, basé sur l'aéroport de Bordeaux-Mérignac.

Le lecteur qui gagnera va vivre une aventure hors norme aux côtés de scientifiques qui, lors de ces vols, réalisent des expériences en physique, biologie, physiologie... mais également testent des dispositifs spatiaux ou préparent de futures missions spatiales habitées.

2 campagnes de vols, comprenant chacune 3 vols, sont organisées chaque année par le CNES (Centre national d'études spatiales). Cet avion peut accueillir une quarantaine de personnes et offre un espace aménagé de plus de 200 m³. Le vol Zéro-G permet à ses passagers de vivre une succession de courtes périodes d'apesanteur (environ 20 secondes chacune) à bord de l'avion, qui répète plusieurs fois une manœuvre aérienne particulière, à savoir une parabole.

À GAGNER

1 VOL À BORD
de l'Airbus A310 Zéro-G
prévu au mois
de septembre 2022

2 gagnants seront tirés au sort
parmi les bonnes réponses.

Le premier aura le grand privilège de voler, le 2^e sera suppléant. Il devra être présent et prêt à partir au cas où le premier passager ne pourrait pas décoller.

À noter que les gagnants, majeurs, devront passer un test médical poussé et devront présenter toutes les aptitudes pour pouvoir voler. En cas de contre-indication, un nouveau gagnant sera tiré au sort.



COMMENT PARTICIPER ?

> Répondez correctement aux questions suivantes : ←

1 Quelle est la seule agence spatiale à avoir formellement intégré l'éthique à son organisation ?

1

2 Combien de paraboles sont exécutées lors de chaque vol scientifique ?

2

3 Pour quand est prévu le premier vol exo-atmosphérique avec atterrissage du lanceur européen Themis ?

3

> Renvoyez-nous la page avant le **17/03/2022** ou sa copie avec vos coordonnées complètes à l'adresse suivante : Science & Vie - Service Marketing - 40, avenue Aristide Briand - 92120 Bagneux

> ou connectez vous sur science-et-vie.com

Les gagnants seront tirés au sort. La remise des prix se fera le 26 mars 2022 au salon du voyage scientifique « Terra Scientifica » à la Cité des sciences et de l'industrie, à Paris.

Nom* : Prénom* :

Adresse postale* :

Portable ou fixe* :

Email* :

En cochant cette case, j'accepte de recevoir la newsletter de Science & Vie.

En cochant cette case, j'accepte de recevoir des offres commerciales de Reworld Media Magazines ainsi que des autres sociétés du Groupe Reworld Media.

Les informations recueillies à partir de ce formulaire font l'objet d'un traitement informatique fondé sur votre consentement et destiné à Reworld Media Magazines en sa qualité de responsable de traitement. Les finalités poursuivies sont la gestion de votre participation au jeu et le cas échéant, l'envoi de prospections commerciales. Les champs comportant une astérisque (*) sont à renseigner obligatoirement pour traiter votre demande. Conformément à la loi Informatique et Libertés n°78-17 modifiée, vous disposez notamment des droits d'accès, rectification, effacement, limitation de vos données. Vous pouvez vous opposer au traitement de vos données. Pour en savoir plus, veuillez consulter notre Politique de confidentialité. Pour exercer vos droits, écrivez à : Reworld Media Magazines - DPD Service juridique, 40 avenue Aristide Briand - 92227 Bagneux Cedex ou par mail : dpx@reworldmedia.com. Vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL - www.cnil.fr. Crédit photos : © CNES.

Extrait de règlement : Reworld Media Magazines organise, jusqu'au 17 mars 2022, le concours « Vol Zéro-G », comportant un aléa, gratuit et sans obligation d'achat. Ce concours est ouvert aux majeurs âgés de plus de 18 ans résidant en France Métropolitaine (Corse comprise). Les gagnants seront déterminés après leur participation selon les modalités prévues au règlement du concours disponible gratuitement sur le site <https://www.science-et-vie.com>.

ROBOBOX

SCIENCE & VIE



Apprenez les bases de la robotique à tout âge

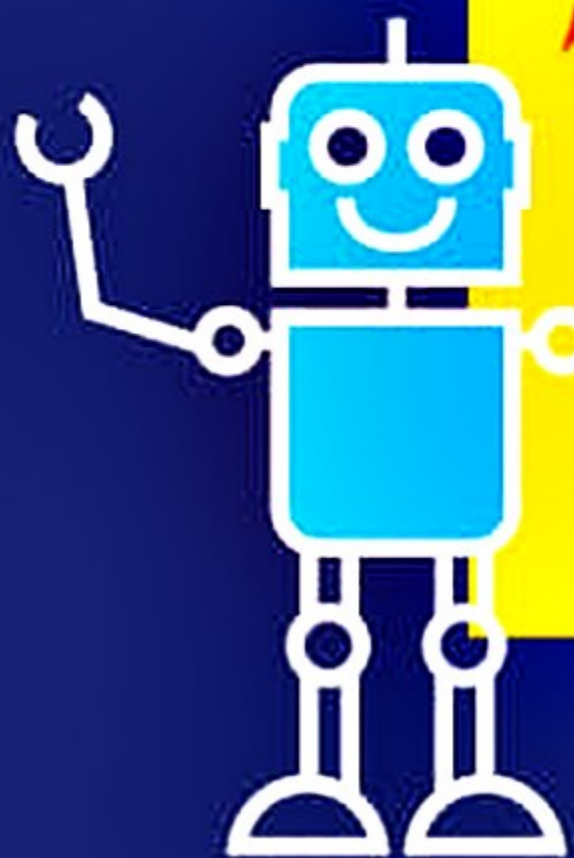
Robobox est la méthode indispensable pour apprendre les bases de la robotique et de la programmation, en construisant, chaque mois, un robot toujours plus évolué. Vivez votre passion de la robotique en découvrant, à l'aide des différents kits, de nouvelles notions de mécanique, de programmation ou d'électronique.

3 ÂGES, 3 NIVEAUX DE DIFFICULTÉ & 12 BOX POUR APPRENDRE !

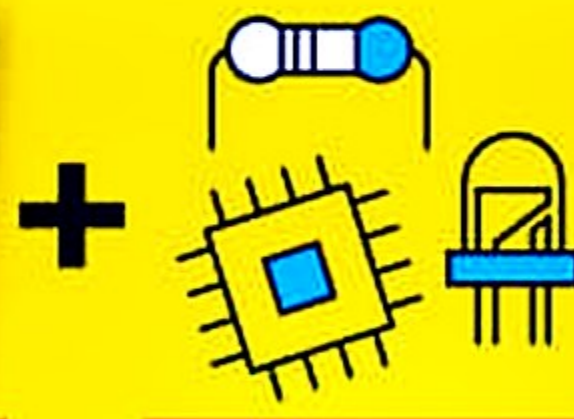


La gamme Robobox s'agrandit avec **Robobox Science & Vie Découvertes** pour les 8-13 ans.

UN KIT PAR MOIS AVEC DES EXCLUSIVITÉS ROBOBOX ET UN ACCÈS AU CLUB



Un manuel d'apprentissage



Des composants



Une aide en ligne



TOUTES NOS OFFRES SUR ROBOBOX.FR

**"- Et maintenant on va sur la Lune!
On va sur la Lune avec un insecte!
- Avec un insecte?
- Avec un insecte module!"**

**Hubert de Tartas et Paul Fournier,
PERSONNAGES DE FICTION (HIBERNATUS, 1969).**



"Ce n'est pas parce que j'étais une femme astronaute que j'ai essayé de me comporter en homme. Non, je suis restée une femme et une astronaute. Je suis les deux. Et je pense que c'était un plus dans une mission"

**Claudie Haigneré, ASTRONAUTE
(CONGRÈS SCIENTIFIQUE DES ENFANTS À LA CITÉ DE L'ESPACE DE TOULOUSE, MAI 2013)**

C'EST CREDIT

"Confinés dans un creux de la Terre, nous croyons en habiter le haut, nous prenons l'air pour le ciel et nous croyons que c'est le véritable ciel où les astres se meuvent"

**Socrate,
PHILOSOPHE GREC
(PHÉDON DE PLATON,
360 AV. J.-C.)**



***"Vers l'infini,
et au-delà !"***

Buzz l'Éclair, PERSONNAGE ANIMÉ (TOYSTORY, 1995)



"Sans même s'en rendre compte, au moment où l'astronomie entrait dans un âge d'or, la plupart des gens se sont coupés du ciel, un isolement cosmique qui n'a pris fin qu'avec l'avènement de l'exploration spatiale"

**Carl Sagan, SCIENTIFIQUE
(CONTACT, 1985)**

"C'est creux... jusqu'à l'infini... et... Oh ! Mon Dieu, c'est plein d'étoiles"

**David Bowman, PERSONNAGE DE FICTION
(2001, L'ODYSSÉE DE L'ESPACE, D'ARTHUR CHARLES CLARKE, 1968)**

The background of the page is a reproduction of the painting 'The Starry Night' by Vincent van Gogh. It features a turbulent, swirling night sky filled with bright, glowing stars and a crescent moon. In the foreground, a dark, silhouetted cypress tree stands prominently against the vibrant, blue and yellow sky. The overall mood is one of awe and wonder, fitting the theme of the page.

REVER

12 Objectif Mars

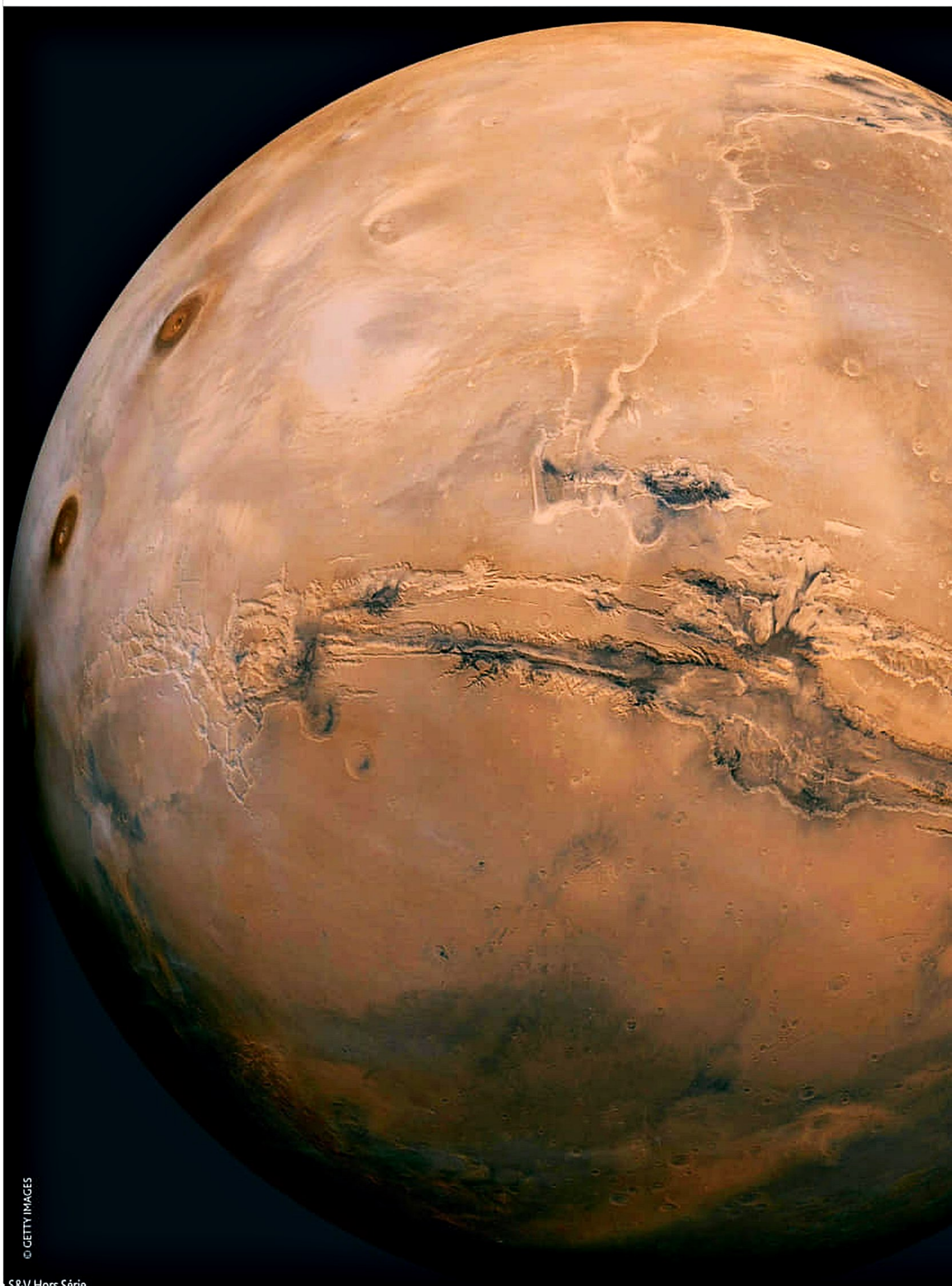
18 Objectif Lune

24 Lanceurs réutilisables : le bond technologique

28 Objectif Vénus



© William Turner / Getty Images





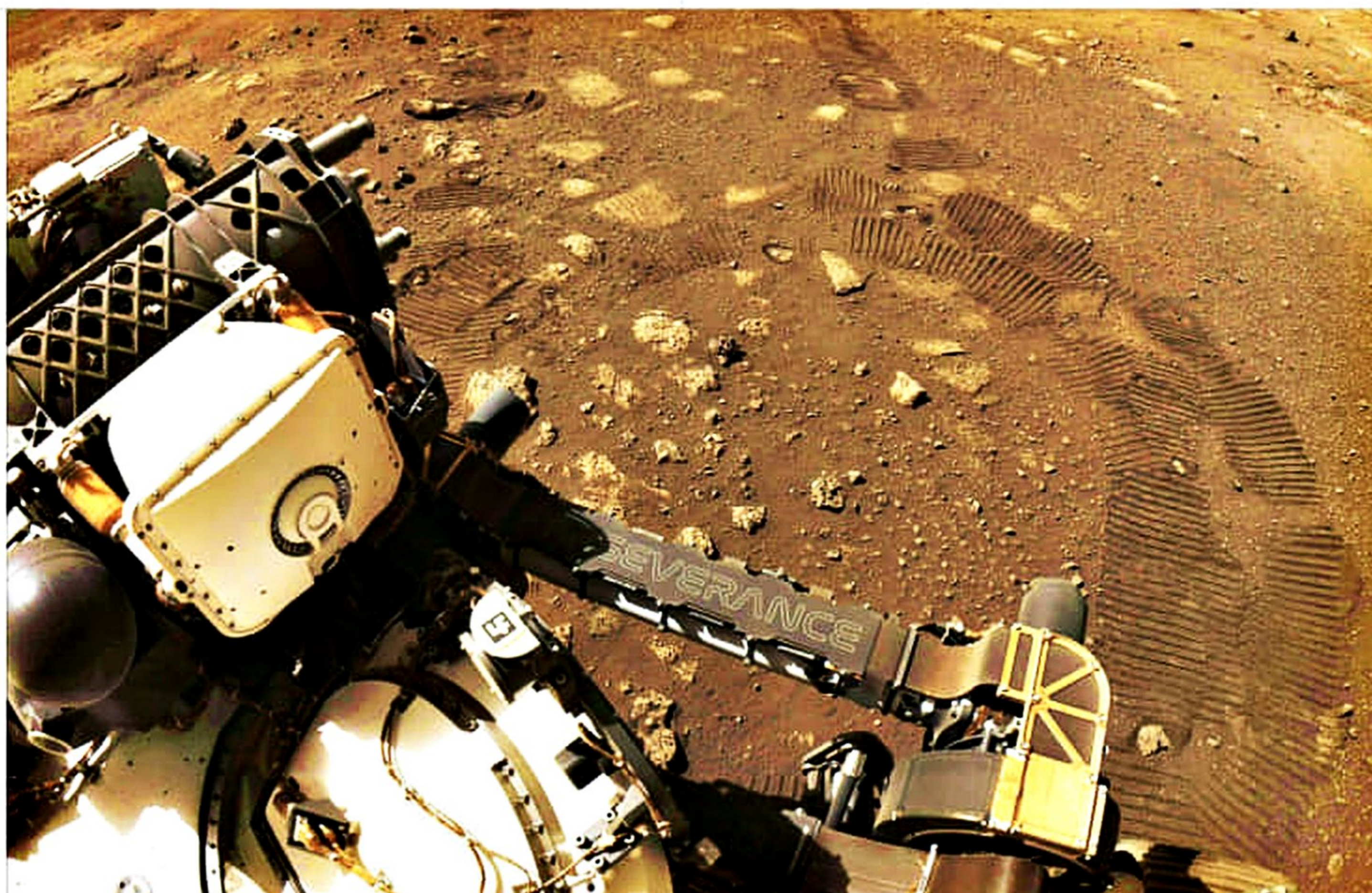
objectif Mars

Survie de l'humanité, motivations scientifiques ou politiques... les raisons d'explorer cette planète sont multiples. Tout comme les obstacles pour l'atteindre. PAR MAGALI REBEAUD

Novembre 1964, la sonde américaine Mariner 4 effectue le premier survol de Mars. Depuis, une soixantaine de missions d'explorations robotisées ont été envoyées (dont seule la moitié a atteint sa cible). De nombreuses données ont été recueillies, comme la présence de méthane. On sait aussi que, dans le passé, de l'eau a coulé à sa surface.

En 2021, la sonde Hope des Émirats arabes unis a été mise en orbite autour de Mars. La mission chinoise Tianwen-1 l'a suivie, puis Mars 2020 de la Nasa, avec son rover Perseverance. Celui-ci a récemment confirmé que le cratère Jezero (son lieu d'atterrissage) avait bien abrité un lac. *« Actuellement, on compte huit véhicules en orbite polaire autour de Mars, ainsi qu'un atterrisseur et trois rovers à sa surface. Ce qui est assez exceptionnel. Un des objectifs de ces missions et de ces engins spatiaux est de préparer l'exploration humaine. À bord du rover Curiosity de la Nasa, une expérience vise par exemple à mesurer le taux de radiations que les astronautes seraient susceptibles de subir. Quant à Perseverance, il embarque l'instrument Moxie (Mars Oxygen In-Situ Resource Utilization*

- Température: elle peut varier de +30°C à -140°C durant la nuit
- Distance Terre-Mars: 54,6 millions de km au plus proche
- Période orbitale (un tour autour du Soleil): 687 jours terrestres
- Rotation sidérale (un tour sur elle-même): 1,037 jour terrestre
- Pesanteur à la surface: 3,721 m/s², soit 2,6 fois moins d'effet de pesanteur que sur la Terre



Experiment) qui a pour but de produire de l'oxygène à partir du dioxyde de carbone de l'atmosphère martienne", indique Sylvestre Maurice, astrophysicien à l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie (Irap). Mais il s'agit aussi d'en savoir davantage sur la composition de la Planète rouge. Ainsi, en septembre 2022, le rover Rosalind Franklin de la mission ExoMars de l'Agence spatiale européenne (Esa) emportera plusieurs instruments, dont un minilaboratoire capable d'analyser les échantillons extraits du sous-sol martien par une foreuse. Dans le cadre de la mission Mars Sample Return, conjointe entre la Nasa et l'Esa, deux autres engins spatiaux devraient être lancés en 2026, afin de récupérer les échantillons avec un retour prévu en 2031.

Si l'on sait désormais lancer des sondes et poser des rovers à la surface de Mars, de multiples obstacles restent encore à surmonter avant d'espérer y envoyer des humains.

LES LOIS DE LA MÉCANIQUE SPATIALE

Y poser le pied est l'*horizon goal* de la politique spatiale américaine. C'est aussi l'intention de la Chine et d'un certain Elon Musk à la tête de SpaceX. Mais avant de penser à la manière de s'y rendre, ayons à l'esprit que le voyage, soumis aux lois de la mécanique spatiale, sera long. La Terre et Mars bougent chacune à un rythme différent. Mars met 687 jours (terrestres) à faire le tour du Soleil. La distance entre

▲ Le 18 février 2021, le rover Perseverance s'est posé sur Mars. Il doit notamment chercher des traces de vie microbienne anciennes sur le sol.

la Terre et Mars varie ainsi constamment et, au plus proche, elle avoisine les 55 millions de kilomètres.

"Deux types de scénarios sont possibles. Le premier : l'équipage décolle au moment le plus favorable intervenant tous les 26 mois, quand l'énergie pour aller vers Mars est minimale – ce que l'on appelle les transferts de Hohmann. Avec les systèmes de propulsion actuels, basés sur la combustion chimique de l'hydrogène – ou du méthane – et de l'oxygène, il faut compter environ 210 jours pour arriver sur Mars. Les astronautes séjournent alors environ 500 jours sur le sol martien, jusqu'à l'ouverture de la fenêtre de lancement la plus favorable, puis leur retour dure également 7 mois. Au total, une mission de plus de 900 jours. Dans le second scénario, le trajet aller se déroule dans les mêmes conditions, mais le séjour sur Mars n'est que de 30 jours. Le retour s'effectue donc dans une configuration moins favorable et dure environ 430 jours. L'avantage de cette option, actuellement retenue par la Nasa, est de réduire la durée totale de la mission à 670 jours", explique Didier Schmitt, responsable du Groupe stratégie & coordination à la direction de l'exploration humaine et robotique de l'Esa. Dans les deux cas, des solutions doivent être trouvées pour limiter les risques liés aux radiations

et à l'impesanteur (*décalcification des os, atrophie des muscles, entre autres. Voir p. 98*). Il faut aussi se pencher sur l'impact psychologique que peut avoir un tel isolement et confinement sur les astronautes. D'autant qu'il sera impossible de communiquer en temps réel avec la Terre. Chaque transmission radio sera retardée de 4 à 24 minutes, selon l'éloignement du vaisseau et la position des planètes.

LA LUNE EN BANC D'ESSAI

"Si l'idée que l'homme ira un jour sur la Planète rouge semble acquise, la question du comment est encore floue", souligne Francis Rocard, responsable du Programme d'exploration du système solaire au Cnes et auteur de *Dernières nouvelles de Mars* (éd. Flammarion). Concernant le transport de l'équipage et du matériel, la tâche est titanesque ! La Nasa évoque le principe d'un "train spatial", un vaisseau de 300 à 500 tonnes, assemblé en orbite basse terrestre et constitué de différents modules (habitat, propulsion, stockage...), lancés par le SLS, Space Launch System. Le système de propulsion serait chimique dans un premier temps. Par la suite, la Nasa souhaite recourir à l'énergie nucléaire thermique, au rendement deux fois plus élevé qu'un réacteur chimique. On estime à une dizaine

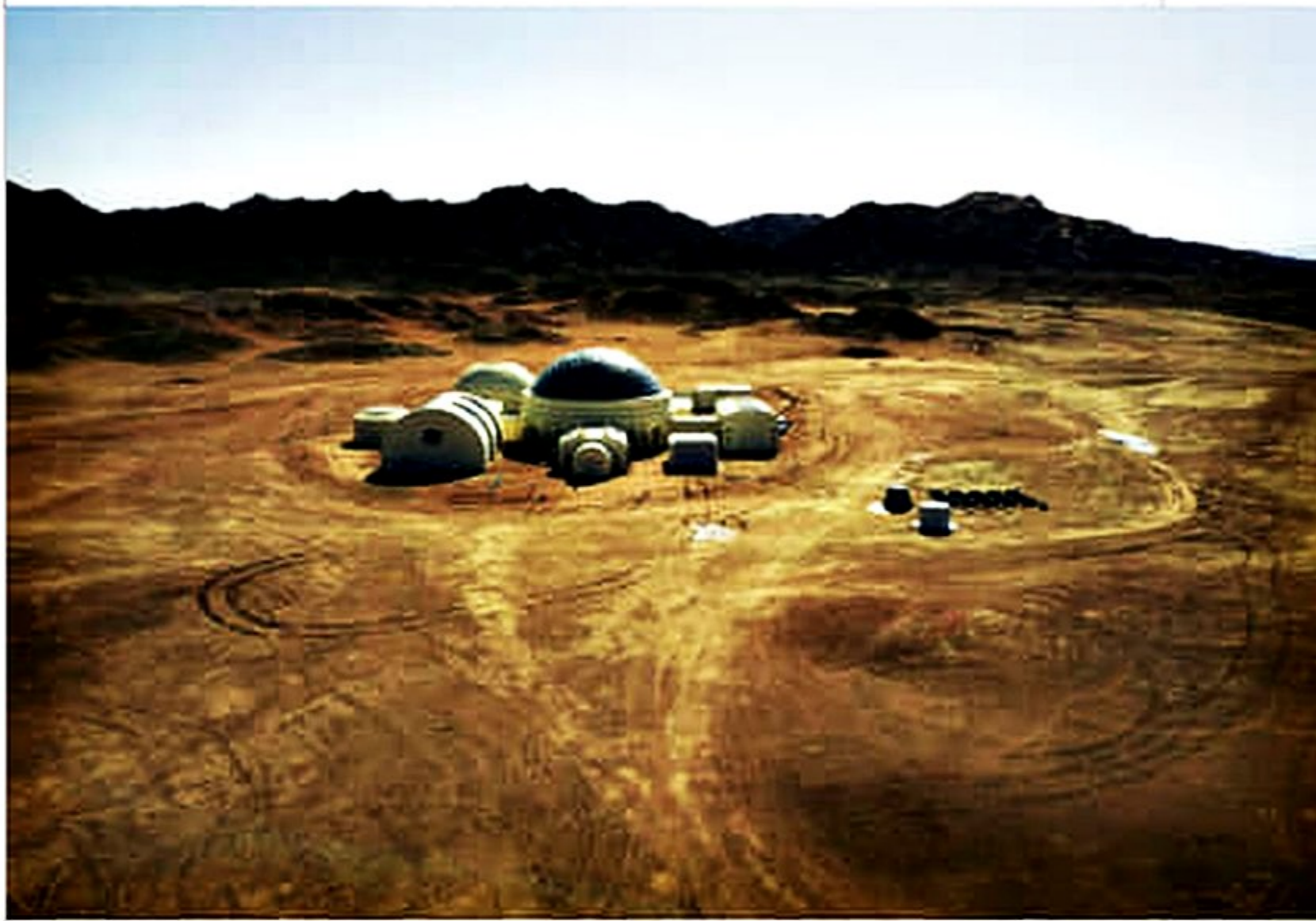
le nombre de lancements du SLS pour assembler le vaisseau... sachant qu'un lancement coûte quelque 4 milliards de dollars !

"L'engin spatial devra posséder toutes les servitudes nécessaires pour assurer les fonctions du voyage aller et retour. Si, dans un premier temps, on opte pour rester en orbite ou effectuer un survol rapide de la planète, le vaisseau seul est suffisant. Pour un atterrissage sur Mars, un second véhicule doit être envoyé au préalable. L'équipage y serait transféré en orbite martienne, pour ensuite aller se poser sur la planète. Pour une mission de courte durée – un mois –, l'atterrisseur devra incorporer toutes les ressources nécessaires aux astronautes pour leur séjour martien", précise Francis Rocard. Pour un séjour de longue durée, une véritable infrastructure de base martienne devra être envoyée et assemblée au préalable.

Le lanceur lourd SLS est actuellement en développement dans le cadre de la "mission Lune", tout comme le module Orion pour embarquer l'équipage. Et, le véhicule mobile pressurisé pourra être dérivé du rover lunaire en cours d'étude. Il reste cependant plusieurs inconnues à résoudre dans l'équation de la Nasa. "Outre l'équipage, il faudra faire atterrir un rover pressurisé, ainsi qu'un module contenant le

Le modèle de méga-fusée Starship de l'entreprise privée SpaceX est le plus grand jamais conçu. Ici, SN15 et SN16, en octobre dernier à Boca Chica, au Texas.





◀ La compagnie chinoise C-Space a installé la Base 1 dans le désert de Gobi. Un habitat coupé du monde (sauf pendant les visites) pour simuler la vie sur Mars. Sous ses dômes, on trouve une serre, une salle de restauration, un espace nuit, un sas de contrôle.

lanceur jamais construit. Elon Musk voit grand, très grand ! Ce Starship System, entièrement réutilisable et potentiellement capable de transporter jusqu'à 100 tonnes à la surface de la plupart des corps du système solaire, commence à être construit en série.

Le voyage vers Mars paraît, sur le papier, relativement simple à bord de l'engin SpaceX. Le Super Heavy, équipé de 29 moteurs Raptor fonctionnant à l'oxygène et au méthane (molécules que l'on peut théoriquement fabriquer sur Mars), embarque à son sommet le Starship – qui compte 6 moteurs –, jusqu'en orbite terrestre où il s'en libère. Le booster rejoint alors la base de lancement et repart, coiffé d'un nouveau Starship "version tanker". Ce dernier accoste sur le premier Starship, en orbite, pour lui transférer le carburant (jusqu'à cent tonnes d'oxygène liquide et de méthane liquide), avant de revenir sur Terre. Huit à dix lancements semblent nécessaires pour ravitailler suffisamment l'engin... Réservoirs pleins, le premier Starship entame alors son long périple. Arrivé dans l'atmosphère martienne, il utilise alors ses propulseurs de contrôle de réaction pour effectuer sa descente, selon un angle d'attaque d'environ 70° à 80°. À l'approche du sol, le vaisseau se remet en position verticale pour se préparer à l'atterrissage. D'un volume de 1 000 m³, les Starship pourraient, en attendant que les premiers habitats martiens sortent de terre, servir en outre de lieu de vie aux premiers colons.

MARS N'EST PAS UN PLAN B

Après plusieurs essais infructueux, SpaceX a réussi en mai dernier à lancer, puis à faire atterrir, l'un des prototypes de son Starship (SN15). Aujourd'hui, la

propergol nécessaire pour repartir. Trois atterrisseurs d'une capacité de 30 à 50 tonnes seront ainsi indispensables. Or actuellement, on ne sait pas faire atterrir plus de 2 tonnes", souligne Didier Schmitt. Le système d'entrée avec bouclier thermique gonflable pour l'atterrissage des hommes et du fret n'existe pas non plus, si ce n'est sous forme de concepts.

La Nasa a émis l'hypothèse d'envoyer une première mission habitée d'ici à 2040, avec un séjour de 30 jours sur le sol martien. La Lune servira de banc d'essai et de plateforme de démonstration pour les technologies d'utilisation des ressources *in situ*. Par ailleurs, comme l'évoque un récent livre blanc rédigé par une équipe de la Nasa et de plusieurs universités américaines, la collaboration Nasa-SpaceX pourrait s'étendre au-delà du programme Artemis (mission lunaire) ; certains développements de SpaceX bénéficiant alors à la Nasa... Un intérêt technologique, bien sûr, mais aussi économique.

À Boca Chica Village, au Texas, sur sa gigantesque base, SpaceX conçoit actuellement une fusée super lourde, le Starship System, composé du booster Super Heavy, et du vaisseau spatial Starship. Un ensemble de 120 m de haut, soit le plus grand

“ Si l'idée que l'homme ira un jour sur la Planète rouge semble acquise, la question du comment est encore floue ”



société annonce le lancement d'une première mission vers Mars, sans équipage, en 2024 et vise une possible mission habitée pour 2026. D'ici là, Elon Musk envisage un vol orbital en début d'année.

La Chine de son côté, avec l'atterrissage de son rover Zhurong en mai 2021, est devenue – après l'Union soviétique et les États-Unis – la troisième puissance spatiale à parvenir à se poser sur Mars et la seconde à y opérer un rover (après les États-Unis). L'engin explore actuellement la surface de la planète pour la cartographier, ainsi qu'analyser le sol et l'atmosphère. Wang Xiaojun, directeur de l'Académie chinoise de technologie des lanceurs, a récemment annoncé que la Chine comptait dans un premier temps envoyer des robots et des systèmes d'extraction des ressources, afin d'étudier les sites susceptibles de recevoir une base habitée. Une mission aller-retour, sans équipage, visant à prélever des échantillons, est prévue fin 2030. L'Agence spatiale chinoise évoque la possibilité d'une première mission habitée en 2033.

Dans cette compétition, l'Esa ne cherche pas à rivaliser, mais à être présente. L'Europe ne souhaite pas se doter d'un lanceur "super-lourd" ; une démarche jugée impossible, ne serait-ce que financièrement. Le budget de l'Esa est de 6,5 milliards d'euros par an, dont 700 millions seulement sont consacrés aux programmes d'exploration. Elle veut toutefois devenir un partenaire incontournable dans

▲ Une maquette du rover chinois Zhurong de la mission Tianwen-1, qui s'est posé sur Mars le 14 mai, est exposée au salon Airshow China, qui s'est tenu à Zhuhai en septembre. Alimenté par 4 panneaux solaires, il a mené sa mission au-delà des trois mois prévus initialement.

le cadre de l'exploration martienne (comme elle l'est pour les futures missions lunaires) en demandant une augmentation budgétaire, pour atteindre le milliard par an, d'ici à 2025. "Au Conseil des ministres de l'UE, en novembre 2022, nous présenterons un plan stratégique avec, entre autres, des propositions qui nous permettraient de jouer un rôle clé au sein du programme robotique et habité de Mars. En consultation avec les industriels européens du secteur, plusieurs options sont envisagées, telles que le développement de stations météorologiques en orbite et au sol, d'un atterrisseur pour une mission robotique qui suivrait celle d'ExoMars, ou encore d'un simulateur d'habitat pour la phase de transfert vers Mars", expose Didier Schmitt.

Mais pourquoi vouloir envoyer des hommes sur Mars ? Pour Elon Musk, c'est une nécessité car la Terre sera de plus en plus invivable, polluée et soumise au réchauffement climatique. Vision insensée pour nombre de scientifiques qui estiment que Mars n'est pas un plan B, mais qu'y aller offrira l'opportunité d'étudier sur place un point fondamental pour l'humanité : la vie existe ou existait-elle ailleurs dans l'Univers ? ■





L'objectif Lune

Un demi-siècle après les premiers pas sur notre satellite naturel, la course est relancée. Un nouvel élan qui devrait permettre de réaliser un bond de géant vers Mars. PAR MAGALI REBEAUD

Le 20 juillet 1969, Neil Armstrong y posait les pieds. Mais, après le succès de six missions jusqu'à Apollo 17 en 1972, personne n'y est retourné. L'objectif politique était atteint et la communauté scientifique ne semblait plus suffisamment mobilisée pour poursuivre cette aventure, face aux enjeux financiers et à la défaveur de l'opinion publique. Les missions ont alors été principalement consacrées aux vols en orbite basse et aux expérimentations à bord de la Station spatiale internationale.

Aujourd'hui, Mars est dans tous les esprits. Avant d'y mettre le cap, les ingénieurs visent de nouveau la Lune, qui apparaît comme un laboratoire idéal et une base avancée. Les Américains sont les favoris mais la Chine se présente comme un sérieux rival. L'Europe, elle, tient un rôle majeur en tant que partenaire dans le programme américain. L'idée faisant consensus est donc de retourner sur notre satellite, d'y établir une présence permanente pour mettre au point les équipements, tester les protocoles... et les humains ! La "proximité" de la Terre permettrait, en outre, d'intervenir en cas de problème. Car s'il faut trois jours pour atteindre la Lune, il faudra plus de six mois pour rejoindre Mars.

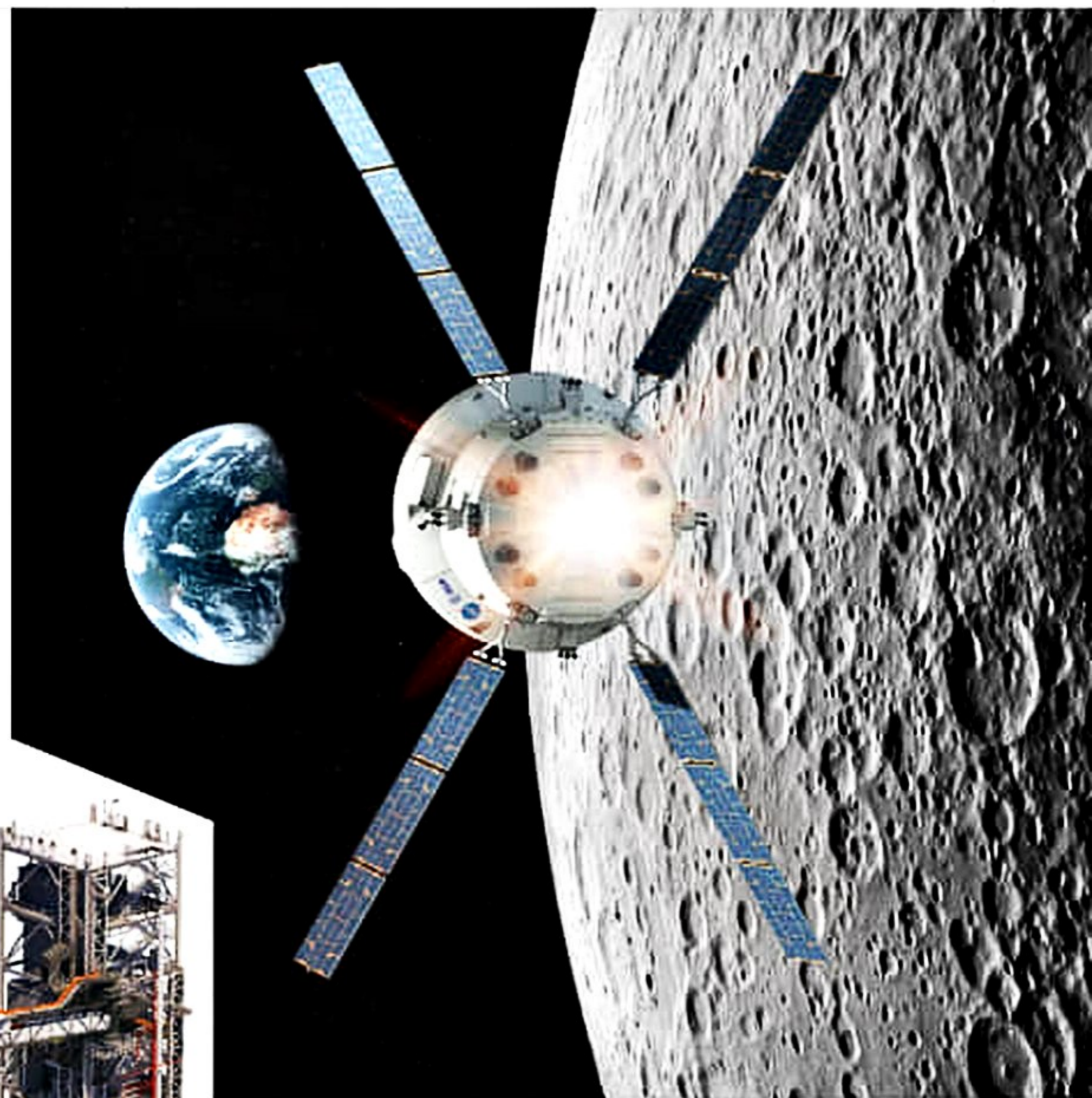
- Température: de 150°C le jour à -170°C la nuit environ
- Distance Terre-Lune: 384 400 km
- Période orbitale (un tour autour de la Terre): 27,32 jours
- Rotation sidérale (un tour sur elle-même): 27,32 jours
- Pesanteur à la surface: 1,62 m/s², soit 6 fois moins d'effet de pesanteur que sur la Terre

Par ailleurs, deux études de la Nasa, publiées en octobre 2020 dans la revue *Nature Astronomy*, ont apporté les preuves de la présence de molécules d'eau sur la surface de notre satellite naturel. Cette découverte aussi importante que stratégique permet d'envisager d'économiser son transport depuis la Terre... et par ricochet celui de l'hydrogène et de l'oxygène. Car l'eau lunaire, piégée dans des micro-cratères sous forme de glace, mais aussi dans le sol en très faible quantité, pourrait être recueillie pour produire de l'eau liquide. L'énergie fournie par des panneaux solaires permettrait, par électrolyse, d'obtenir de l'oxygène pour les astronautes et de l'hydrogène. La combinaison des deux servirait également à la propulsion des engins spatiaux.

Le régolithe, poussière qui recouvre le sol lunaire et composé de fragments d'impacts météoritiques, pourrait, quant à lui, servir de matériau de construction. La Nasa comme l'Esa étudient ainsi la possibilité de créer une base lunaire grâce à l'impression 3D, une technique qui pourrait être ensuite appliquée sur Mars. Et, si l'on sait déjà faire pousser des végétaux dans l'ISS, l'idée est de réussir à en cultiver sur la Lune – le ravitaillement des équipages et la provision de nourriture fraîche se compliquant avec l'allongement des durées des missions. *"La Lune étant à 'portée de Terre', aussi bien visuellement que par radio et en accès relativement rapide par vaisseau, elle peut véritablement servir de tremplin sur le plan technologique, et surtout opérationnel. Apprenons ainsi sur la Lune ce que l'on veut faire un jour sur Mars!"*, expose Jean-François Clervoy, ancien astronaute de l'Esa.

AMBITIEUX ARTEMIS

Enfin, la réalisation de ces missions apporterait aussi des bénéfices pour notre planète. En effet, la



Sauf contre-ordre, le lancement du vaisseau Orion (ci-dessus) s'effectuera le 12 février 2022. Une mise en orbite lunaire réalisée par le puissant lanceur SLS, de 98 m de haut (ci-contre). À terme, le programme Artemis de la Nasa prévoit d'installer la Lunar Orbital Platform Gateway (à droite), base de recherche scientifique et d'impulsion vers Mars.

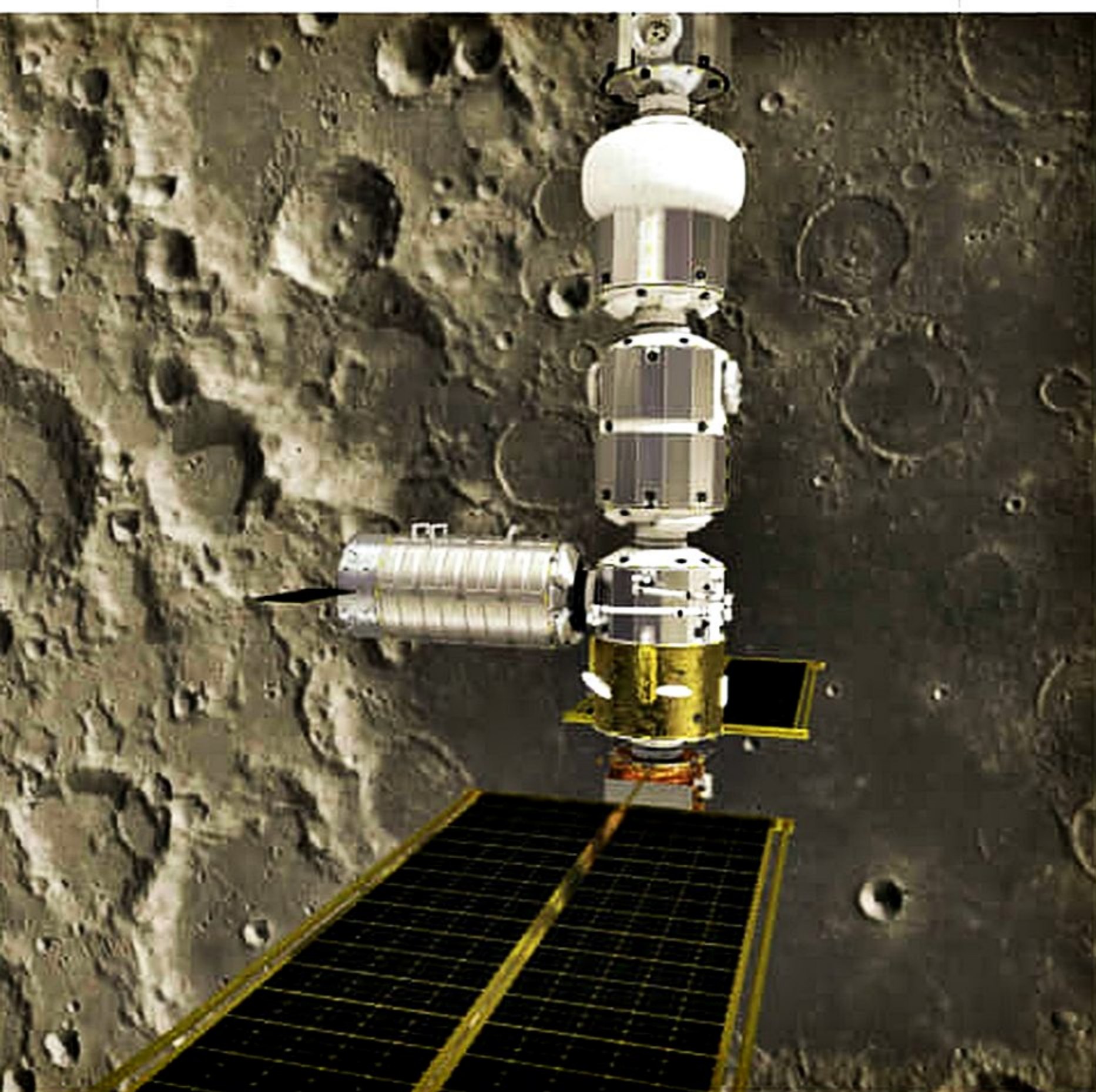


Lune peut aussi devenir un lieu d'observation de la surface de la Terre, de son atmosphère et de sa biosphère, améliorant ainsi la capacité des scientifiques à prévoir les risques climatiques, météorologiques et naturels.

Renvoyer des humains sur la Lune est donc devenu une priorité pour les États-Unis et la Nasa, qui a lancé l'ambitieux programme Artemis. Celui-ci requiert le développement de plusieurs engins : un nouveau lanceur lourd SLS (Space Launch System) ; une station spatiale, la Lunar Orbital Platform Gateway, qui servira

“ La Lune étant à “portée de Terre”, aussi bien visuellement que par radio et en accès relativement rapide par vaisseau, elle peut véritablement servir de tremplin





prévue en 2024, testera le vol de la capsule Orion avec des astronautes à bord, mais ils n'aluniront pas. Cette mission de 10 jours permettra de vérifier les systèmes de recyclage d'air d'Orion, la manœuvrabilité de la capsule et le bon fonctionnement de ses systèmes de communication. Enfin, Artemis 3, envisagée pour 2025, devrait embarquer un équipage mixte d'astronautes sur la Lune, près du pôle Sud, pour un séjour de 6 jours et demi.

La Lunar Gateway ne constitue pas un élément obligatoire pour ces premières missions vers le sol lunaire. En revanche, pour les missions plus longues, elle deviendra indispensable. Cette station en orbite autour de la Lune sera construite sur plusieurs années, module après module – dont certains sont en cours de développement –, avec, dans la configuration actuelle, une contribution européenne sur plus de la moitié. Par la suite, la Gateway pourrait aussi être une sorte de "station-service" pour les missions vers Mars. Il est actuellement prévu que les deux premiers modules de la station – à savoir l'un pour la propulsion et la production d'énergie et l'autre pour l'habitation – soient lancés en 2024 avec le Falcon Heavy de SpaceX.

Quant à l'atterrisseur lunaire HLS, la Nasa s'est tournée vers le privé pour le développer. En avril 2021, elle a sélectionné la proposition de SpaceX, d'Elon Musk (face, entre autres, à Blue Origin de Jeff Bezos). Un contrat de 2,9 milliards de dollars. Dans cette configuration, les astronautes décolleront donc à bord du vaisseau Orion lancé par le SLS, pour se rendre jusqu'à l'orbite lunaire. De son côté, SpaceX lancera son HLS. Une fois placé sur une orbite basse, le HLS sera ravitaillé en ergols (produits assurant la propulsion des fusées) par plusieurs vaisseaux, avant de s'injecter en orbite

de relais entre l'orbite lunaire et la surface de la Lune ; un vaisseau, nommé Orion, pour transférer les astronautes entre la Terre et la station ; ainsi qu'un vaisseau-atterrisseur, le HLS (Human Landing System), chargé de déposer les humains sur la surface puis de les ramener dans la station.

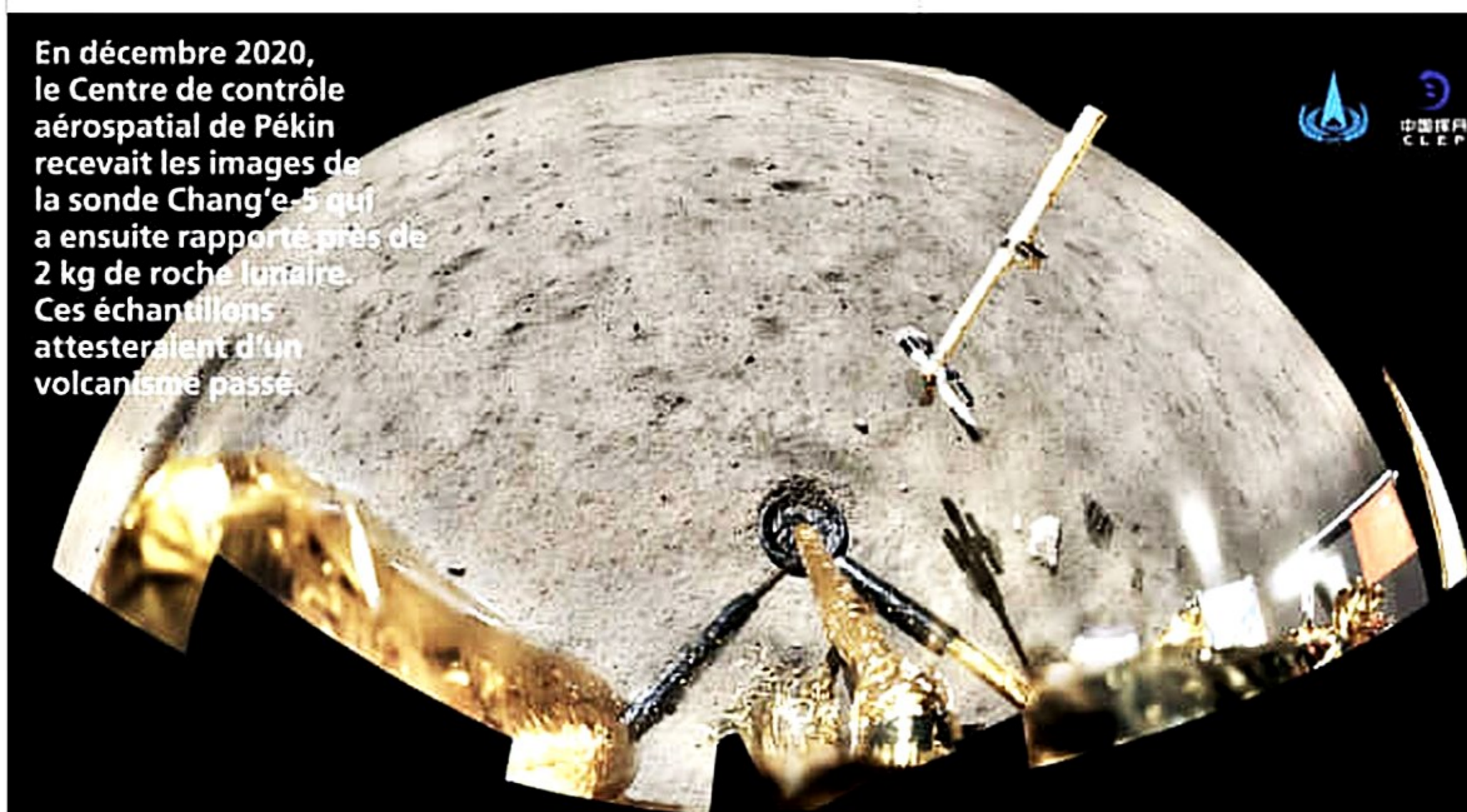
La première étape du programme Artemis 1, consiste à tester le SLS (le lanceur) et la capsule Orion, sans équipage, avec un voyage autour de la Lune. La capsule Orion, réutilisable grâce à un bouclier thermique et des parachutes de freinage, est composée d'un module de commande (pouvant transporter 4 astronautes) et d'un module de service, conçu par Airbus. La deuxième étape, Artemis 2, actuellement

Un détecteur à glace

Avant de faire alunir des hommes dans la région du pôle Sud lunaire, la Nasa prévoit d'envoyer des missions robotiques afin d'y étudier l'environnement et les caractéristiques de la glace d'eau présente – raison de la sélection de ce site. Elle développe actuellement un robot d'exploration, Viper (Volatiles Investigating Polar Exploration Rover), qui sera chargé d'évaluer in situ les gisements de glace d'eau que des orbiteurs ont détectés. Au cours de sa mission d'une durée de quatre mois lunaires, l'astromobile doit parcourir une dizaine de kilomètres pour effectuer des mesures en surface et prélever, à l'aide d'une foreuse, des échantillons de sol jusqu'à un mètre de profondeur. Équipé de quatre roues et de panneaux solaires, Viper sera déposé dans le cratère Nobile par un atterrisseur de la société Astrobotic Technology, placé en orbite par le lanceur Falcon Heavy, de SpaceX, en 2023.



En décembre 2020, le Centre de contrôle aérospatial de Pékin recevait les images de la sonde Chang'e-5 qui a ensuite rapporté près de 2 kg de roche lunaire. Ces échantillons attesteraient d'un volcanisme passé.



lunaire. Les astronautes y seront alors transférés pour la dernière étape de leur voyage à la surface de la Lune. L'engin déposera les astronautes sur le sol lunaire et servira pragmatiquement d'habitat durant cette première mission habitée. Puis il les ramènera en orbite lunaire, où ils seront de nouveau embarqués dans le vaisseau Orion pour le retour sur Terre. Par la suite, le transfert d'un vaisseau à l'autre pourra s'opérer via la Lunar Gateway.

UN ATERRISSEUR LUNAIRE À FINANCER

Compte tenu de son gigantisme, de sa complexité et des enjeux technologiques, l'incertitude demeure sur le calendrier de ce programme. Par crainte de se faire doubler par les Chinois, mais aussi dans l'optique de renforcer ses capacités de mise en place d'astronautes sur la Lune, la Nasa ne mise pas uniquement sur SpaceX. Elle a lancé le programme NextSTEP-2 (Next Space Technologies for Exploration Partnerships), axé sur le développement de "concepts de systèmes d'atterrissage durables", ce qui offre à de nouvelles entreprises la possibilité d'entrer sur le marché lunaire. Blue Origin, écartée lors du premier appel d'offres, poursuit ainsi ses ambitions et son programme, qui avait été jugé tout à fait crédible sur le plan technique.

Bien qu'occupant une place parmi les leaders mondiaux du spatial, l'Europe n'a pas l'ambition, ni les moyens, d'envisager à elle seule des missions habitées. Elle joue toutefois un rôle majeur dans l'aventure Artemis. "Notre objectif est clair : avoir un Européen sur la Lune avant 2030 ! Mais nous ne pouvons y parvenir seuls, bien entendu. Dans le cadre du programme Artemis, nous comptons donc statuer sur un nouveau 'troc' avec les Américains", explique Didier Schmitt, responsable du groupe

Stratégie & Coordination à la direction de l'exploration humaine et robotique de l'Esa. Des accords ont déjà été conclus avec la Nasa, dans le cadre de la Lunar Gateway ainsi que du module de service du véhicule Orion, garantissant trois places, dans trois vols différents, pour des astronautes européens. L'Agence spatiale européenne négocie donc avec la Nasa afin de s'assurer un pied sur la Lune. Et, comme "monnaie d'échange", elle envisage de développer, d'ici à 2030, un atterrisseur lunaire : le EL3, pour European Large Logistics Lander. Il serait lancé par Ariane 64 (la version la plus puissante d'Ariane 6). L'engin aurait entre 1,5 et 1,8 t de charge utile, pouvant ainsi servir de véhicule logistique et de transport de matériel pour les missions Artemis.

Une maison lunaire

Présenté à Dubai à l'occasion de l'Exposition universelle, le prototype Eurohab est un projet d'abri lunaire, mobile et gonflable. Développée par la startup française Spartan Space, cette "maison lunaire" vise à offrir un habitat secondaire pour quatre astronautes. Le projet a été sélectionné par TechTheMoon, le premier incubateur 100% dédié à la Lune.



© CNSA / XINHUA / XINHUA / AFP - SPARTEN SPACE



"Les Américains souhaitent être en mesure de laisser un équipage de 4 astronautes jusqu'à un mois sur la Lune, puisque c'est leur schéma pour les missions martiennes. Notre projet présente donc un intérêt indéniable pour leur permettre de gérer l'acheminement d'instruments scientifiques, d'un rover et d'équipements divers nécessaires à la vie des astronautes. Plusieurs dizaines de millions ont déjà été injectés pour deux études techniques – par Airbus Defence and Space et Thales Alenia Space – de l'EL3, dont nous estimons le coût de développement à 850 millions d'euros", poursuit Didier Schmitt. C'est lors du Conseil des ministres des États membres de l'Esa, prévu en novembre 2022, que sera prise la décision de financer, ou pas, la conception de cet atterrisseur lunaire polyvalent.

De son côté, la CNSA, l'Agence spatiale chinoise, a lancé un programme d'exploration lunaire tout aussi audacieux que celui des Américains, nommé Chang'e. Relativement jeune dans l'exploration spatiale, la Chine compte sur la Lune pour rattraper son retard technologique. *"La Chine ambitionne de bâtir une station de recherche scientifique dans les régions du pôle Sud de la Lune, et de réaliser des missions lunaires habitées dans une dizaine d'années",* a déclaré Zhang Kejian, directeur de la CNSA, à l'agence de presse Chine nouvelle en avril 2019. Les premières étapes de leur programme ont consisté en des missions de reconnaissance et de cartographie réalisées par les sondes Chang'e-1 et 2. Après Chang'e-3 qui a posé un rover sur le sol lunaire, Chang'e-4 a frappé les esprits, début 2019, en atteignant la face cachée de la Lune avec son rover Yutu-2 – une grande première ! En novembre 2020, leur fusée Longue Marche 5, a lancé la sonde Chang'e-5, qui, en décembre 2020,

Notre objectif est clair : avoir un Européen sur la Lune avant 2030 ! Mais nous ne pouvons y parvenir seuls, bien entendu

a rapporté près de 2 kg d'échantillons de roche. L'opération sera renouvelée avec Chang'e 6, pour cette fois-ci prélever des échantillons de roche sur la face cachée.

Récemment, la Chine et la Russie ont annoncé leur collaboration afin de réaliser une station de recherche sur la Lune ; un programme assez similaire à celui prévu outre-Atlantique. Les missions chinoises et russes devraient opérer dès 2024-2025. Les données collectées par leurs sondes respectives serviront à déterminer l'emplacement de leur future base à proximité du pôle Sud lunaire. Et pour atteindre son objectif de missions d'exploration humaine d'ici 2035, la Chine développe un nouveau lanceur lourd, la Longue Marche 9...

UN VÉHICULE PRESSURISÉ À TROQUER

Pour le vol habité en cavalier seul, la Russie a de son côté jeté l'éponge. Toutefois, même si son industrie spatiale rencontre de nombreux déboires, le pays a relancé son programme d'exploration robotique Luna, interrompu il y a plus de quarante ans. Luna-25, atterrisseur devant effectuer une première analyse du régolithe, est la première étape de son cycle de missions lunaires. Le lancement est prévu cette année depuis le cosmodrome de Vostotchny, en Extrême-Orient.

Quant aux Japonais et leur agence, la Jaxa, s'ils ne rivalisent pas dans la course, ils rêvent malgré tout de planter un drapeau nippon sur la Lune. Ils planchent donc sur ce dont auront aussi besoin les Américains – un véhicule pressurisé habitable, capable de se déplacer sur de longues distances sur notre satellite –, comptant eux aussi sur le principe de "troc". Alors, qui d'un astronaute ou d'un taïkonaute sera le premier de ce siècle à poser le pied sur le sol sélène ? Les paris sont lancés ! À moins que, jouant sur l'effet de surprise, SpaceX supplante tout ce petit monde avec, en avance de phase, un bond direct vers Mars. ■



Lanceurs réutilisables Le bond technologique

D'abord délaissée, l'idée de récupérer tout ou partie d'un lanceur s'impose. Une *rocket science* maîtrisée côté américain, et que l'Europe lorgne avec Themis.

PAR ADRIEN DENÈLE



Le 6 février 2018, le premier test d'atterrissage des 2 boosters de la fusée Falcon Heavy, de SpaceX, est un succès.

Qui n'a jamais été déçu en apprenant que les fusées n'atterrissaient pas sur leurs pattes, à la manière du modèle rouge et blanc vu dans *Tintin*? Un rêve brisé... désormais en pleine renaissance ! Le concept de fusée réutilisable, c'est-à-dire que l'on peut lancer plusieurs fois, est revenu en force dans la dernière décennie. Avec, en point d'orgue, les fameux Falcon 9 de la société SpaceX, dont le premier étage revient se poser sur terre, ou même sur une barge en mer. Ils ne seront bientôt plus les seuls, car chaque agence travaille à développer son propre lanceur réutilisable... et à résoudre les difficultés inhérentes.

Si lancer une fusée est en soi un tour de force, la réutiliser rend l'équation encore plus complexe. Rappelons quelques bases du spatial et de la conception de fusées. L'objectif de ces mastodontes de métal reste d'envoyer une charge utile – c'est-à-dire un satellite, une sonde ou... pourquoi pas, un cabriolet rouge ! – dans l'espace. Pour se mettre en orbite, il faut atteindre une certaine vitesse. On place la charge utile au sommet de la fusée, dans ce que l'on nomme la coiffe. Cette dernière est fixée au-dessus d'un gigantesque réservoir – duquel elle sera séparée quand il sera vide – avec, à sa base, des moteurs pour en brûler les ergols (carburant + comburant) à toute puissance. De la simple physique de Newton avec conversion d'énergie en vitesse ? Pas si facile car, dès que le carburant est brûlé, sa masse "sort" de l'équation, mais pas celle du réservoir qui le contient et se vide au fur et à mesure. Il faut donc ajuster l'équation en temps réel et, in fine, se séparer du réservoir.

RENTABILISÉ APRÈS 10 UTILISATIONS

C'est ainsi qu'est née l'idée de diviser la fusée en "étages". Le premier, avec ses moteurs optimisés pour un lancement au sol, coûte le plus cher. C'est pourtant celui qui est largué dès les hautes couches de l'atmosphère, pour retomber dans l'océan. La pollution générée est la contrepartie d'un choix simple : en se séparant de l'étage, la fusée perd en masse et nécessite ainsi beaucoup moins de carburant pour atteindre l'orbite, où la charge utile sera libérée. Dans le cas d'un étage réutilisable, comme celui des lanceurs Falcon 9, un peu de carburant y reste après la séparation. Cela permet à l'étage d'opérer un demi-tour, de se placer en position inversée et de rallumer son moteur quelques instants afin de réduire sa vitesse, avant le grand allumage final pour freiner

Un projet étudiant lancé vers l'avenir

Des étudiants encadrés par le Cnes, l'agence spatiale française, travaillent également sur le réutilisable. En tout cas ceux prenant part à Perseus, une "initiative visant à réunir étudiants en spatial et industries du legacy et du New Space", comme le décrit David Tchou-Kien, chef de projet Perseus. L'objectif n'est rien de moins que la conception d'une nouvelle fusée-sonde, nom de code Dream-on, susceptible de réutilisation. La méthode incrémentale est employée, avec la conception d'un petit démonstrateur réutilisable, Mini-Apterros. "Nous n'en sommes qu'à un modèle guidé sur rail et lancé en intérieur, reconnaît la responsable de gestion, Marie-Sophie Lachesnais (Cnes). Mais il permet à nos étudiants de mettre en pratique leurs connaissances."

Le lanceur européen Themis prend le virage du réutilisable.



l'atterrissage. "On utilise donc de l'ergol rien que pour atterrir, confirme Yann Tincelin, ingénieur projet pour les systèmes de transport spatial à l'Esa. Sans oublier toute l'infrastructure liée à la récupération." Barge en mer, matériel et ajouts technologiques sur le lanceur (comme les fameux *grid fins*, des ailerons sur le côté qui contrôlent le flux d'air pour l'atterrissage), tout ceci a un coût non négligeable. À tel point que les estimations vont bon train : on pense ainsi que SpaceX rentabilise ses lanceurs à partir de 10 utilisations. Chose faite désormais pour plusieurs d'entre eux qui ont passé ce cap.

LE MARCHÉ A DRASTIQUEMENT CHANGÉ

L'Europe a assisté de loin à ce défi du réutilisable dont la société d'Elon Musk s'est fait une spécialité. Et pour cause : grâce à Ariane 5 et à ses contrats de satellites lourds, il n'y avait que peu d'intérêt à réutiliser le lanceur. "Les propergols utilisés pour récupérer des étages ne le sont pas pour amener la charge utile à destination", note Yann Tincelin. Dans un marché de lancements lourds peu réguliers, réutiliser un lanceur n'apparaissait donc pas comme une bonne affaire. Mais cela a changé, et ce de manière drastique, en seulement quelques années. Aux lancements de satellites lourds se sont ajoutés ceux des constellations de microsatsellites. Une révolution pour le spatial, surtout pour le secteur européen qui, il faut l'admettre, a eu du retard à l'allumage. "Nous n'avons pas sous-estimé le réutilisable, assure cependant Daniel de Chambure, ingénieur sur Ariane. Mais il était très difficile de réagir du jour

au lendemain." Là où SpaceX bénéficie de capitaux privés et de fonds publics des États-Unis et construit tout sur site, l'Europe doit s'adapter avec ses États membres et les sites industriels de chacun.

HORIZON 2023 POUR THEMIS

Pour s'approprier la technologie réutilisable, l'Europe mise sur un nouveau projet : Themis, un démonstrateur d'étage de lanceur réutilisable dont le premier vol exo-atmosphérique avec atterrissage est prévu pour 2023. Pour y parvenir, l'Esa mise sur une nouvelle stratégie, la méthode "agile", comme l'explique Yann Tincelin, le responsable du projet au sein de l'Esa : "À travers Themis, on accélère les cycles de conception-réalisation avec une approche expérimentale qui favorise l'apprentissage par des tests matériels. Entre 2020 et 2021, nous nous sommes concentrés sur les tests des éléments nécessaires au bon fonctionnement de deux réservoirs de propergols pour préparer l'intégration de nos nouveaux moteurs Prometheus sur le lanceur. Six essais à succès ont eu lieu en 2021, avec remplissages de réservoir et tests des séquences et processus électriques et fluidiques." Aucun vol donc, mais des tests à étapes-clés bien définies. Avec, pour les décideurs politiques, la garantie que le projet ne sera pas embourbé dans des retards trop coûteux.

"On n'est pas dans un tunnel, résume Yann Tincelin. On travaille avec des cycles courts, à horizon défini pour chaque défi technique à relever." Les prochaines étapes verront les premières mises à feu du moteur, en mode "statique" tout d'abord, avant

L'enjeu-clé derrière le réutilisable, c'est de permettre à l'Europe de garder un accès souverain à l'espace

un premier décollage linéaire, fin 2022, sur le site suédois de Kiruna. Puis, à partir de 2023, le premier vol avec atterrissage, à Kourou, en Guyane française. Et pourquoi pas un atterrissage sur une barge en mer dès 2025... Themis n'a pas vocation à s'intégrer à un lanceur existant, comme une Ariane 6 ou un Vega-C, mais à préparer l'avenir. "Nous cherchons à doter l'Europe des compétences et technologies nécessaires au réutilisable et d'en consolider les coûts associés", souligne l'ingénieur. Car si les coûts sont augmentés individuellement pour chaque lancement, c'est l'accélération de la cadence permise par la réutilisation qui pourrait s'avérer rentable. Et, dans le contexte grandissant de la concurrence mondiale, la compétitivité européenne vise avant tout un enjeu géostratégique, que résume ainsi Yann Tincelin : "L'enjeu-clé derrière le réutilisable, c'est de permettre à l'Europe de garder un accès souverain et compétitif à l'espace." ■

La fusée réutilisable, star controversée

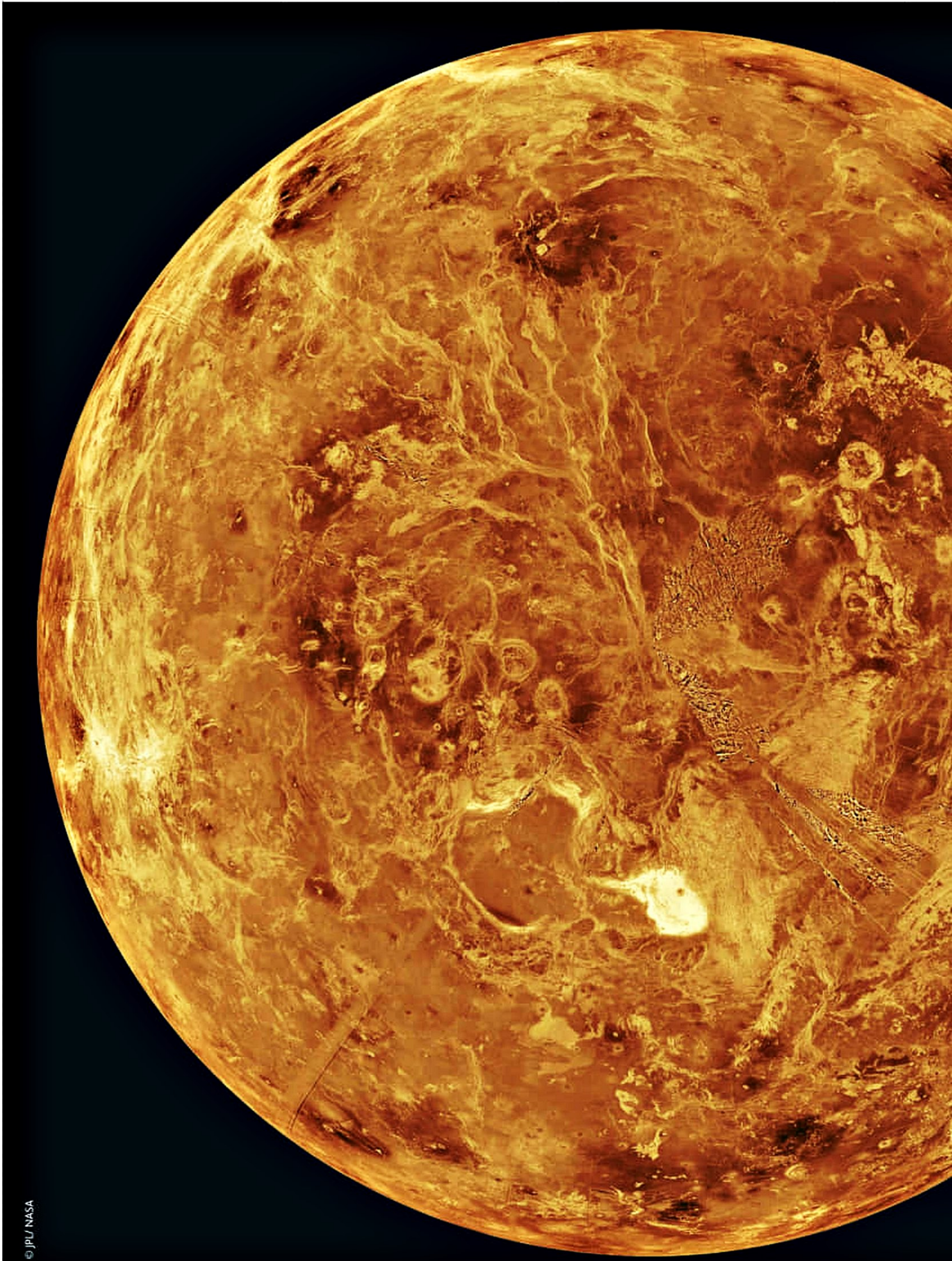
Si le réutilisable a permis à SpaceX de casser les prix, il a aussi mis l'entreprise sur le devant de la scène médiatique. Alors que les lancements des fusées les plus prestigieuses, telles qu'Ariane 5 ou Soyouz, sont relativement absents des médias, ceux des Falcon 9 (photo ci-contre) cumulent des millions de vues en ligne. La raison est bien sûr liée à la technologie nouvelle, mais aussi à la diffusion des vidéos en direct avec de multiples informations techniques et angles de caméras divers. On a ainsi pu voir le vol inaugural du Falcon Heavy avec la vision très SF des 2 boosters en train

d'atterrir de manière simultanée (photo p. 24)! Mais ces visions futuristes cachent un malaise de plus en plus répandu dans la communauté des astronomes : ces lancements polluent le ciel de constellations de satellites. En effet, les systèmes comme Starlink sont équipés de lumières très visibles à basse altitude. Dès lors, quand un astronome effectue un temps de pose long, de nuit, si un "train" de satellites passe à ce moment-là, il en résulte de longs traits blancs sur la photo, et donc sur les données d'observations. De quoi menacer la recherche astronomique à long terme.



XXXXX







Vénus, objectif VÉNIUS

Après des décennies de domination martienne, l'intérêt scientifique et médiatique se reporte sur Vénus avec trois nouvelles missions : EnVision, Veritas et Davinci. PAR ADRIEN DENÈLE

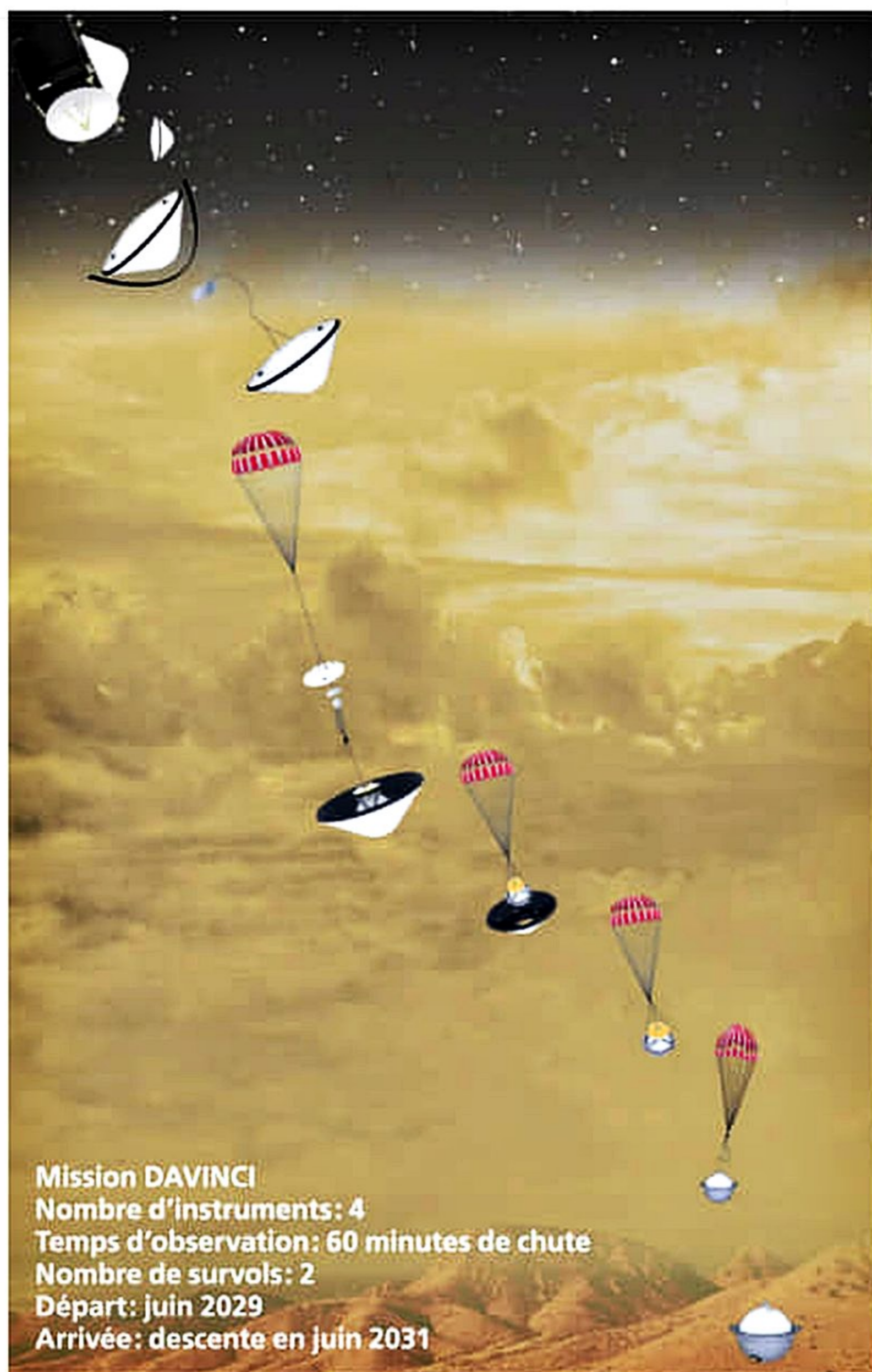
Qui aurait cru que, des huit planètes de notre système solaire, la plus proche de nous soit l'une des plus délaissées ? Vénus, dont le nom est pourtant lié à la déesse de l'attraction irrésistible, n'est actuellement étudiée que par une seule sonde, la japonaise Akatsuki, contre douze pour Mars, rovers compris ! Les raisons d'un tel désamour sont liées à la nature infernale de la planète. Son atmosphère composée à 96 % de CO₂ est responsable d'un effet de serre faisant monter le thermomètre jusqu'à 490°C, devant les 427°C de Mercure, pourtant plus proche du Soleil. Sa pression atmosphérique écrase la nôtre, et n'est égalée que par les profondeurs de l'océan, avec pas moins de 93 bars. *"Vénus est un enfer. Et c'est justement pour cela que l'on compte y retourner !"* s'amuse Paul Byrne. Ce passionné, planétologue au sein de l'université Washington de Saint-Louis, aux États-Unis, militait depuis plusieurs années pour que Vénus revienne sur le devant de la scène. Face à l'omniprésence de Mars, à la fois dans les congrès et les médias, Vénus était en train de s'éclipser. Mais, en 2021, tout change, et trois nouvelles missions sont annoncées : en 2027 et 2029 partiront les sondes

- Température: 460°C en surface
- Distance Terre-Vénus: 42 millions de kilomètres, en moyenne
- Période orbitale (un tour autour du Soleil): 225 jours terrestres
- Rotation sidérale (un tour sur elle-même): 243 jours terrestres
- Pesanteur à la surface: 8,87 m/s², soit pratiquement la même que sur la Terre

Veritas et Davinci de la Nasa, l'agence spatiale américaine, bientôt suivies par EnVision en 2031, la sonde de l'Esa, l'agence européenne. Elles devront répondre à une question simple, résumée par Paul Byrne : "Pourquoi Vénus est-elle la sœur de la Terre et pas sa jumelle ?"

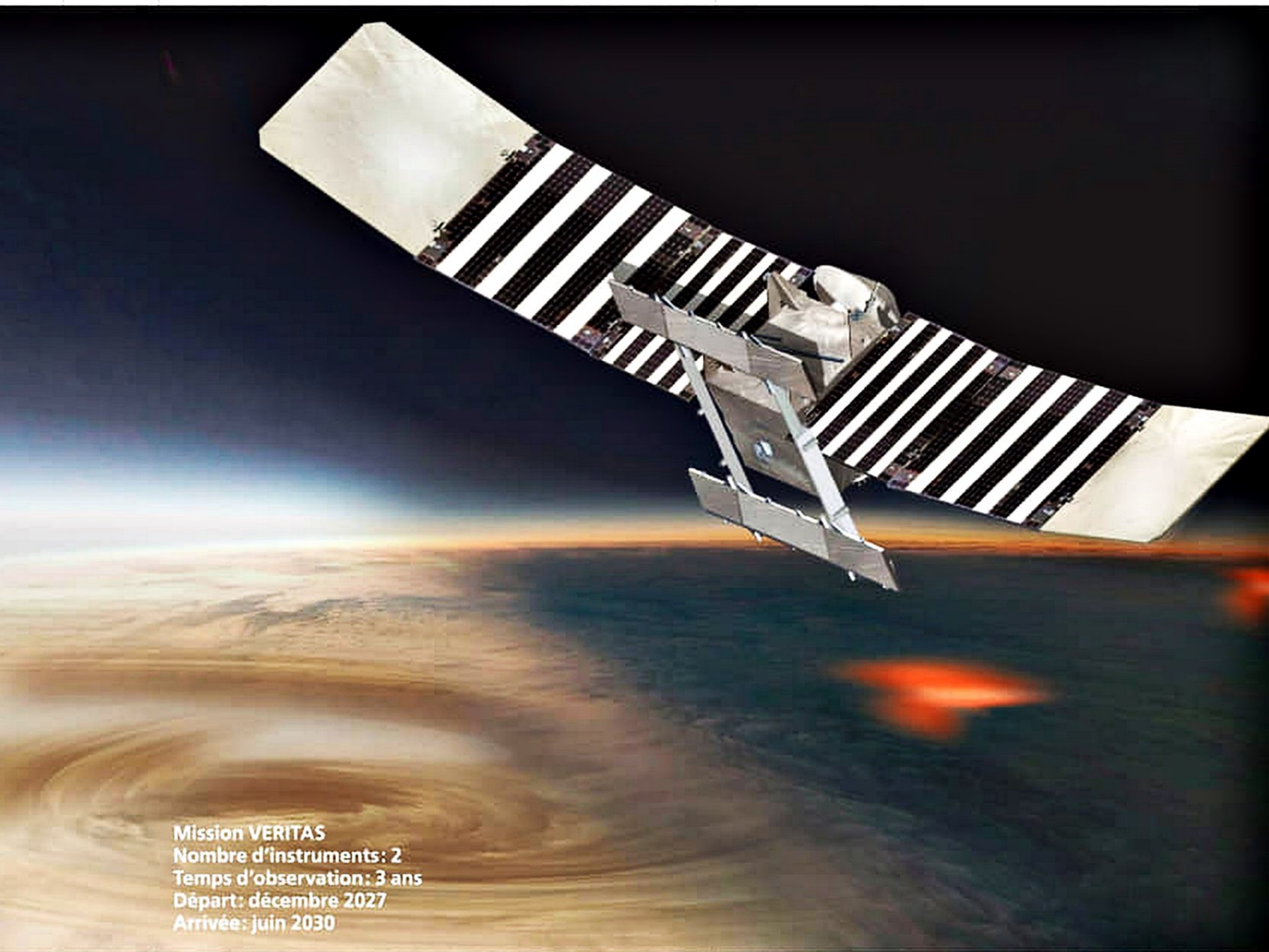
PAS DE VIE EN VUE

Aucune autre planète ne ressemble autant à la Terre que Vénus. En tout cas, sur le plan physique : avec son rayon inférieur au nôtre d'à peine 5 %, elle est la planète de taille et de masse les plus similaires. Mars, que l'on compare souvent à la Terre, est quatre fois plus petite. Dès lors, si l'on veut comprendre notre planète, Vénus semble la candidate idéale. Lors des débuts de la conquête spatiale, l'intérêt pour Vénus est alors une évidence. Scientifiques comme auteurs de science-fiction des années 1950 fantasment sur une vie potentielle sur Vénus. Mais les premières observations des sondes Mariner 2 et 4 mirent fin au rêve. Elle se révèle couverte d'un manteau de dioxyde de carbone opaque, sous lequel se cache une surface infernale. L'exploration se poursuivra néanmoins, avec en premier lieu les sondes envoyées par l'Union soviétique. Entre 1961 et 1984, les Russes envoient 29 sondes, dont seules 14 parviennent à récupérer des images. La sonde Venera 7 parvient même à toucher la surface dès 1970, et est la première sonde à "atterrir" à la surface d'une autre planète que la Terre. Mais, étant donné les conditions de pression et de température qui y règnent, le matériel embarqué ne peut fonctionner plus de quelques heures. Les missions Venera, Vega, Mariner et Pioneer permettent de confirmer l'impossibilité d'une vie à la surface. Avec ses roches basaltiques, son atmosphère toxique de carbone et d'azote et sa pression monstrueuse, Vénus perd de l'intérêt pour les exobiologistes, et les politiques. "L'idée, depuis Daniel Goldin, ancien directeur de la Nasa, était de n'explorer que les endroits où l'on risque de trouver de l'eau, et donc de la vie", rappelle Thomas Widemann, responsable d'EnVision au Laboratoire de météorologie dynamique (LMD). Mars passe donc en tête des missions d'exploration, avec les succès que l'on connaît pour ses fameux rovers, de Pathfinder à Perseverance. Vénus entre alors dans une période creuse. Seize années s'écoulent entre les missions Magellan et Venus Express, qui se contentent d'études orbitales. "C'était une situation désespérante", décrit Thomas Widemann, qui se souvient de "congrès de planétologie sans une seule



“ Vénus est un enfer.
Et c'est justement
pour cela que l'on compte
y retourner ! ”

session consacrée à Vénus". Comble de l'ironie, six autres sondes survolent Vénus... simplement pour s'en servir de tremplin gravitationnel ! C'est ainsi le cas de BepiColombo, sonde européenne envoyée vers Mercure se servant de Vénus pour réduire son orbite. De nos jours, il ne reste plus qu'Akatsuki, orbiteur japonais, pour observer de près Vénus. Tout va pourtant changer dans la prochaine décennie, avec l'arrivée des trois nouvelles missions vénusiennes. "Enfin, on va explorer le système solaire avec une autre idée que la recherche de la vie !" s'enthousiasme le responsable de mission.



Mission VERITAS
 Nombre d'instruments: 2
 Temps d'observation: 3 ans
 Départ: décembre 2027
 Arrivée: juin 2030

Pourquoi un tel regain d'intérêt ? Les raisons sont multiples, mais trois principales émergent. La plus importante est sans doute la découverte de milliers de nouvelles exoplanètes. Elles sont 4878 au dernier comptage (début décembre 2021), et devraient être encore plus nombreuses à l'heure où vous lirez ces lignes. Géantes chaudes, naines brunes et super-Terre... Ces mondes d'ailleurs nous fascinent par leur diversité. Jusqu'à poser une question centrale pour les scientifiques, comme la résume Paul Byrne : *"La Terre est-elle la norme ou l'exception ?"*

UN SINISTRE PRÉSAGE ?

Jusqu'à présent, en effet, faute de moyens observationnels, nous n'avons pas repéré de planète comparable à la Terre. Mais si nous étions dans l'un de ces systèmes étrangers et que nous pointions vers notre planète, une évidence s'imposerait : Vénus et la Terre sont extrêmement comparables. Alors que pour nous qui la connaissons, tout les oppose ! Comprendre Vénus revient donc à mieux comprendre l'histoire de la Terre, du système solaire et

de la capacité du vivant à apparaître ailleurs. Car si deux mondes analogues peuvent varier autant, cela indique forcément que la vie sur Terre résulte d'un hasard improbable... L'autre raison d'un renforcement de l'intérêt pour Vénus est justement liée à la vie. En septembre 2020 en effet, une étude suscite l'emballement médiatique : on aurait découvert de la phosphine dans l'atmosphère de Vénus. Cette molécule pourrait être liée à la présence d'une forme de vie organique... mais, après vérification, les données semblent incorrectes et la phosphine absente. Qui peut dire si cet emballement pour Vénus n'a pas joué, lors de la décision de sélection des missions, à l'heure où les agences prennent en compte l'aspect communication ? Enfin, le dernier point pourrait être loin de l'intérêt scientifique. Si Vénus nous fascine, avec son atmosphère carbonée, c'est qu'elle illustre un bien sinistre présage. Fut-elle par le passé une planète avec une atmosphère plus clémente, avant de devenir l'enfer que l'on connaît ? Si cela a pu arriver chez la sœur de la Terre, ce serait la preuve éclatante qu'une transformation

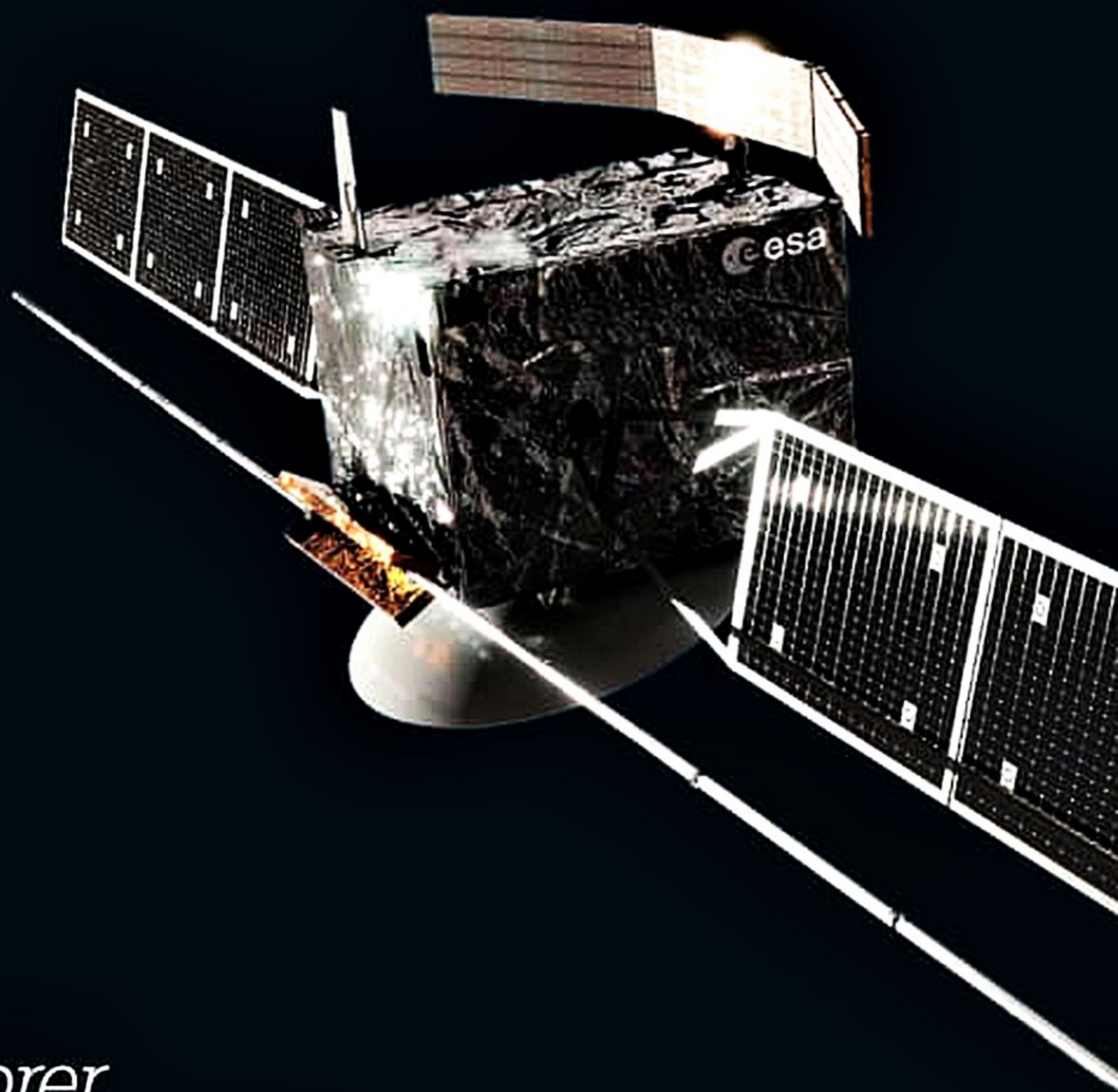
Mission ENVISION

Nombre d'instruments: 6

Temps d'observation: 4 ans et demi

Départ: décembre 2031

Arrivée: juin 2035



“ Enfin, on va explorer le système solaire avec une autre idée que la recherche de la vie ”

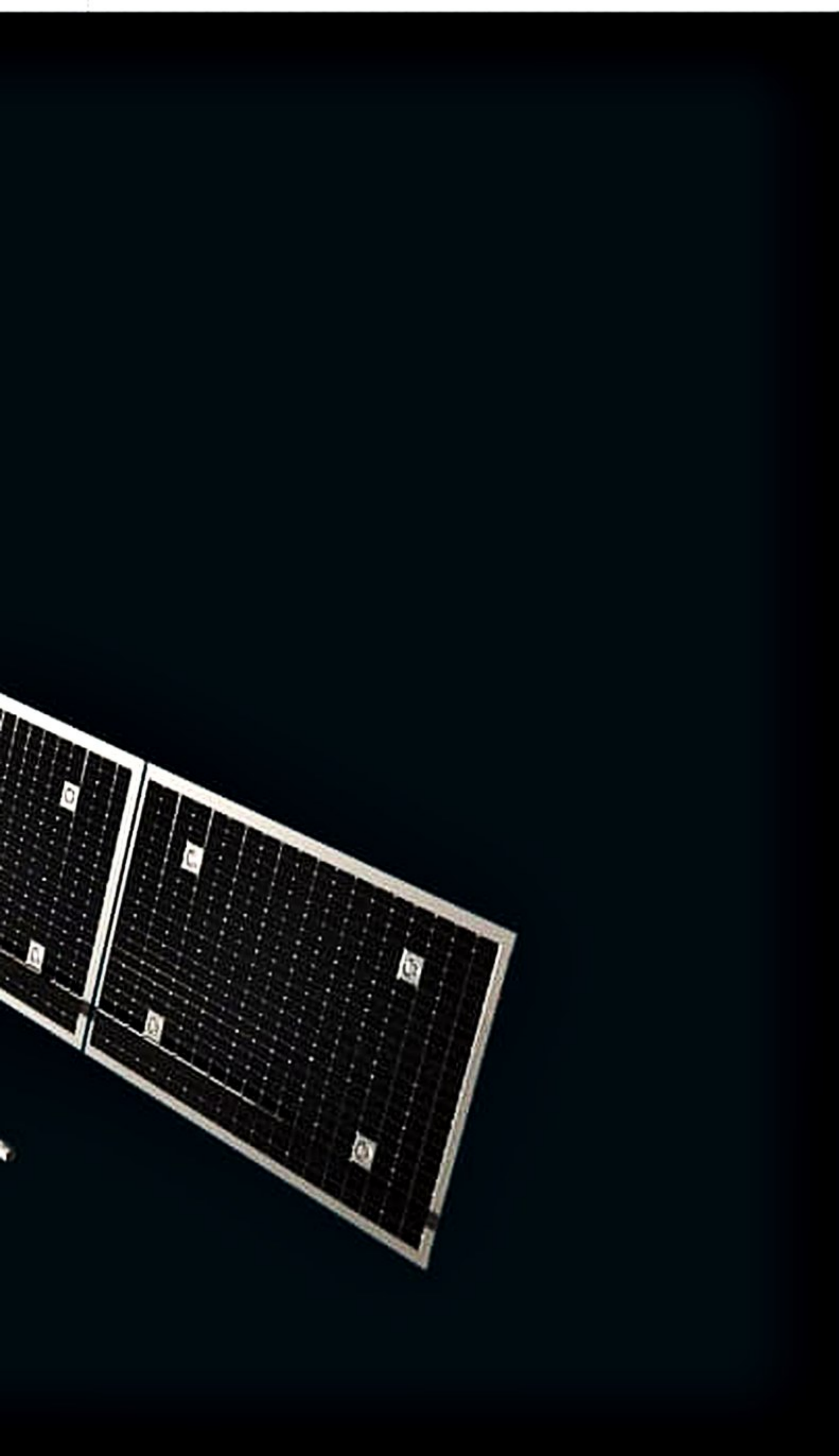
radicale de notre atmosphère est envisageable. Le choix de Vénus peut donc s'interpréter comme un signal en écho aux préoccupations climatiques terrestres. Rassurons-nous toutefois, selon Thomas Widemann, *“il est impossible que la Terre devienne comme Vénus, nous sommes très loin d'avoir autant de CO₂”*. Effectivement, entre 96 % de l'atmosphère et seulement 0,04 % chez nous, l'air terrien a une certaine marge avant de virer au jaune vénusien.

Le trio de missions ira donc explorer Vénus à partir de la fin 2027. Elles seront équipées des “yeux vénusiens” : les radars. Là où les missions martiennes ont des caméras optiques, celles vers Vénus doivent percer l'épaisse couche de nuages, et seuls les radars en sont capables. Comme le décrit avec humour Paul Byrne, *“être sur Vénus doit ressembler à un jour de brouillard à Moscou, en plus chaud !”* Les missions Veritas et EnVision seront donc équipées de radars extrêmement performants, mais qui

viseront des objectifs différents.

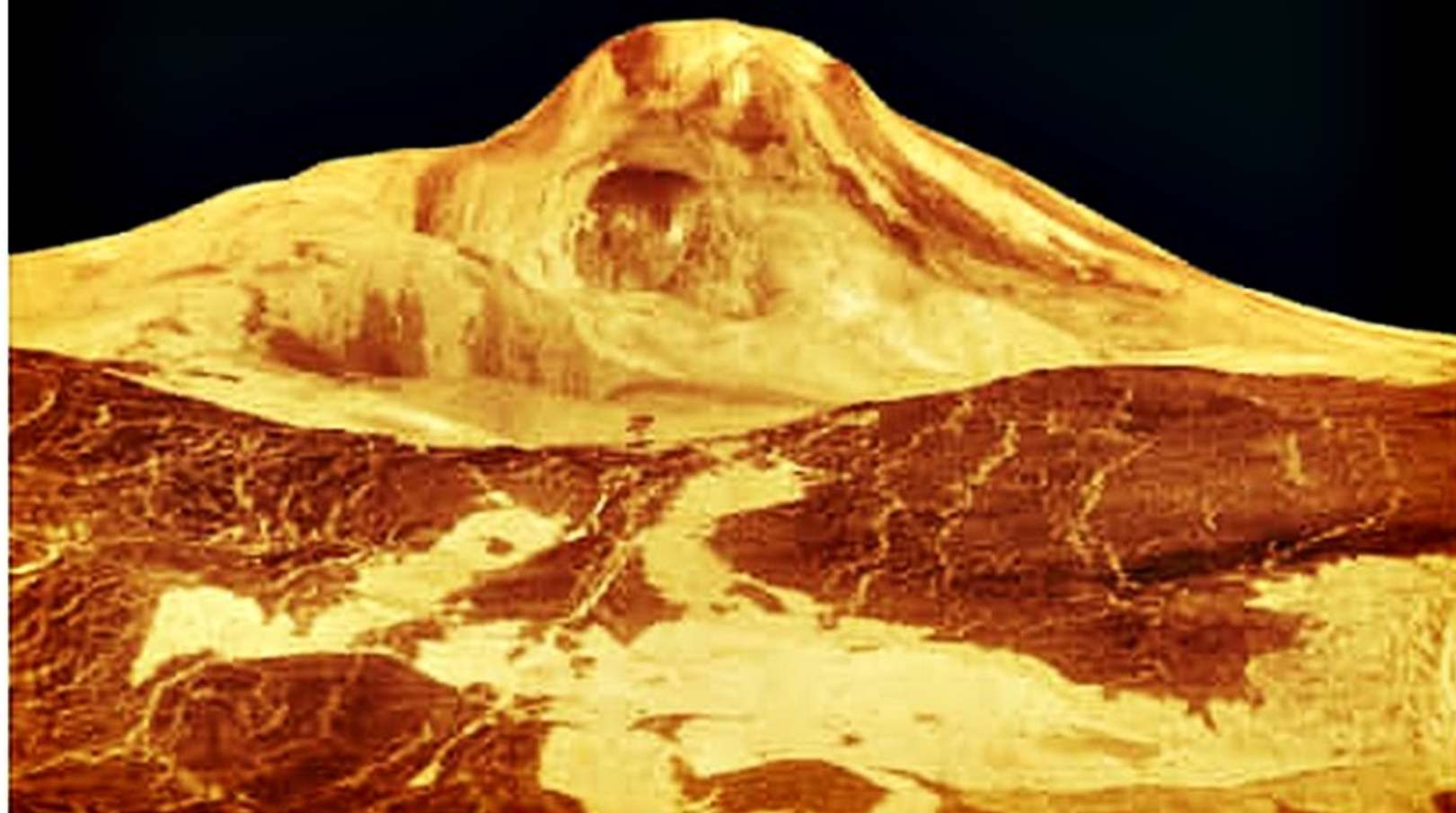
UN ALLER SANS RETOUR

“EnVision compte cibler 30 % de la planète avec précision, détaille ainsi Thomas Widemann, alors que Veritas couvrira toute la surface.” Doté d'une résolution différente, le radar d'EnVision sera ainsi capable de cartographier des zones jusqu'à 15 m, contre 30 m pour Veritas. *“Avec Veritas, on veut tout savoir, même des endroits où il n'y a rien de spécial”*, poursuit le responsable européen. Il compare cette mission à une analyse jusqu'au fond d'un océan, ou l'observation du désert du Sahara. À l'inverse, EnVision va cibler moins de zones, mais avec une sélection plus accrue, *“et surtout, en suivre l'évolution”*, précise le responsable du LMD. Car l'objectif reste de déterminer une bonne fois pour toutes l'activité géologique de Vénus. Paul Byrne publie justement une étude liée à la



Une Vénus de mille eaux ?

Y a-t-il eu de l'eau sur Vénus ? D'après une étude publiée par l'astrophysicien Martin Turbet en octobre, la réponse est non. Il se fonde sur des calculs de simulateurs atmosphériques qui invalident la possibilité d'océans stables en surface. Mais, pour Thomas Widemann, cela ne clôt pas le débat : *"Nous verrons bien, commente le responsable de mission. Si nous découvrons des roches granitiques semblables à celles que l'on trouve dans les fonds marins, le débat sera relancé."* Notre planète et Vénus n'ont peut-être pas partagé le même passé, mais pourront-elles partager le même avenir ? La question de la terraformation de Vénus, c'est-à-dire la rendre habitable par l'être humain, s'annonce digne d'un roman de science-fiction. Car, en l'état, cela nous est complètement impossible, comme le confirme Sébastien Lebonnois. *"Vénus possède 96 % de CO₂, et on voit déjà à quel point c'est difficile de s'en débarrasser sur Terre !"* argumente l'astrophysicien. Seule solution, *"les transformer en carbonates solides, mais pour cela, il faut... de l'eau"*.



fréquence des volcans sur la planète. *"On pense qu'il y en a autant que sur Terre, mais ces données restent des suppositions"*, souligne le planétologue. Pour les trouver, il faudra passer plusieurs fois au-dessus d'un même point grâce aux sondes orbitales, et voir si le terrain a changé (par exemple suite à une coulée de lave) ou si l'atmosphère a subi une évolution, comme le révélerait un changement du taux de dioxyde de soufre. Si EnVision et Veritas doivent cartographier Vénus, la mission assignée à Davinci sera plus éprouvante. La sonde doit en effet plonger au sein de l'épaisse couche des nuages, afin d'analyser leur composition et la vitesse des vents. Un aller sans retour, comme le raconte Sébastien Lebonnois, co-responsable de la mission. *"La descente sera très rapide : une heure. Elle va pénétrer à grande vitesse dans l'atmosphère, avant d'être freinée par son bouclier puis de déployer un parachute."* Un parachute... qui sera

lâché avant la fin. *"L'atmosphère est tellement dense que la sonde le lâchera, pour descendre simplement comme si elle était dans l'océan."* Le directeur de recherche au CNRS insiste sur un point : *"Le principal pour nous ne sera pas tant de toucher le sol, mais de bien analyser lors de la descente."* Là encore, l'évolution est le maître mot pour comprendre comment son atmosphère se transforme. Sa dynamique reste un mystère : on y croise des "murs de nuages" parcourant la haute atmosphère à pleine vitesse, tandis que l'on y capte des émissions d'énergie aux sources peu comprises. *"Avec Veritas en amont et EnVision ensuite, Davinci sera bien encadrée !"* prédit Sébastien Lebonnois. *"Cela sera une incroyable opportunité d'exploration en commun"*, renchérit Paul Byrne. Et même si, de son propre aveu *"cela ne suffira pas à tout comprendre de Vénus"*, ce trio de missions pourrait marquer un renouveau de l'exploration de la Planète jaune. ■

EXPLORER



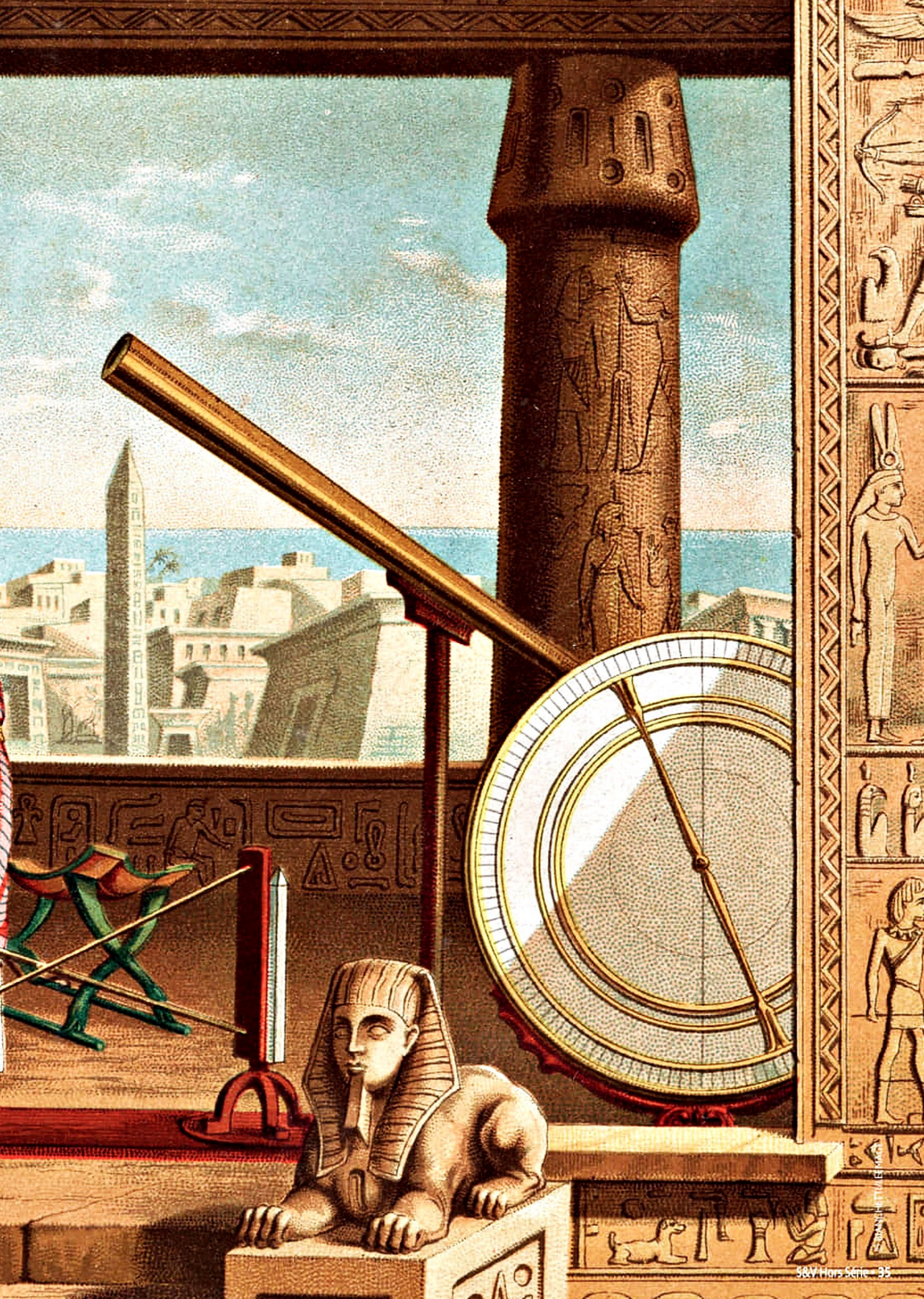
36 Un manuel de géopolitique à ciel ouvert

44 Là-haut, ça tourne!

46 Tourisme : pour quelques minutes d'impesanteur

54 À quoi servent les vols zéro-G?

56 Animostronautes



Un manuel de géo



politique à ciel ouvert

Grâce à la démocratisation des technologies, les nations investissent massivement l'espace... et y reproduisent les compétitions économiques et stratégiques d'ici-bas.

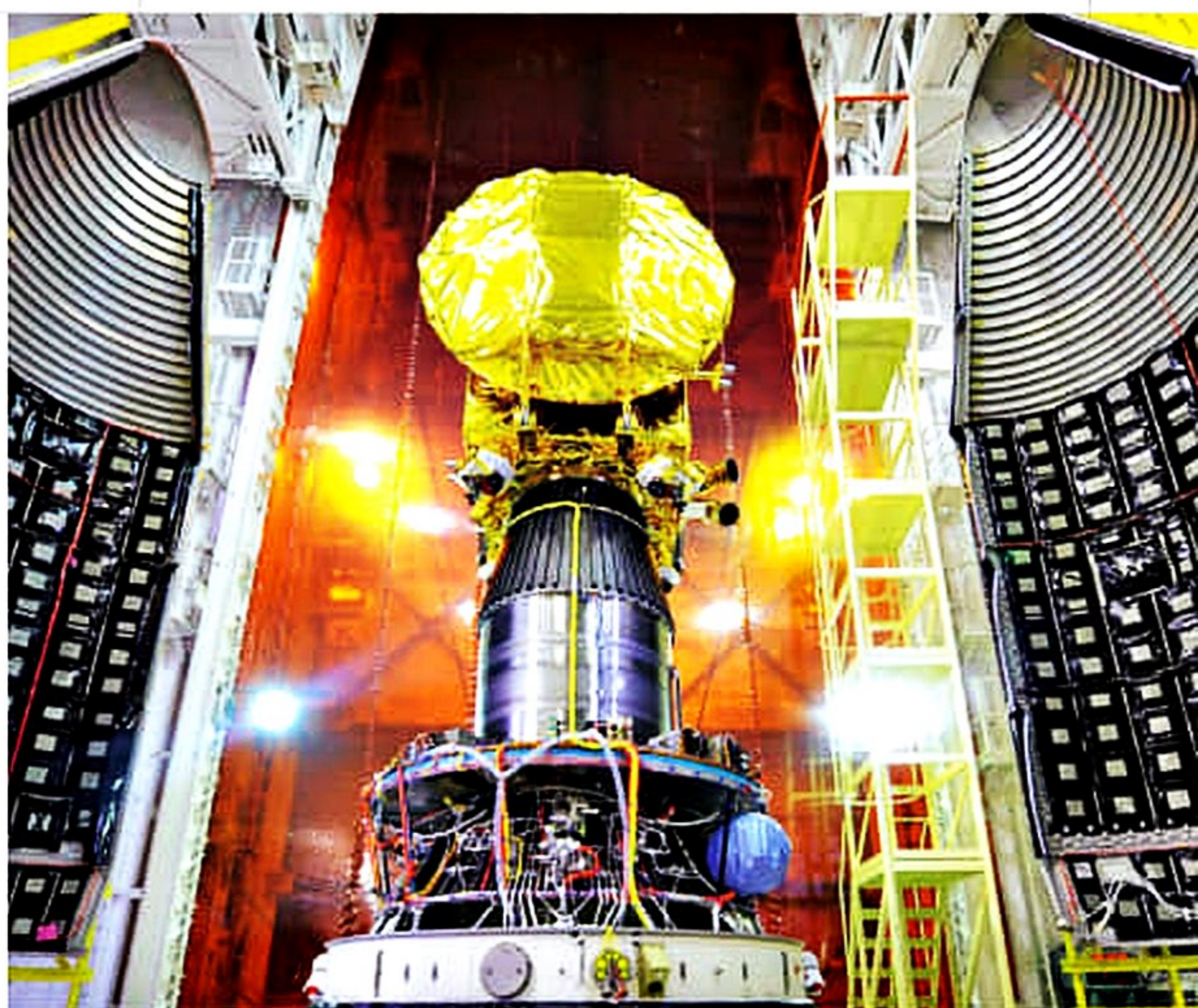
PAR HUGO LEROUX

En février 2021, la sonde Hope a atteint l'orbite martienne. Son objectif : mieux comprendre l'atmosphère et le climat de la Planète rouge. En soi, la nouvelle pourrait paraître anodine : les États-Unis ont lancé leur première sonde martienne en 1964. Mais elle l'est beaucoup moins lorsque l'on apprend quel pays l'a lancée : les Émirats arabes unis. La pétromonarchie, que l'on n'attendait pas forcément dans le spatial, illustre la diversification sans précédent du secteur. À côté du club fermé des puissances spatiales – États-Unis, Europe, Russie, Chine, Japon et Inde –, une myriade de pays affichent désormais sans complexe leurs propres programmes vers les étoiles. Un bouleversement enclenché à l'aube des années 2010.

“Les technologies spatiales ont fait un bond sur plusieurs aspects : progrès constant des composants électroniques, lanceurs réutilisables, miniaturisation et lancements en grappe des satellites, etc.”, analyse Christophe Venet, directeur de l'international au Cnes. Un chiffre résume ces progrès : le prix moyen de lancement d'un kilo de charge utile en orbite géostationnaire a chuté de 10 000 dollars dans les années 1960 à moins de 2 000 aujourd'hui. Résultat, 41 pays ont aujourd'hui une agence spatiale. *“Parfois, il s'agit seulement d'un bureau créé dans un ministère avec, derrière, une petite équipe d'ingénieurs et/ou de scientifiques qui vont commencer à se familiariser avec les technologies spatiales”*, note Isabelle Sourbès-Verger, chercheuse au CNRS et spécialiste des politiques spatiales.

UNE INFRASTRUCTURE STRATÉGIQUE

Première conséquence de cette démocratisation des technologies spatiales : une intensification de l'activité civile et commerciale en orbite. En septembre 2021, 1 400 nouveaux satellites avaient déjà été lancés... contre 1 300 en 2020. Aujourd'hui, 105 pays ont au moins un satellite dans l'espace et de nombreux pays d'Asie du Sud-Est, d'Afrique ou d'Amérique du Sud (le Chili, par exemple) commandent désormais ces engins technologiques. Pour les nouveaux utilisateurs du spatial, l'investissement génère un retour très positif pour l'économie. *“Les télécoms, systèmes de guidage type GPS et moyens d'observations de la Terre permettent d'améliorer les politiques agricoles, de transport et d'urbanisation”*, note Christophe Venet. Par ailleurs, pour les nombreux pays ne disposant pas d'infrastructures terrestres très développées,



les satellites offrent une manière directe de connecter les citoyens sans passer par de grands travaux sur le plancher des vaches.

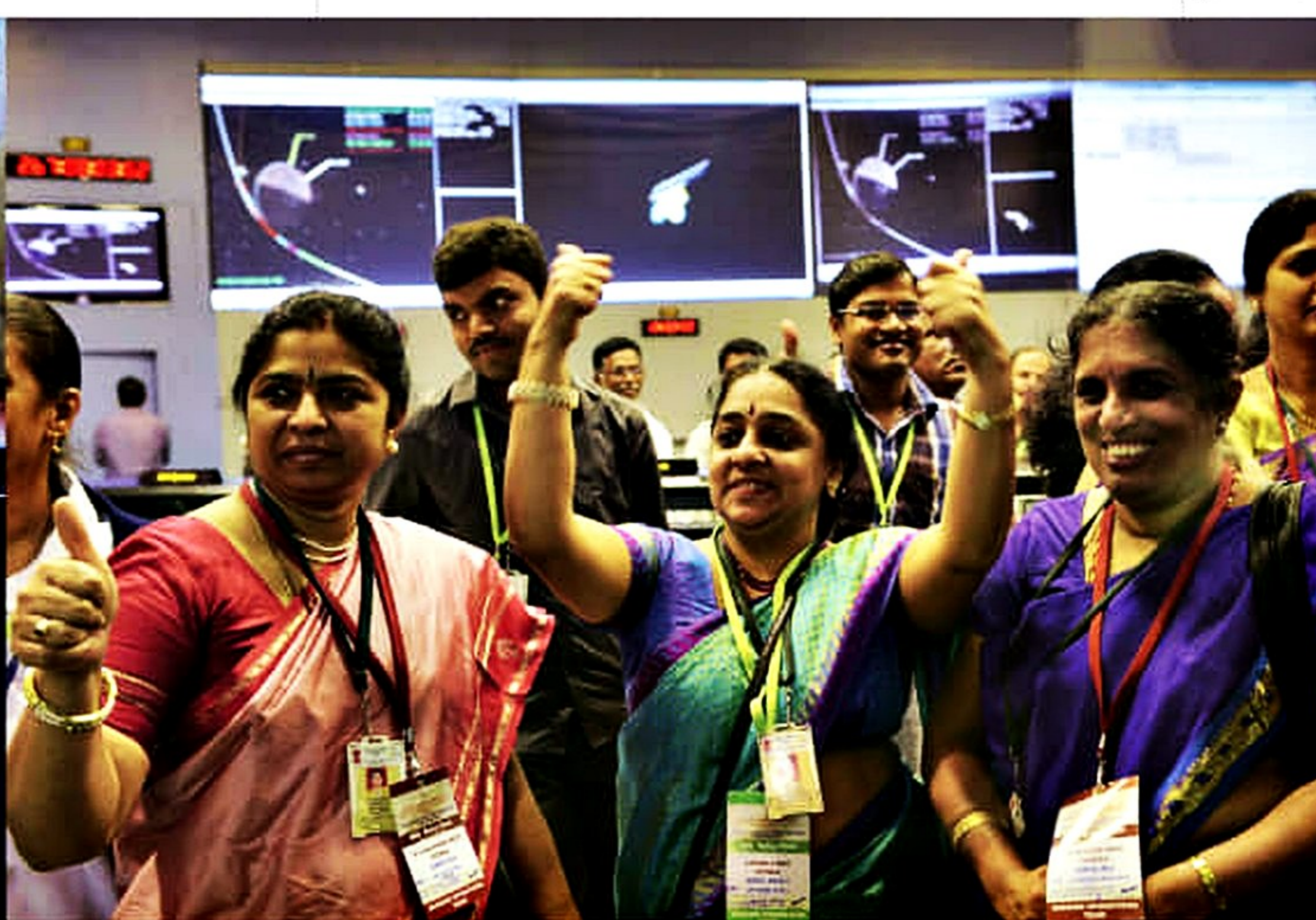
Les systèmes spatiaux sont aussi devenus indispensables au fonctionnement des armées modernes en termes de surveillance, de déploiement d'opérations, de guidage de systèmes offensifs, etc. Alors que son secteur spatial est longtemps resté cantonné aux politiques de développement, l'Inde a ainsi lancé

Guerre spatiale : quelles sont les armes ?

La destruction par la Russie de l'un de ses propres satellites en novembre a conduit à la formation de nombreux débris orbitaux et failli mettre en danger les hôtes de la Station spatiale internationale. Ce tir de missile anti-satellite a ravivé les crispations mondiales sur l'usage des armes spatiales. De fait, les tentatives de réglementation de ces armes butent pour l'instant sur un problème majeur : il n'en existe aucune définition acceptée internationalement. Un problème auquel Todd Harrison, chercheur au Centre pour les études internationales et stratégiques, un think tank américain, s'est attaqué dans un article publié en 2020. Ce dernier propose une classification en six catégories.



L'orbiteur Mangalyaan a décollé le 5 novembre 2013 en direction de la Planète rouge. Après un voyage de dix mois, le 24 septembre 2014, l'Organisation indienne de la recherche spatiale a célébré le succès de la mission Mars Orbiter et devient la première nation à placer une sonde en orbite autour de Mars.



en 2013 son premier satellite militaire sur fond de rivalité avec le Pakistan et la Chine. Le Japon, historiquement très axé sur l'exploration scientifique, a également inauguré des capacités satellitaires militaires en 2017. Et même pour les nations disposant déjà depuis des décennies de systèmes spatiaux militaires, la course n'est jamais finie. Les satellites français Ceres, lancés en novembre 2021, devraient par exemple octroyer à l'armée tricolore

une capacité de renseignement unique en Europe : l'écoute des communications radars et électromagnétiques. "On peut dire que le spatial, désormais massivement accessible, étend les compétitions économiques et les rivalités stratégiques qui animent le monde", résume Christophe Venet.

Conséquence logique : l'espace est de plus en plus vu comme une infrastructure stratégique. Attaquer les satellites d'un pays peut permettre de paralyser

ARMES CINÉTIQUES

TERRE-ESPACE : ce sont des systèmes physiques lancés depuis la Terre, comme les missiles antisatellite tirés par la Russie en 2021 et l'Inde en 2019 (et avant par la Chine et les États-Unis). Ces armes ont un inconvénient majeur : leur impact génère des champs de débris incontrôlables dans l'orbite terrestre.

ARMES NON CINÉTIQUES

TERRE-ESPACE : bien moins génératrice de débris, cette catégorie englobe des techniques de brouillage, lasers de puissance ou cyberattaques lancés depuis la Terre dans le but de neutraliser les capacités d'un satellite. Les États-Unis, la Russie, la Chine ou l'Iran ont démontré de telles

capacités, à l'image du laser antisatellite russe Peresvet.

ARMES CINÉTIQUES

ESPACE-ESPACE : il s'agit de satellites capables de tirer sur d'autres satellites, posant encore le problème des débris. L'Union soviétique a testé de manière répétée des armes cinétiques antisatellite co-orbitales durant la Guerre froide.

ARMES NON CINÉTIQUES

ESPACE-ESPACE : un satellite placé en orbite peut utiliser des micro-ondes de forte intensité, des lasers ou des brouilleurs pour désactiver un autre système spatial. Si aucun cas n'a été démontré, la France a accusé en 2018 la Russie de se livrer à ce type

d'action. Selon Paris, le satellite russe Luch-Olymp s'était rapproché "d'un peu trop près" d'Athena-Fidus, un satellite franco-italien.

ARMES CINÉTIQUES

ESPACE-TERRE : classique de SF, la capacité à bombarder une cible terrestre à partir de l'espace donnerait un avantage militaire décisif pour le pays qui la développerait. Rien ne prouve l'existence d'une telle arme.

ARMES NON CINÉTIQUES

ESPACE-TERRE : un tel système pourrait brouiller des véhicules ou des missiles à terre. Les États-Unis affichent leur volonté de développer un système de défense antimissile par laser, mais il n'existe pas d'exemple avéré à ce jour.

des secteurs-clés. Les nations développent donc des moyens de les protéger... voire, de plus en plus, d'espionner ou de neutraliser d'éventuels satellites ennemis. Cette logique de militarisation de l'espace métamorphose la structure même des armées. En 2015, le président chinois Xi Jinping officialisait ainsi un nouveau corps de l'Armée populaire de libération : la Force de support stratégique, chargée de centraliser toutes les opérations spatiales et de les intégrer avec les capacités de guerre électronique et cyber. Sur fond de soupçons d'espionnage d'un satellite franco-italien par un engin russe, la France annonçait en 2019 la création de l'armée de l'air et de l'espace. Son commandement a lancé le 9 mars 2021 l'opération AsterX, premier exercice militaire spatial en France et en Europe.

Cette intensification des rivalités en orbite n'a pas pour autant éclipsé les enjeux traditionnels qui se jouent autour de l'exploration spatiale et du vol habité. *"Elles permettent à une nation d'affirmer son rayonnement sur la scène mondiale, et aussi de développer un tissu industriel dans les hautes technologies"*, analyse Christophe Venet. L'Inde a par exemple lancé sa mission vers Mars, baptisée Mars Orbiter Mission, dès 2013... Et affiche désormais son ambition d'envoyer un homme dans l'espace en orbite terrestre dans une capsule. Israël a de son côté lancé une sonde lunaire, Beresheet, qui a échoué de peu son alunissage en 2019.

Dans ce paysage en pleine mutation, la hiérarchie historique du gotha spatial n'est cependant pas fondamentalement chamboulée. *"Une puissance spatiale reste une nation ayant les moyens de construire ses propres satellites et de les lancer depuis son territoire"*, pointe Isabelle

Une puissance spatiale reste une nation ayant les moyens de construire ses propres satellites, et de les lancer depuis son territoire

Sourbès-Verger. À ce titre, l'émirat est en trompe-l'œil : la pétromonarchie a, en réalité, constitué une équipe scientifique internationale, qui a travaillé en collaboration avec des universités américaines, puis a acheté un lancement sur un lanceur japonais. Parmi les vraies puissances spatiales, *"les États-Unis restent l'hyperpuissance"*, note Isabelle Sourbès-Verger. En témoigne leur budget annuel d'environ 50 milliards de dollars pour le civil et le militaire, stable depuis un demi-siècle. En comparaison, l'Union européenne et la Chine affichent respectivement environ 9 et 8 milliards. Viennent ensuite la Russie (4 à 5 milliards), l'Inde (1,8 milliard) et le Japon (1,2 milliard). Alors que la Chine affiche des progrès rapides et constants (*voir ci-contre*), *"elle en est encore à rattraper les États-Unis, l'Europe et la Russie sur l'ensemble des technologies spatiales, des lanceurs jusqu'aux sondes spatiales et au vol habité"*, note Isabelle Sourbès-Verger. Une chose est sûre : la course internationale à l'espace promet de faire rage dans la prochaine décennie. ■

L'Europe, puissance stagnante ?

Alors que les nations investissent toujours plus massivement dans le spatial, le Vieux Continent est-il en perte de vitesse ? *"C'est toujours une grande puissance en ce qui concerne les lanceurs ou les satellites, mais qui a fait le choix de demeurer incomplète et de se reposer sur des partenariats pour certains programmes comme le vol habité et l'exploration spatiale"*, pointe la chercheuse au CNRS Isabelle Sourbès-Verger. *"L'Europe se concentre sur une vision utile de l'espace, avec des projets comme Copernicus [observation*

de la Terre, NDLR] ou Galiléo [GPS européen]", confirme Christophe Venet, du Cnes. Reste qu'elle voit ses positions dominantes, notamment sur les lanceurs Ariane 5, chahutées par la compétitivité d'acteurs comme SpaceX. La société d'Elon Musk incarne la vitalité du New Space, cette montée en puissance des acteurs privés, soutenus par la puissance publique, qui ont revitalisé le spatial aux États-Unis. L'Europe, elle, ne bénéficie pas, comme les États-Unis ou la Chine, de géants du numérique que sont les Gafa (Google, Amazon,

Facebook, Apple) pour les uns, et les BATX (Baidu, Alibaba, Tencent, Xiaomi) pour l'autre, *"qui investissent à présent massivement dans l'espace"*, pointe Marc Julienne, chercheur à l'Institut français des relations internationales. Quant aux questions de défense dans un contexte de militarisation croissante de l'orbite terrestre, l'Europe souffre d'une absence de vision commune. *"Ce n'est pas le propre du spatial, mais de toutes les questions militaires et stratégiques en Europe"*, explique Isabelle Sourbès-Verger.

La Chine, bientôt l'empire de l'espace ?

Avec un programme spatial qui se déroule sans accroc, la Chine ambitionne de rattraper son retard sur les États-Unis. Son objectif : devenir la première nation technologique et scientifique en 2049.

Jeudi 29 avril 2021, l'empire du Milieu a placé en orbite le premier module de la station spatiale chinoise (SSC). Trois taïkonautes y ont séjourné pendant trois mois, signant au passage le vol le plus long de l'histoire de la Chine. La SSC sera pleinement opérationnelle fin 2022 après l'ajout de deux modules restants. Si cette station restera modeste – comparable à la station Mir d'avant les années 2000 –, elle sera vraisemblablement seule dans l'espace à partir de décembre 2024, date prévue pour l'arrêt de l'exploitation de la Station spatiale internationale. Autre symbole fort : le rover martien Zhurong s'est posé sur la Planète rouge le 14 mai pour une mission de quatre-vingt-dix jours, prolongée en août 2021 suite à son succès. Il y cohabite avec le rover américain Perseverance. *“La réussite chinoise témoigne*

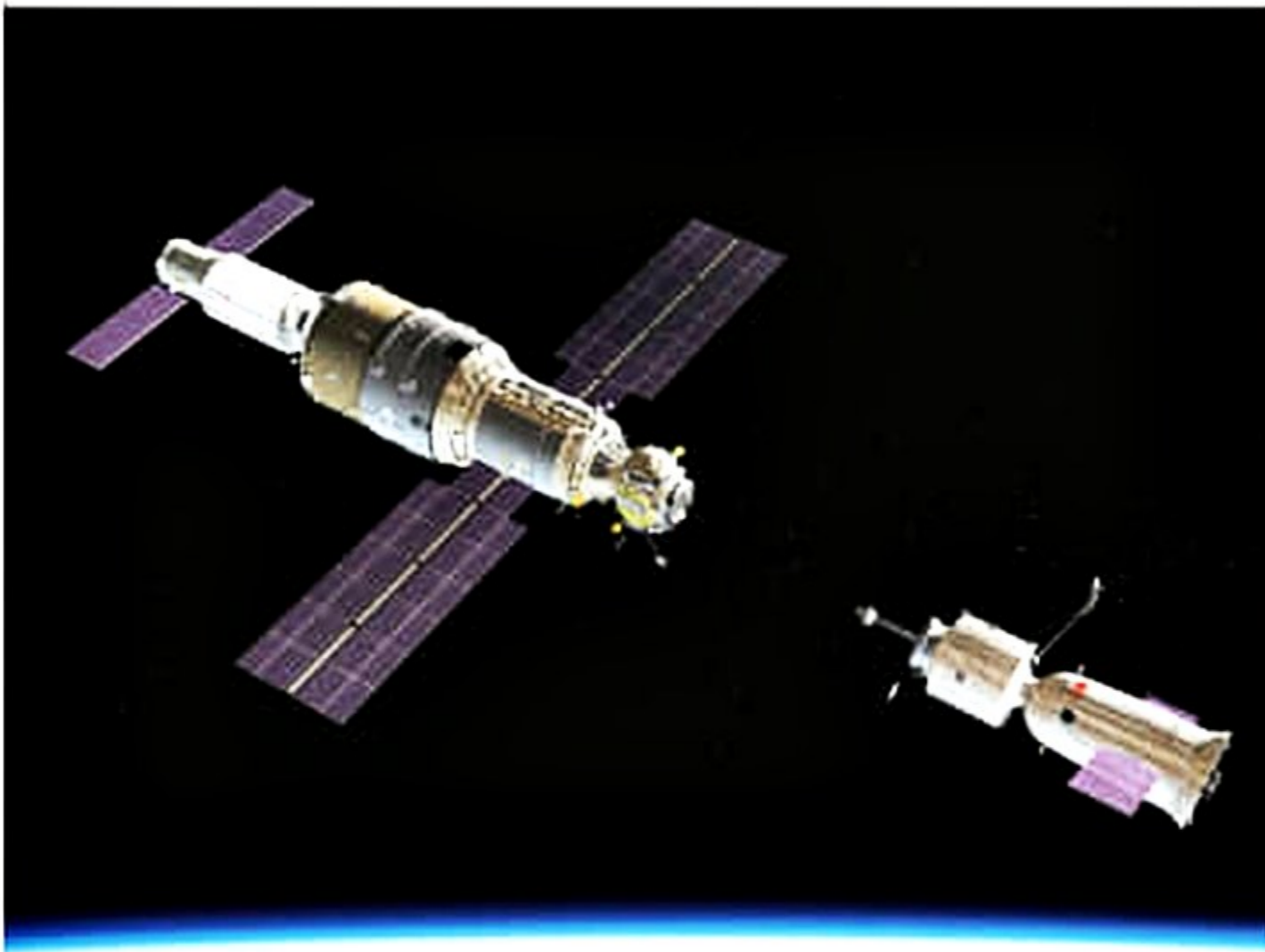
d'une expertise technologique remarquable, alors qu'une mission sur deux vers Mars est un échec”, salue Isabelle Sourbès-Verger, chercheuse au CNRS et spécialiste de géopolitique spatiale.

DES PROJETS FINANCÉS DANS LA DURÉE

Ces deux succès de 2021 illustrent la progression rapide et méthodique du programme spatial chinois. *“C'est un développement sur tous les fronts : ses programmes de lanceurs, constellations de satellites, exploration spatiale ou vol habité sont tous aussi ambitieux les uns que les autres”,* souligne Marc Julienne, spécialiste de la Chine à l'Institut français des relations internationales. Mais il serait faux de croire ce succès sorti du chapeau. *“La Chine ambitionne de devenir une puissance de premier plan depuis le premier programme spatial défini en 1958*

Le rover chinois Zhurong s'est posé en mai 2021 sur la plaine Utopia Planitia de Mars, à la recherche de traces d'eau.





▲ Le 17 juin 2021, Shenzhou-12, ici à droite, s'est amarré, avec 3 astronautes à bord, au module central (Tianhe) de la future station spatiale Tiangong-3.

par Mao Zedong", rappelle la géographe Isabelle Sourbès-Verger. Cette ambition s'est d'abord concrétisée par le développement d'une fusée Longue marche 1, qui a mis en orbite le premier satellite chinois en 1970. "Suite aux réformes conduites par Deng Xiaoping et à l'essor économique très rapide du pays durant les années 1980, le programme chinois a ensuite atteint une vitesse de croisière, au rythme des plans quinquennaux bien exécutés", raconte Marc Julienne. Le programme de vol habité a connu une étape cruciale en 2003 avec l'envoi du premier taïkonaute dans une capsule en orbite terrestre. Puis les réussites technologiques se sont enchaînées entre les missions lunaires (Chang'e 1, en 2007), la mise en orbite d'un précurseur de la station spatiale actuelle (Tiangong-1, en 2011), ou le lancement d'un vaisseau de ravitaillement (Tianzhou, en 2017).

Aujourd'hui, "la Chine est la puissance spatiale qui, après les États-Unis, connaît la marge de progression la plus soutenue", estime Isabelle Sourbès-Verger. Une réussite qui tient à un trait particulier : "La Chine ne fonctionne pas comme nos économies ; elle finance les projets dans la durée", poursuit la chercheuse. Son secteur spatial peut aussi s'appuyer sur les besoins intérieurs du pays, qui mise sur les satellites pour pallier son manque d'infrastructures terrestres et assurer la gestion de son immense territoire. "Le président Xi Jinping a formulé l'objectif que son pays devienne la première puissance mondiale avant le centenaire de la fondation de la République populaire de Chine, en 2049, ce qui passe ipso facto par une domination sur les technologies du spatial", pointe Marc Julienne. Cette ambition fédératrice amène l'empire du Milieu à se présenter comme le compétiteur des États-Unis.



▲ Juin 2013, au centre de lancement de satellites de Jiuquan, au nord-ouest de la Chine, la mission habitée Shenzhou-10 entre dans sa phase finale avec l'assemblage du lanceur Longue marche 2F.

Cette compétition s'exprime avant tout sur l'objectif de retour sur la Lune. "Sur ce point, la course à laquelle se livrent États-Unis et Chine n'est pas sans rappeler celle de la Guerre froide entre États-Unis et URSS", estime le chercheur. Jusqu'ici, la Chine affiche un programme d'exploration lunaire sans accroc, incarné par le succès récent de la mission Chang'e 5, qui a rapporté, en décembre 2020, des échantillons de sol lunaire sur Terre. Les missions Chang'e doivent culminer dans les prochaines années avec Chang'e 8, qui devrait se poser au pôle Sud lunaire afin d'y conduire des expériences d'utilisation des ressources. Un prélude à l'établissement d'une base habitée, la Station internationale de recherche lunaire. Menée en étroite coopération avec la Russie, sa construction devrait débuter entre 2026 et 2030. Puis, entre 2030 et 2035, plusieurs missions sont prévues pour accélérer la construction du site, de façon que de premiers



▲ En septembre dernier, les taïkonautes Nie Haisheng, Liu Boming et Tang Hongbo sont rentrés de leur mission après 3 mois à bord de la station spatiale chinoise.

aujourd'hui l'hyperpuissance spatiale qui domine tout le monde de très loin et dans tous les domaines", analyse Agnès Sourbès-Verger. La Chine demeure encore loin derrière en termes de budget (8 milliards de dollars contre 50). La première puissance asiatique n'a surtout pas comblé son retard technologique : "Elle en est encore à rattraper, certes rapidement, les acquis de l'Europe, de la Russie et surtout des États-Unis sur leurs domaines d'excellence respectifs", analyse Marc Julienne.

En réalité, la compétition Chine-USA relève en partie d'une mise en scène. "Il y a un jeu de dupes dans lequel les Américains exagèrent souvent la menace chinoise pour justifier leurs budgets toujours plus importants. Et les Chinois, en retour, voient leur image de puissance renforcée en étant présentés comme les grands concurrents des États-Unis", pointe Marc Julienne. L'exemple martien est parlant. Si la Chine a certes signé cette année un éclatant succès en plaçant sa sonde en orbite, en la faisant atterrir et en déployant son rover en une seule mission, les États-Unis l'ont fait en 1997 avec le rover Pathfinder. Autre chiffre frappant : sur 3 300 satellites opérationnels en 2021, les États-Unis en possédaient 1 900, contre 412 pour la Chine. "Dans la vision américaine, il est hors de question de perdre la suprématie sur un seul pan du spatial", résume Marc Julienne. Il n'en reste pas moins que la Chine a remporté en 2018 une première victoire mineure en réussissant 39 lancements de fusées... contre 31 pour les États-Unis. Le géant chinois est lancé à toute allure ; la compétition s'annonce rude. ■

humains assurent une présence permanente entre 2036 et 2040. Côté américain, le retour d'astronautes sur la Lune, prévu dans le cadre du programme Artemis, ne devrait pas avoir lieu avant 2025, selon la dernière échéance annoncée par l'administration Biden... même si certains analystes jugent une échéance autour de 2028 plus réaliste, compte tenu des retards technologiques et de la pandémie.

UNE COMPÉTITION MISE EN SCÈNE

L'objectif Mars est plus flou. La Chine planifierait des voyages humains pour 2033, 2035, 2037 et au-delà, selon les affirmations de Wang Xiaojun, directeur de l'Académie chinoise de technologie des lanceurs, lors d'une conférence sur l'exploration spatiale organisée récemment en Russie par visioconférence. La Nasa, elle, a évoqué une première mission habitée dans les années 2030... quand SpaceX annonce pouvoir le faire d'ici à 2026.

De là à imaginer Chine et États-Unis au coude-à-coude, il n'y a qu'un pas... que les spécialistes se refusent à franchir. "Les États-Unis restent



LÀ-HAUT, ÇA TOURNE!

La course à la première réalisation en apesanteur ressemble à une séquence de poursuite avec suspense et rebondissements. PAR PATRICK REBEAUD

Dans les années 1950-1960, l'espace devient synonyme de course pour les deux grands concurrents : Russes et Américains. L'Union soviétique remporte les premières victoires : premier satellite, premier homme puis première femme dans l'espace. Sous l'impulsion de Kennedy, les États-Unis envoient les premiers hommes sur la Lune. Avec les projets de films tournés dans l'espace, les vieilles rivalités résonnent-elles de nouveau ? On peut s'interroger lorsque l'on observe la chronologie du premier tournage de fiction.

LES AMÉRICAINS DÉGAINENT TOM CRUISE

Flash-back. Le rapprochement entre cinéma de fiction et espace "réel" se joue déjà depuis plusieurs

décennies. En 1984, *Return from Orbit* (long-métrage soviétique) intègre des plans tournés dans la station spatiale Salyut 7 et la sonde spatiale Soyouz T-9. En 2005, le cinéaste Werner Herzog glisse dans *The Wild Blue Yonder* (film anglo-franco-allemand) des images tournées en 1989 par la Nasa lors de la cinquième mission de la navette Atlantis. En 2012, des astronautes américains tournent le court-métrage de fiction *Apogee of Fear*. Ils revendiquent l'amateurisme de cette réalisation vite faite pendant leur temps libre à bord de la Station spatiale internationale. Point commun entre ces films : les scènes spatiales sont interprétées par des professionnels de l'astronautique, non du cinéma.

Le top départ des pros est donné le 5 mai 2020 par un tweet de l'administrateur de la Nasa,



> Le réalisateur russe Klim Chipenko observe la Terre depuis la Cupola, la fenêtre panoramique de l'ISS à bord de laquelle il est arrivé le 5 octobre dernier, accompagné de l'actrice Ioulia Peressild (au centre) et du cosmonaute Anton Shkaplerov.

Jim Bridenstine : "La Nasa est excitée de travailler avec Tom Cruise sur un film à bord de la Station spatiale !" Confirmation est donnée le 19 septembre par le Space Shuttle Almanac. Il est prévu que l'acteur s'envole avec le réalisateur Doug Liman à bord d'une capsule Space X. La formule "Tom Cruise + voyage spatial" a, sur un plan publicitaire, des allures de martingale parfaite.

La télévision n'est pas en reste. En septembre 2020, la société Axiom Space annonce son projet Space Hero : 15 saisons de télé-réalité ! Il semble que l'essentiel des tournages se fera dans un premier temps les pieds sur terre. Le jeu permettra aux candidats de gagner le ticket pour l'espace. Bref, tout semble sourire aux Américains.

LES RUSSES RELÈVENT LE DÉFI

Mais le rival russe sort du bois. Une annonce de casting lance la recherche d'un profil sportif : une actrice d'origine russe entre 25 et 40 ans. Elle doit savoir courir 1 km en moins de 3 minutes et 30 secondes et nager 800 m en 20 minutes.



▲ Les acteurs Vitali Solomin et Juozas Budraitis dans *Return from Orbit* (1984), qui intégrait des images filmées dans la station spatiale Salyut 7 et la sonde Soyuz T-9.

Pour Tom Cruise, les problèmes sont ailleurs. Ils viennent du retard pris par *Mission impossible*. Comme la plupart des tournages dans le monde, le septième opus de sa saga spectaculaire est ralenti par l'épidémie de Covid-19. Les Russes en profitent. Le 5 octobre, après quatre mois d'entraînement, l'heureuse élue (sur 3 000 postulantes), la comédienne Ioulia Peressild et le réalisateur Klim Chipenko, conduits par le cosmonaute Anton Shkaplerov, s'envolent depuis Baïkonour, au Kazakhstan, à destination de la Station spatiale internationale. Le réalisateur ne cache pas l'aspect compétitif de son projet. Dmitri Rogozine, patron de l'agence spatiale russe, et coproducteur du long-métrage, non plus. Le titre du film enfonce le clou : *Le Défi*. Les dix jours de tournage en apesanteur ont lieu à raison de deux heures quotidiennes avec l'équipage de la station spatiale.

Au même moment, l'interprète du capitaine Kirk dans *Star Trek*, William Shatner, 90 ans, accomplit son mémorable saut de puce spatial grâce à Jeff Bezos. Il ne s'agit pas d'un tournage de film, c'est hors-concours, mais le rapprochement entre fiction et réalité est largement médiatisé.

Alors ? Est-ce la fin de l'histoire pour Tom Cruise ? À coup sûr, non. Car s'il n'a pas gagné l'épreuve du premier tournage dans la Station spatiale internationale, on peut supposer qu'il remportera cette compétition sur un plan plus hollywoodien : celui du plus gros succès au box-office.

Et on se plaît à imaginer : après la surenchère à laquelle il nous a habitués, celle des risques toujours plus inouïs, des séquences toujours plus spectaculaires, Tom Cruise est-il du genre à rester confiné dans un vaisseau spatial ? Ou bien... fera-t-il une sortie extravéhiculaire ? Dans ce cas, il serait bien le premier ! À suivre. ■



Tourisme d'imm

Avec le début des vols commerciaux en 2021, un nouveau chapitre s'est bel et bien ouvert dans l'histoire de la conquête de l'espace. PAR MAGALI REBEAUD

Le 11 juillet dernier, le SpaceShipTwo de Virgin Galactic effectuait son premier vol touristique suborbital, avec à son bord le fondateur de la firme, Richard Branson. Il devançait ainsi de peu l'un de ses rivaux, Jeff Bezos, qui, le 20 juillet, s'envolait dans la capsule New Shepard de sa compagnie Blue Origin. Et mi-septembre, c'était au tour de SpaceX, créée par Elon Musk, de lancer son vaisseau Crew Dragon pour une première mission privée.

Décriés et réservés à une clientèle plus que fortunée, ces vols dits touristiques sont pourtant intéressants à plus d'un titre, selon Jean-François Clervoy, ancien astronaute (avec 3 missions à son

actif) et aujourd'hui président de Novespace : *"Ces missions privées contribuent à diminuer les coûts fixes et financent ainsi indirectement l'exploration spatiale, qui inclut les télescopes, les sondes et les vols habités. D'autre part, ils forment d'excellents ambassadeurs de la planète et de l'astronautique."* En effet, les quelque 600 humains qui ont vu la Terre depuis l'espace, ressenti les effets de l'impesanteur, franchi la frontière entre l'atmosphère terrestre et l'espace, dépassant ainsi cette ligne de Kármán fixée à 100 km d'altitude (selon les normes internationales), ont tous été ébahis et bouleversés. *"Le tourisme spatial est un marché complémentaire qui donne des opportunités. Nous avons besoin*

Jeff et Mark Bezos saluent leur maman depuis la capsule New Shepard, développée par Blue Origin, pendant leur vol suborbital effectué le 20 juillet.

quelques minutes pesantueur

de développer beaucoup de champs d'activité pour justifier les dépenses et avoir un retour sur investissement", souligne Michael Colglazier, P.-D.G. de Virgin Galactic.

Le *New Space*, caractérisé par l'avènement d'entreprises privées dans le domaine des vols habités, a été stimulé en 1996 par la création de l'*X Prize* – rebaptisé *Ansari X Prize* en 2004. Dix millions de dollars étaient offerts à la première organisation non gouvernementale qui lancerait dans l'espace (au-dessus de 100 km, donc) un véhicule spatial habité, à deux reprises, en moins de deux semaines. Ce prix a été remporté en 2004 par le vaisseau *SpaceShipOne* de la société *Scaled Composites*. Mais trois ans auparavant déjà, le 28 avril 2001, l'homme d'affaires américain Dennis Tito rejoignait l'*ISS* à bord de



Soyouz TM-32 pour un séjour de six jours, devenant ainsi le premier touriste de l'espace, moyennant 20 millions de dollars réglés à Roscosmos, l'agence spatiale russe, par l'intermédiaire de la société américaine *Space Adventures*. Entre 2001 et 2009, cette entreprise a envoyé sept touristes spatiaux dans l'*ISS* (dont un qui a effectué deux voyages).

L'activité a ensuite été suspendue lorsque l'effectif permanent de la station spatiale est passé de trois à six astronautes.

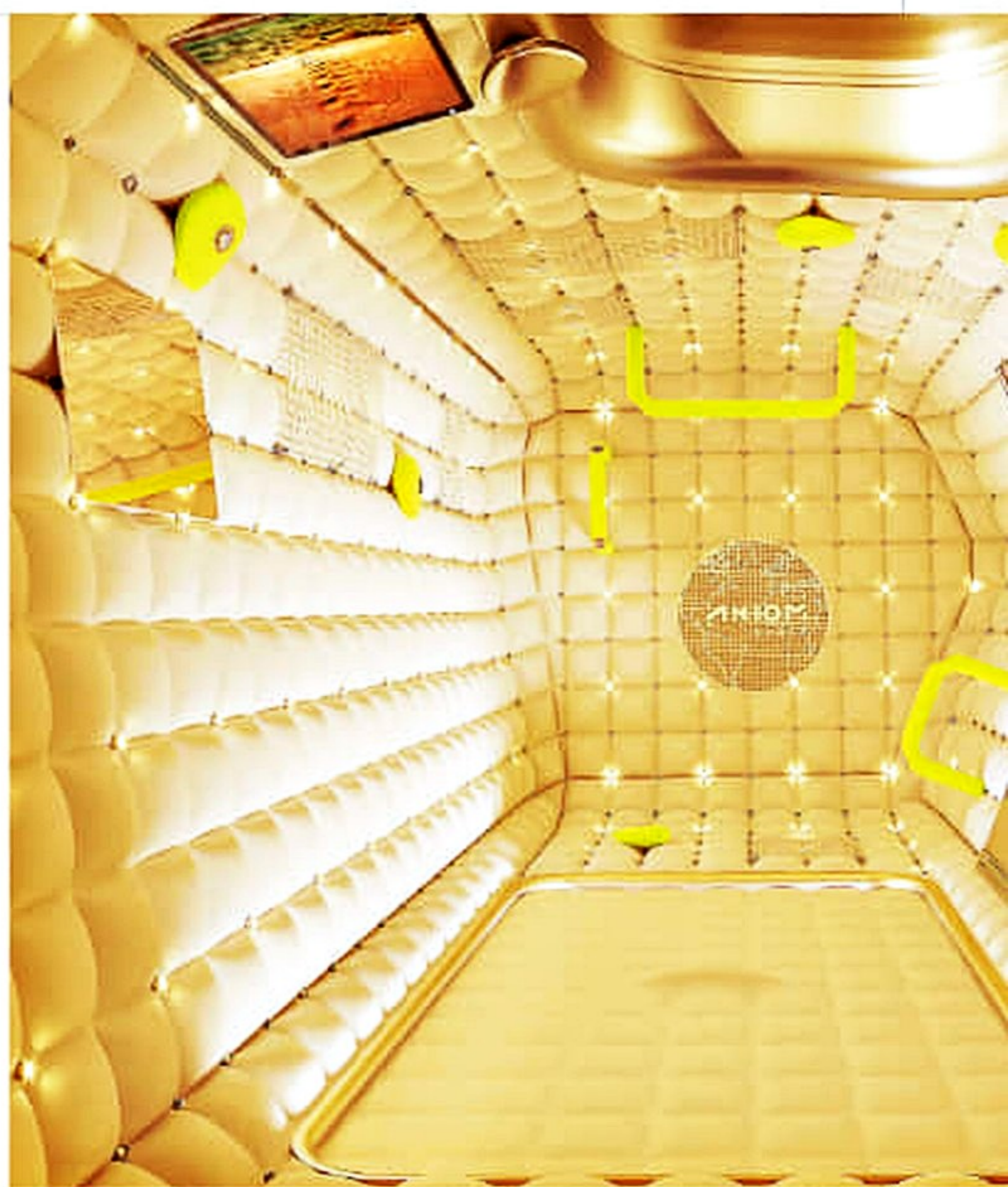
Aujourd'hui, à condition toutefois d'avoir des moyens financiers à la hauteur de l'aventure, deux formes de tourisme spatial sont accessibles : le séjour en orbite, d'une part, et le vol suborbital, qui consiste à passer quelques minutes à une altitude supérieure à 100 km, d'autre part.

LE SÉJOUR EN ORBITE

Pour une expédition orbitale, si plusieurs projets sont en cours d'étude, l'offre actuelle se limite à deux options : embarquer à bord d'une capsule Crew Dragon de SpaceX, ou bien d'un Soyouz-TM de Roscosmos. Ensuite, deux possibilités sont offertes : orbiter en restant dans le vaisseau, en expédition de plusieurs jours autour de la Terre ou de la Lune, par exemple, ou bien grimper à bord de la Station spatiale internationale.

La branche touristique de SpaceX, à laquelle la Nasa a confié le transport de fret vers l'ISS ainsi que, plus récemment, le convoyage des astronautes, a organisé en septembre dernier son premier vol avec des non-professionnels. La mission, baptisée Inspiration4 et intégralement financée par le milliardaire américain Jared Isaacman, a embarqué quatre voyageurs à bord du Crew Dragon Resilience. Le vaisseau a été placé en orbite par une fusée Falcon 9 partiellement réutilisable, également développée par SpaceX. Lanceur à 2 étages propulsé par 10 moteurs (9 pour le premier étage de la fusée) utilisant un mélange d'oxygène liquide et de kérosène, la Falcon 9 emportait le Crew Dragon à son sommet : quarante-cinq secondes après le décollage, à 90 km d'altitude, les propulseurs se sont éteints. Le deuxième étage ainsi que la capsule Crew Dragon ont alors poursuivi leur ascension, tandis que le premier étage entamait une descente contrôlée vers le sol.

La capsule Crew Dragon en cours d'amarrage à l'ISS.



Le moteur du deuxième étage s'est ensuite déclenché, puis la capsule s'est séparée douze minutes après le décollage pour entamer son voyage solo.

Pas d'amarrage à l'ISS au programme de cette mission, mais un vol de trois jours en orbite terrestre, à une altitude à l'apogée de 585 km (altitude à laquelle aucun humain n'est retourné depuis les missions Hubble, et plus loin que l'ISS). Durant ces soixante et onze heures de vol autonome, 45 orbites ont été parcourues. Avant cette aventure, les quatre membres d'équipage avaient bien sûr suivi un sérieux entraînement abondant, entre autres, les procédures d'urgence et la gestion de la situation en apesanteur. Pour cette expédition, le mécanisme d'amarrage de l'engin a été remplacé par une coupole panoramique offrant aux passagers une vue exceptionnelle sur la Terre... La mission, qui affichait quelques objectifs scientifiques (étude physiologique sur l'équipage, par exemple), se voulait aussi philanthropique et a permis de collecter plus de 200 millions de dollars de dons pour l'hôpital St. Jude de Memphis (États-Unis), spécialisé dans le traitement des cancers chez l'enfant. Après ce périple de trois jours, la capsule est entrée dans l'atmosphère puis, freinée par ses parachutes, a amerri au large des côtes de la Floride.

Dans les mois à venir, des vols privés à destination de l'ISS sont prévus, entre autres pour le compte d'Axiom Space (société américaine cofondée en 2016



Ci-contre, un des compartiments pour l'équipage de la première station spatiale privée, Axiom. Le design "en nid d'abeille" a été imaginé par Philippe Starck. Ci-dessous, un module destiné à être amarré à l'ISS

“ Ces missions privées contribuent à diminuer les coûts fixes et financent ainsi indirectement l'exploration spatiale ”

par Michael Suffredini, ancien chef de programme ISS pour la Nasa) : SpaceX a signé un accord pour envoyer des touristes passer huit jours dans l'ISS, début 2022, pour un prix de 55 millions de dollars par siège. "Aujourd'hui, la demande excède ce que seront, à notre avis, les opportunités à bord de la station", explique Angela Hart, en charge du développement commercial de l'orbite basse pour la Nasa.

De son côté, l'Agence spatiale russe Roscosmos a également décidé de se relancer dans le business touristique. Et après le séjour dans l'ISS de l'équipe de tournage d'un film, puis du milliardaire japonais Yusaku Maezawa et de son assistant (du 8 au 20 décembre 2021), d'autres projets sont en cours.



Yusaku Maezawa

EN VOL SUBORBITAL

Les deux concurrents de SpaceX et de Roscosmos dans cette aventure spatiale dite touristique, Blue Origin et Virgin Galactic, se sont quant à eux orientés vers le vol suborbital, à savoir une expérience de quelques minutes dans l'espace.

Les trois premiers vols de Blue Origin en 2021 auront été marquants à plus d'un titre. Le premier embarquait Jeff Bezos (le fondateur de Blue Origin), son frère, une aviatrice américaine de 82 ans, Wally Funk, ainsi qu'un Néerlandais de 18 ans. Et, pour sa deuxième mission, New Shepard accueillait... le capitaine Kirk de *Star Trek*, l'acteur William Shatner devenant à 90 ans la personne la plus âgée à être allée dans l'espace. Pour son troisième, le 11 décembre dernier, a pris place à bord, Laura Shepard, la fille d'Alan Shepard, le premier Américain dans l'espace en 1961

New Shepard comprend une fusée monoétage, propulsée par un moteur-fusée qui brûle un mélange d'oxygène et d'hydrogène liquides, et la capsule de 15 m³ fixée au sommet destinée à embarquer six voyageurs. Le décollage se déroule d'une base située dans l'ouest du Texas. Lorsque la propulsion est coupée, à environ 40 km d'altitude, la capsule se sépare du lanceur et, sous l'effet de l'inertie, continue son ascension jusqu'à dépasser l'altitude de

100 km. Les voyageurs sont en impesanteur pendant près de quatre minutes et profitent d'une vue imprenable sur la courbure de la Terre à travers six grandes fenêtres. Après avoir atteint son apogée, la capsule amorce sa descente, avec une décélération atteignant près de 5 g (g, pour "gravité", étant l'unité d'accélération/décélération). De son côté, la fusée effectue son retour sur terre. À 1,5 km du sol, elle rallume son moteur-fusée pour un atterrissage en douceur en position verticale, sur une zone proche du pas de tir. La capsule poursuit sa descente suspendue sous 3 grands parachutes, pour atterrir, elle aussi, à quelques kilomètres du site de lancement. Au total, un vol de dix à douze minutes pour les occupants du vaisseau. Le véhicule est entièrement autonome, contrôlé par des ordinateurs de bord, sans pilote. Chaque personne à bord est un passager. Le prix du ticket pour l'espace à bord

de New Shepard serait compris entre 200 000 et 300 000 dollars.

Même s'il est également suborbital, le concept de vol de Virgin Galactic (société créée en 2004 par Richard Branson en association avec Burt Rutan, fondateur de Scaled Composites) est très différent de celui de Blue Origin. Et, malgré les retards accumulés durant sa phase de développement et de tests, c'est donc Virgin qui a donné le coup d'envoi aux missions touristiques en juillet dernier. Un vol d'environ soixante-dix minutes jusqu'à une altitude de 85 km, frôlant les limites de l'espace si l'on s'en réfère à la norme fixée par la FAI. L'avion spatial à moteur-fusée, le SpaceShip, peut emporter six passagers après avoir été largué à haute altitude par un avion porteur, le White Knight Two, un quadri-moteur à double carlingue. Le vol, qui doit durer en totalité environ deux heures trente, se décompose

Après un vol suborbital et un atterrissage réussi, l'équipage du New Shepard, emmené par Jeff Bezos, salue l'assistance devant la fusée Blue Origin qui leur a permis d'atteindre l'espace.





Le vaisseau mère Virgin Eve porte le vaisseau Virgin Unity pour lui donner l'impulsion qui a permis au milliardaire Richard Branson d'atteindre la frontière Terre-espace, en juillet dernier (ci-dessous).



en plusieurs phases. Après son largage, l'avion spatial allume son moteur-fusée et entame une montée à la verticale. Les passagers subissent une accélération de près de 4 g. À une altitude d'environ 70 km, le moteur-fusée s'éteint et l'avion continue sur sa trajectoire jusqu'à son apogée. Les passagers peuvent alors détacher leur ceinture, ils sont en impesanteur et flottent librement dans la cabine pendant environ cinq minutes. Pour contempler le

spectacle de la Terre, chaque passager dispose de deux grands hublots, l'un sur le côté de la cabine et l'autre au-dessus de sa tête. À environ 110 km d'altitude, la vitesse ascensionnelle de l'avion devient nulle et celui-ci commence sa descente. Une partie des ailes pivote à 65°, permettant à l'avion de descendre comme un volant de badminton, en "feuille morte". Lorsque l'appareil arrive à une altitude où la densité de l'air est suffisante (environ 12 km), ses ailes sont remises en position normale et il achève son vol en planant, jusqu'à l'atterrissage. *"C'est un rêve d'enfant. Je voulais être astronaute. Alors, dès que j'ai su qu'il était possible de connaître une telle expérience, c'est devenu mon objectif... au prix de nombreux sacrifices. Je voulais faire partie des 1 000 premiers Terriens à vivre cela"*, raconte Yves Pleindoux, consultant aéronautique et l'un des premiers Français qui s'envolera dans l'espace avec Virgin Galactic. Yves a en effet acheté son billet en décembre 2010. Compte tenu de la liste d'attente, son vol se déroulera au mieux en 2023... *"Je vivrai une expérience qui aura duré près de quinze ans... mais ce sera en fait l'expérience et le rêve d'une vie."* En attendant leur tour, les "futurs astronautes" (près de 600 ont déjà payé leur vol, entre 200 000 et 250 000 \$) forment une communauté. Régulièrement, Virgin Galactic leur propose des rencontres, des visites, des événements VIP... *"Nous avons ce sentiment d'être, en quelque sorte, des pionniers. C'est pourquoi j'apprécie peu le terme de 'touriste'. Nous faisons partie de l'aventure, nous suivons l'avancement des conceptions, des travaux et des essais, et ce, depuis des années ! Nous avons*

" Nous avons ce sentiment d'être, en quelque sorte, des pionniers. C'est pourquoi j'apprécie peu le terme de "touriste"

même participé à la mise au point de notre siège", poursuit Yves Pleindoux. Les futurs passagers ont également été conviés à découvrir leur vaisseau sur le Spaceport America d'où ils décolleront. Situé à Las Cruces, dans l'état américain du Nouveau-Mexique, cet immense "port spatial", développé par Virgin Galactic et ouvert en 2011, possède une piste de plus de 3 km de long. Ces vols commerciaux à proprement parler devraient débuter fin 2022.

"Ce que j'attends surtout de cette 'ouverture' de l'espace, c'est le retour d'expérience que feront ces touristes, la façon dont ils vont en parler, dont ils vont évoquer et partager leurs émotions, leurs ressentis. Que va-t-on apprendre ? Toute la pertinence est là !" considère Jacques Arnould, expert éthique

au Cnes. Pour lui, "nous avons besoin d'aller dans l'espace pour mieux vivre sur Terre". En effet, la première chose dont parlent ceux qui sont allés dans l'espace, c'est la Terre ! "Depuis l'espace, nous réalisons que la Terre est unique, isolée et magnifique. Cet émerveillement, cette émotion extrême qui est appelée l'overview effect ("perspective plongeante") nous marque à vie !" confie Jean-François Clervoy. Ce fascinant overview effect, cette prise de conscience de la singularité de la Terre et de notre responsabilité à son égard, tous les astronautes en témoignent. Tout comme ses prédécesseurs, Thomas Pesquet a largement souligné à quel point notre planète vue de la Station spatiale internationale paraissait fragile... ■

Allumage du moteur BE-4 de la fusée Blue Origin sur son site de lancement, dans l'ouest du Texas, près de Van Horn.



Quel impact environnemental ?

Cette industrie spatiale privée et ces vols soulèvent d'importantes interrogations quant à leur impact environnemental. D'après les données de la Federal Aviation Administration (FAA), le taux d'émission de CO₂ global d'une mission complète de Virgin Galactic serait de l'ordre de 27 tonnes. À raison de six passagers par vol, cela équivaut à environ cinq allers-retours Paris-New York effectués par une personne. Notons que ces chiffres de la FAA datent et que, depuis, Virgin a annoncé que son impact était plus faible. Du côté de Blue Origin, sa fusée New Shepard utilisant un mélange d'hydrogène et d'oxygène liquides, elle ne produit quasiment pas de CO₂ en vol.

Mais, pour fournir l'énergie nécessaire à cette propulsion (l'hydrogène, en particulier), près de 90 tonnes de CO₂ par vol sont émises ; soit l'équivalent d'environ quinze allers-retours Paris-New York effectués par une personne. D'autre part, la vapeur d'eau dégagée est un important gaz à effet de serre... Christophe Bonnal, expert à la direction des lanceurs du Cnes, estime que "le véritable problème de cette activité est que le véhicule permet d'aller du point A au point... A ! Il s'agit purement de tourisme réservé à quelques personnes. Ces opérateurs font cela car il y a un marché du suborbital." Et chez SpaceX, le rapport d'évaluation environnementale

indique que l'empreinte carbone totale du kérosène et de l'oxygène de la mission serait d'un peu plus de 1 000 tonnes, ce qui équivaut à environ cinq allers-retours Paris-New York effectués par un Boeing 747. Ces différents vols entraîneraient par ailleurs la production de suies, à savoir un agrégat polluant de composés chimiques, pour la plupart riches en carbone. "Toutefois, compte tenu du faible nombre actuel de vols privés, leur impact environnemental peut être considéré comme tout à fait négligeable", poursuit Christophe Bonnal. Mais, évidemment, si l'activité spatiale privée venait à se développer, il faudrait alors reconsidérer son empreinte.

ABONNEZ-VOUS À **SCIENCE & VIE**

ET PROFITEZ DE TOUS VOS PRIVILÈGES ABONNÉS

1 numéro par mois

6 hors-séries par an



L'accès illimité au site internet et à l'appli Science & Vie

- ✓ Consultez plus de 12 ans d'archives
- ✓ Retrouvez le magazine et ses hors-séries en version numérique
- ✓ Plus de 50 contenus exclusifs par semaine
- ✓ **PRIVILÈGE** : l'accès à Science & Vie TV
- ✓ Et accédez à d'autres contenus exclusifs...



Pour y accéder, je dois indiquer **IMPÉRATIVEMENT** mon adresse e-mail.

L'offre Liberté

3€ ← **-50%**
le 1^{er} mois

SANS ENGAGEMENT

GRAND JEU CONCOURS*
Exclusivité **SCIENCE & VIE!**

Soyez peut-être l'heureux lecteur à gagner
un vol en apesanteur
à bord de l'Airbus A310 Zéro-G
avec la contribution et collaboration du CNES.

*Voir conditions de participation du jeu concours page 6 et 7 de ce Hors-série.

BULLETIN D'ABONNEMENT à retourner sous enveloppe affranchie à : Science et Vie - Abonnements - 59898 Lille cedex 9

1 Je choisis mon offre d'abonnement et mon mode de paiement :

M030 # D1366426

LA MEILLEURE OFFRE

Offre Liberté : Je règle par prélèvement **3€ le premier mois** (puis 5,90€ par mois) au lieu de **11,90€*** et je reçois **SCIENCE & VIE** tous les mois + 6 hors-séries par an + l'accès au site. Résiliable à tout moment sans frais. Après 1 an, je serai prélevé de 6,90€ par mois. (1)

-50%

Je complète l'IBAN à l'aide de mon RIB et je n'oublie pas de joindre mon RIB.

IBAN : **F R** _____

Vous autorisez Reworld Media Magazines à envoyer des instructions à votre banque pour débiter votre compte, et votre banque à débiter votre compte conformément aux instructions de Reworld Media Magazines. Créancier : Reworld Media Magazines 40 Avenue Aristide Briand 92220 Bagneux France. Identifiant du créancier : FR 05 222 489479

Date : ____/____/____
Signature obligatoire :

▲ Cette offre est disponible uniquement en joignant votre R.I.B. (Relevé d'Identité Bancaire) ▲

L'OFFRE 1 AN

Offre Intégrale : 1 an (12 n^{os}) + 6 hors-séries + l'accès au site. Je règle en une seule fois **79,90€** au lieu de **142,80€***. (2)

-44%

Pour l'offre 1 an, je règle par **chèque bancaire ci-joint** libellé à l'ordre du magazine Science et Vie.

Vous souhaitez régler par carte bancaire ?
Rendez-vous sur **www.kiosquemag.com**
c'est rapide, simple et 100% sécurisé !



2 J'indique les coordonnées du bénéficiaire de l'abonnement :

Nom** : _____

Prénom** : _____

Adresse** : _____

CP** : _____ Ville** : _____

Date de naissance : _____ (pour fêter son anniversaire)

Tél. (portable de préférence) : _____ (Envoi d'un SMS en cas de problème de livraison)

Email : _____

(Pour gérer l'abonnement, accéder aux services numériques et recevoir nos offres promotionnelles. L'adresse e-mail ne sera pas communiquée à des partenaires extérieurs.)

* Le prix de référence à l'année se compose du prix kiosque (58,80 € sans HS, 94,50 € avec HS), des frais de port (7,32 € sans HS, 8,58 € avec HS), du site internet (41,40 €). ** À remplir obligatoirement. Offre réservée en France Métropolitaine valable jusqu'au 30/06/2022. ** DOM-TOM et autres pays nous consulter. Le produit vous sera adressé dans un délai de 4 semaines après réception de votre règlement et dans la limite des stocks disponibles. Vous disposez, conformément à l'article L 221-18 du code de la consommation, d'un droit de rétractation de 14 jours à compter de la réception du magazine en notifiant clairement votre décision à notre service abonnement. Le coût du renvoi de(s) produit(s) est à votre charge. Responsable de traitement des données personnelles : Reworld Media Magazines SAS. Finalités du traitement : gestion de la relation client, opérations promotionnelles et de fidélisation. Données postales et téléphoniques susceptibles d'être transmises à nos partenaires. Conformément à la Loi informatique et Libertés du 6-01-78 modifiée, vous pouvez exercer vos droits d'opposition, accès, rectification, effacement, portabilité, limitation à l'utilisation de vos données ou donner vos directives sur le sort de vos données après décès en écrivant à Reworld Media-DPD, c/o service juridique, 40 avenue Aristide Briand 92220 Bagneux, ou par mail à dpd@reworldmedia.com. Vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL - www.cnil.fr. Pour toute autre information, vous pouvez consulter nos CGV sur kiosquemag.com.





SÉBASTIEN ROUQUETTE

À QUOI SERVENT LES VOLS ZÉRO-G?

Chaque année, le Cnes organise deux campagnes de trois vols chacune à bord de l'Airbus A310 Zero G, de la société Novespace, basé à l'aéroport de Bordeaux-Mérignac. Les scientifiques y mènent des expériences et testent des dispositifs spatiaux. PAR MAGALI REBEAUD

SVHS: *Quelle est la particularité de l'Airbus A310 Zero G et pourquoi le Cnes l'utilise-t-il ?*

Sébastien Rouquette: Cet avion est le dernier d'une lignée d'appareils de légende en Europe, les zéro-G. Depuis plus de trente ans, ils sont utilisés par les agences spatiales comme des laboratoires d'impesanteur. Grâce à une technique de pilotage très pointue, ils permettent de déployer des expériences dans des conditions comparables à celles de la Station spatiale internationale. Un trio de pilotes agit de façon synchronisée afin de placer et maintenir l'appareil sur une trajectoire balistique

d'impesanteur – une portion de trajectoire orbitale – selon une manœuvre appelée la parabole, au cours de laquelle l'avion est en chute libre pendant vingt-deux secondes. Lors d'un vol de trois heures trente, 31 paraboles sont exécutées, séparées par des périodes de vol en palier d'une à trois minutes. Durant la parabole, l'avion ne vole plus : il "tombe" autour de la Terre, comme sur une trajectoire orbitale !

SVHS: *Quels types de recherches ou d'expériences sont réalisés ?*

S.R. : Les campagnes de vols du Cnes permettent de réaliser

> Sébastien Rouquette, chef de projet Vols paraboliques au Cnes.



les programmes d'une quarantaine de laboratoires en France (CNRS, Inserm, universités...). Les équipes qui travaillent à bord proviennent de domaines variés : recherche fondamentale ou appliquée en physiologie, neurologie, cardiologie, biologie, physique de la matière granulaire, physique des fluides, astrophysique, recherche et développement pour l'industrie spatiale, ou non spatiale. L'avion zéro-G permet



Expériences menées bien harnaché et en impesanteur à bord de l'A310 Zero G.

également de tester les technologies spatiales du futur dans le domaine satellitaire ou celui de l'exploration. Ce secteur encore balbutiant prend peu à peu de l'ampleur avec la préparation des vols vers la Lune et la perspective lointaine des vols martiens.

SVHS: Pourquoi effectuez-vous ces expériences en impesanteur? Qu'est-ce que cela apporte de plus qu'en laboratoire, sur Terre?

S.R.: Pour comprendre un phénomène (chimique, physique, biologique, physiologique...), il faut tenter de déchiffrer les mécanismes de son fonctionnement dans diverses conditions. C'est par exemple ce que fait l'astrophysique en observant

les objets cosmiques dans différentes gammes de longueurs d'onde. Ici, il s'agit de placer le sujet d'étude en impesanteur afin d'offrir un point de vue différent sur les mécanismes qui régissent son fonctionnement ou son comportement. Par ailleurs, les études scientifiques réalisées sur Terre ne permettent pas toujours de mettre en évidence toutes les caractéristiques d'un phénomène, en raison de la pesanteur qui perturbe ou masque certaines facettes de celui-ci. Étudier certains phénomènes peut donc se révéler compliqué dans des laboratoires classiques, au sol. Pour s'affranchir de quelques effets parasites liés à la pesanteur,

“ Durant la parabole, l'avion ne vole plus : il "tombe" autour de la Terre, comme sur une trajectoire orbitale !

un bon nombre de chercheurs ont dès lors recours aux vols paraboliques.

SVHS: Un exemple en particulier?

S.R.: La recherche médicale en micropesanteur nous éclaire sur les mécanismes de la physiologie de l'être humain. En effet, les séjours en impesanteur ont des effets sur le corps très proches de ceux du vieillissement (perte de la masse osseuse et musculaire, dégradation des artères...). Les expériences réalisées dans ce milieu particulier trouvent donc de manière fréquente des applications dans la médecine sur Terre afin de prévenir et de traiter certaines pathologies bien terrestres (ostéoporose, troubles de l'équilibre...), ou d'apporter des outils de diagnostic de ces affections (échographie, densitométrie osseuse...). Avec ces campagnes, la France et l'Europe se placent à la tête de la recherche scientifique en micropesanteur au niveau international.

SVHS: Les astronautes viennent-ils "s'accoutumer" à l'impesanteur dans cet avion?

S.R.: C'est effectivement un terrain d'entraînement pour les astronautes européens qui se préparent à se repérer, travailler et manipuler des objets en lévitation. Cependant, l'entraînement d'un astronaute est aujourd'hui essentiellement géré par nos collègues américains ou russes. La présence des astronautes européens dans l'avion zéro-G relève plus de l'exception opérationnelle ou de la découverte que d'une part fondamentale de leur entraînement... À moins, bien sûr, que l'un d'eux ne soit lui-même pilote de l'avion, comme Thomas Pesquet depuis 2018. ■

Animo stronautes



*Merçi pour votre participation
à mon succès du 18 Octobre 1963*



Félicette

La plupart y ont laissé leur vie. Qui sont ces héros à quatre pattes ou plus qui ont ouvert la voie de la conquête spatiale? PAR AMANDA SCHREPF

Félicette, au service de la France

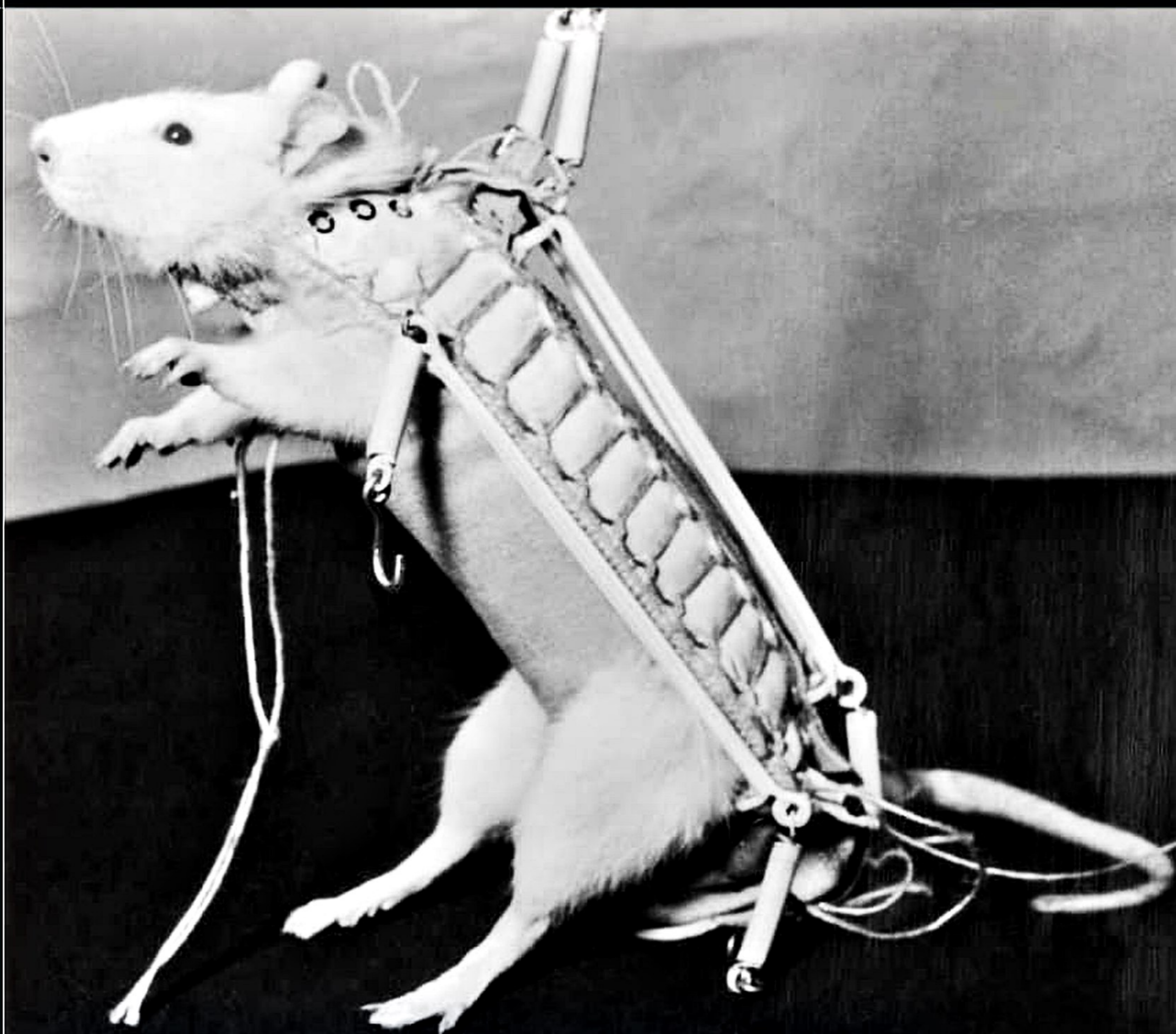
Le 18 décembre 2019, dans le hall des pionniers de l'université internationale de l'espace, à Strasbourg, était inaugurée une statue en bronze à l'effigie de Félicette, la seule chatte à avoir fait un aller-retour dans l'espace pour le compte de la France. Le 18 octobre 1963, à 8 h 09, la fusée française Véronique AGI V47 décolle depuis Hammaguir, en Algérie, emportant une chatte de gouttière au pelage noir et blanc, choisie pour son calme lors des entraînements. Son nom : C 341. Les chercheurs du Centre d'enseignement et de médecine aéronautique (Cerma) lui ont implanté des électrodes intracrâniennes avant le vol, afin de recueillir les données de l'activité neurologique en micropesanteur. Car à l'époque, les félins sont particulièrement utilisés pour les études de neurophysiologie. La chatte revient sur Terre 13 minutes après le lancement, et avoir atteint 157 km d'altitude. Après deux mois d'études, elle sera euthanasiée afin de récupérer les électrodes dont les données n'ont pas montré de dysfonctionnement des structures cérébrales, si ce n'est une légère somnolence au cours du vol, baptisée "inhibition centrale".



Des chiennes sacrifiées et honorées

Elle était russe et s'appelait Laïka. Le 3 novembre 1957, elle devient le premier chien à effectuer un vol spatial à bord du satellite Spoutnik 2. Si le retour sur Terre n'était pas prévu – à l'époque, l'Union soviétique ne sait pas comment faire revenir sur terre un engin spatial placé en orbite –, la chienne devait vivre une dizaine de jours. En réalité, elle décède quelques heures après le lancement, à cause d'une probable anomalie dans le système de régulation de température. Un sacrifice sur fond de guerre froide et de course à la conquête spatiale qui a ému bien au-delà des frontières soviétiques. Spoutnik 2 se désintègrera dans l'atmosphère terrestre le 14 avril 1958. Seul retour de ce premier vol suborbital : les mesures de la puissance des rayons cosmiques transmises par les instruments embarqués.

Un peu plus de deux ans plus tard, le 19 août 1960, le satellite soviétique Korabl-Spoutnik 2 décolle avec à son bord deux chiennes, Belka et Strelka, 1 lapin gris, 40 souris, 2 rats et des mouches. Ils ont été filmés pendant le voyage en orbite basse, avant d'être récupérés vivants le lendemain. Ces expériences ont préparé le vol orbital de Youri Gagarine, le 12 avril 1961, avec la mission Vostok 1.



Les rongeurs, de tous les voyages ou presque

Les souris Fe, FI, Fo, Fum et Phooey sont les derniers animaux à être allés sur la Lune, en 1972, accompagnées de l'astronaute Harrison Schmitt. Elles ont fait 75 fois le tour de notre satellite à bord d'Apollo 17, dernière mission du programme Apollo.

Mais ces rongeurs n'ont pas pour autant arrêté les voyages orbitaux car leur petite taille et leurs conditions d'élevage faciles permettent d'envoyer plusieurs individus dans l'espace et de mener des expériences simultanées en vol et sur

Terre avec des souches consanguines, qui ont le même ADN. Autre avantage : leur durée de vie de seulement deux ans donne une vision accélérée de l'évolution de l'organisme tant aux niveaux moléculaire et cellulaire que systémique. Ainsi, deux mois en orbite pour une souris équivalent à une dizaine d'années de vie humaine. Il s'agit de comprendre les effets des longs séjours dans l'espace, mais aussi de trouver des traitements pour des maladies comme l'ostéoporose ou l'atrophie musculaire. En 2019,

une expérience a été menée sur un groupe de souris mutantes pour étudier les effets de la microgravité sur la masse musculaire. Bilan : sur l'ISS, le groupe de contrôle, non modifié, avait perdu jusqu'à 18 % de sa masse musculaire, celui modifié sur Terre avant le départ l'a maintenue, alors que les 8 génétiquement modifiées directement dans l'ISS ont été celles qui ont le plus développé leur masse musculaire (+27 %) par rapport à leurs jumelles, restées sur Terre (+11 %).

En 2021, des recherches sur des



Vêtu d'une combinaison anti-g intégrant un système de dépressurisation, le rat Hector décolle le 22 février 1963 à bord d'une fusée Véronique. À son retour, il est présenté sain et sauf à la presse par le Cerma.

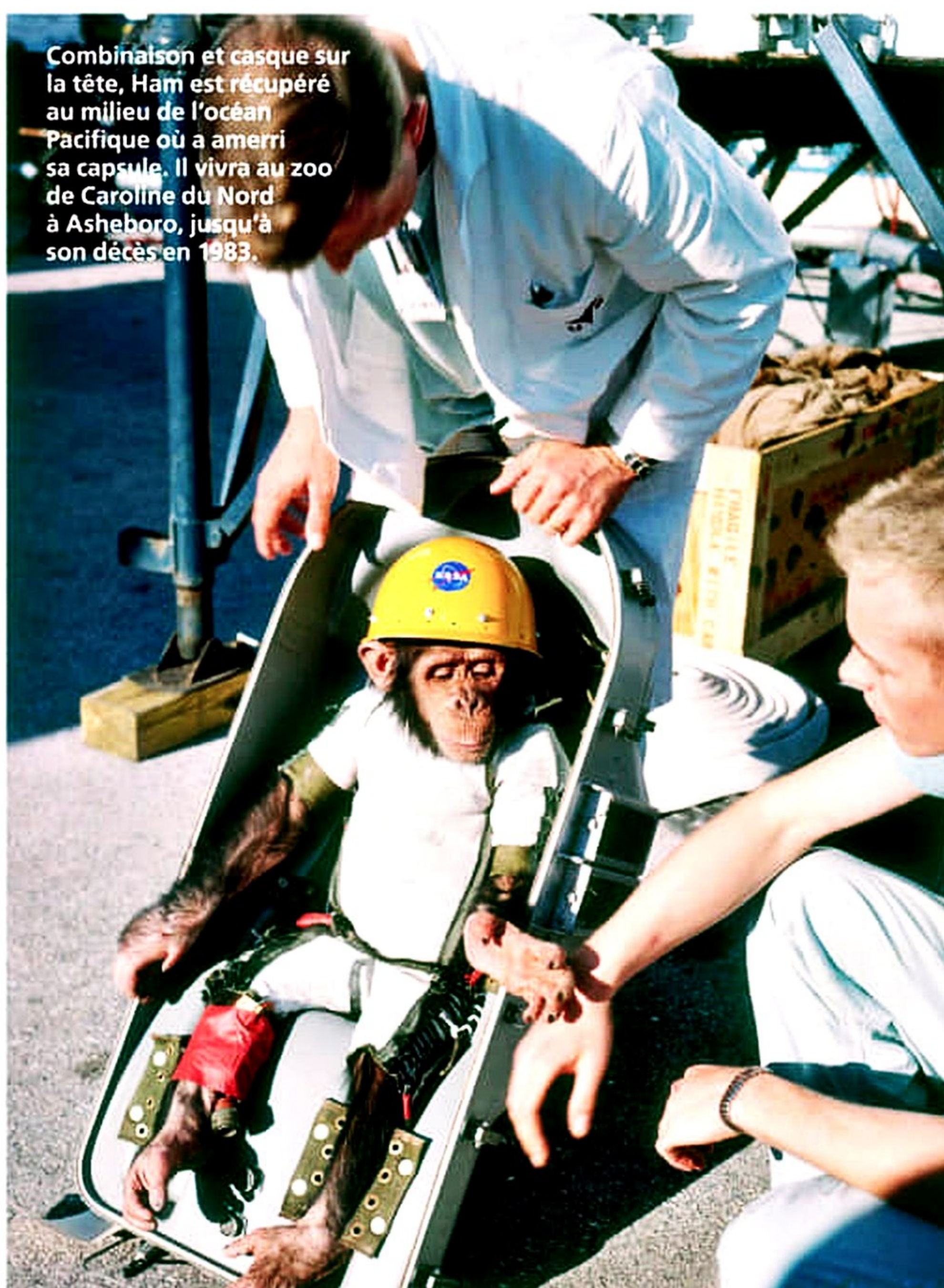


souris, menées par l'université de Tsukuba (Japon), ont montré les effets nocifs de la microgravité sur le foie. Les facteurs de stress environnementaux, tels que les fortes radiations et la microgravité, induisent un état de stress oxydatif. Ainsi, les souris revenant de l'espace présentaient des niveaux bas de composés soufrés qui permettent de limiter les dommages causés par les radicaux libres. Des résultats qui vont permettre d'optimiser l'alimentation des astronautes.

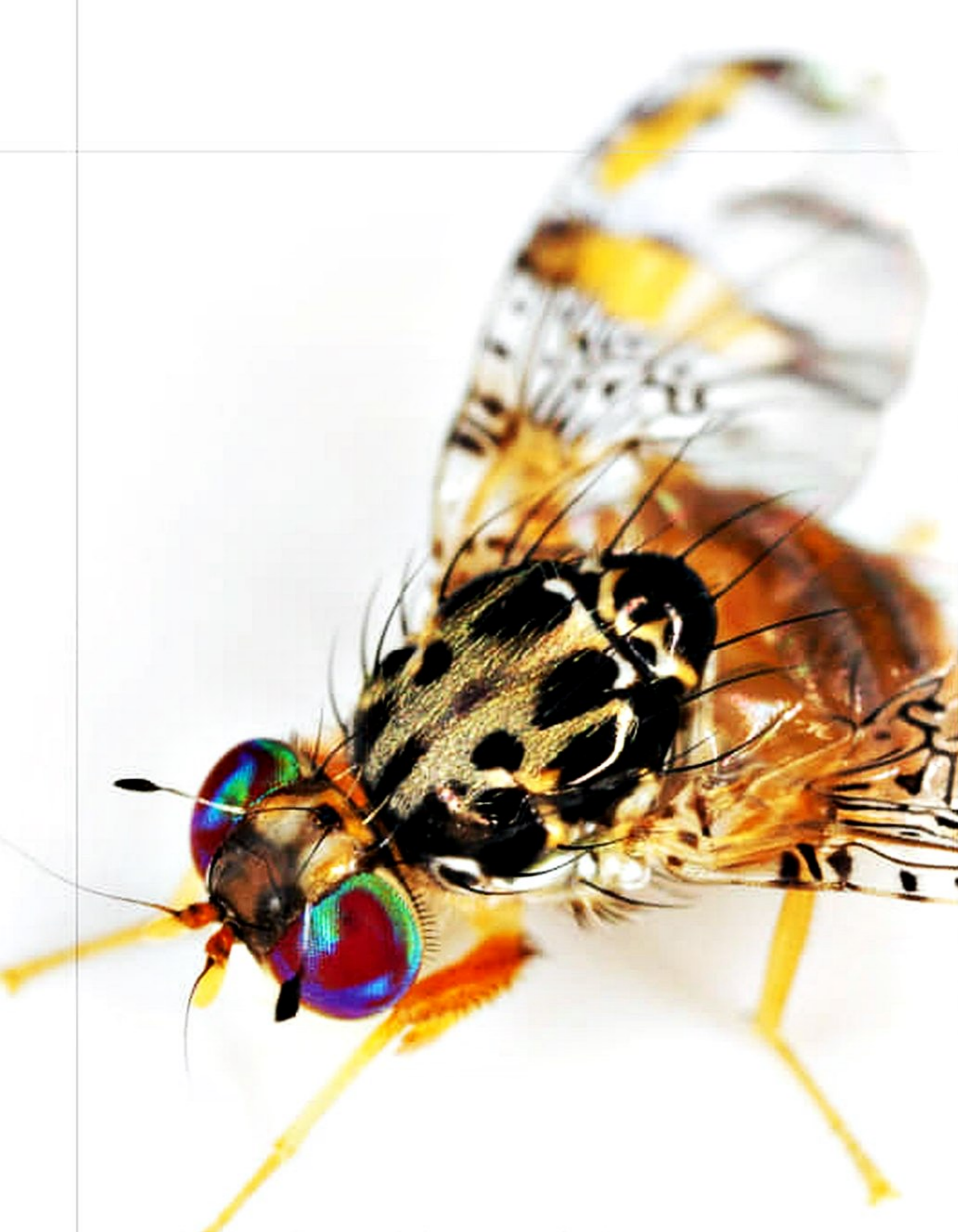
Primates, le lourd tribut

Est-ce que la poussée et la force gravitationnelle peuvent causer des dommages ? Pour répondre à cette question, les Américains ont fait le choix d'envoyer des primates dans l'espace. Il faut attendre 1959 – et plusieurs tentatives s'étant soldées par le décès des singes, dont Albert I et Albert II, en 1948 et 1949 –, pour que le macaque rhésus Miss Able et le saïmiri Miss Baker reviennent sur Terre indemnes de la mission Jupiter AM-18 qui les a amenés à 480 km d'altitude.

Deux ans plus tard, le 31 janvier 1961, la mission américaine Mercury-Redstone 2 envoie dans l'espace un chimpanzé, entraîné à faire des tâches spécifiques qu'il devait reproduire au cours de son vol de 6 minutes. La réussite de l'opération prouve que les capacités cognitives ne sont pas altérées dans l'espace. À son retour, le chimpanzé sera nommé Ham, du nom du laboratoire qui l'avait préparé : Holloman aerospace medical center. Grâce à Ham, Alan Shepard devient le premier Américain à aller dans l'espace, quatre mois plus tard, le 5 mai 1961. Mais Youri Gagarine l'a devancé de trois semaines.



Combinaison et casque sur la tête, Ham est récupéré au milieu de l'océan Pacifique où a amerri sa capsule. Il vivra au zoo de Caroline du Nord à Asheboro, jusqu'à son décès en 1983.



Mouches, les éclaireuses

Depuis le début du xx^e siècle, la mouche des fruits est l'un des animaux privilégiés dans la recherche génétique car elle ne possède que quatre paires de chromosomes. Une simplicité qui lui a valu d'être le premier animal à côtoyer les étoiles. Le 20 février 1947, une fusée V-2 décolle depuis le Nouveau-Mexique avec à son bord un équipage de drosophiles. Le but est d'étudier les effets mutagènes des radiations à haute altitude sur l'ADN de la mouche. Après 3 minutes et 10 secondes de vol, elle atteint son altitude maximum, 109 km. La capsule Blossom est alors éjectée et redescend en déployant son parachute. Les mouches sont récupérées vivantes et intactes. La conquête spatiale est lancée.

Une fois le test de survie passé, par la suite, ces petites mouches ont continué à être envoyées dans l'espace en vue d'étudier, cette fois, les effets de la microgravité sur leur organisme. En 2006, la mission FFL-01 a montré que les mouches élevées dans l'espace avaient un système immunitaire affecté par les vols spatiaux. Plus tard, en 2014, un nouvel équipage d'une centaine de *Drosophila melanogaster* a voyagé jusque dans la Station spatiale internationale pour comprendre les effets des voyages spatiaux sur la circulation sanguine et la santé cardiaque.



Méduses, les équilibristes

S'orienter, reconnaître le haut du bas, éviter les vertiges... font partie des difficultés des astronautes. Pour savoir ce qui se joue dans l'oreille interne, en 1991, la Nasa a fait décoller, à bord de la fusée Columbia, 2 478 polypes de méduses *Aurelia aurita* afin d'étudier le développement de leurs récepteurs de gravité, en situation de microgravité. Ces récepteurs possèdent des statocystes semblables aux cristaux de carbonate de calcium présents dans l'oreille interne des humains, les otolithes, et qui permettent de maintenir l'équilibre. Ainsi, chaque mouvement des méduses induit un déplacement des cristaux. L'expérience, menée dans le cadre de la mission Space Lab Science, a montré que les statocystes développés dans l'espace par les éphyres – larves de méduses – étaient en nombre normal. Les petites méduses spatiales arrivaient à nager et même à se reproduire.

Autre enseignement : au retour sur Terre, les méduses élevées dans l'espace ont été incapables d'adapter leurs capteurs de gravité, entraînant des effets de désorientation. Les statocystes se développent donc en fonction de la gravité et ne peuvent se réadapter ensuite. Les chercheurs se demandent donc dans quelle mesure un humain né dans l'espace serait capable de vivre et de s'orienter sur une planète à la gravité différente.



Tardigrades, les invincibles

En latin, leur nom se traduit par "marcheur lent", mais ils auraient tout aussi bien pu s'appeler "indestructibles" tellement les capacités d'adaptation, de résistance et de résilience sont importantes chez ces animaux de moins de 1 millimètre, du clade des panarthropodes. C'est ce qu'a permis de démontrer le programme Tardis – pour *Tardigrades in space* –, mené par une équipe de chercheurs de l'université de Kristianstad, en Suède, en collaboration avec l'Agence spatiale européenne. En 2007, quatre espèces de tardigrades ont survécu à douze jours dans le vide spatial qui impose le manque d'oxygène, une déshydratation extrême et un rayonnement cosmique solaire 1 000 fois supérieur à celui de la Terre. Ils ont également montré leur capacité à se rétablir, et cela grâce à la cryptobiose, une suspension des processus métaboliques s'apparentant à la mort, mais réversible dès que les conditions de vie le permettent. Cette reviviscence peut intervenir des dizaines d'années après. Et cela est possible grâce à la protéine Dsup (*damage suppressor*), mise en évidence en 2016 par une équipe de chercheurs japonais, qui leur permet de régénérer les cellules d'ADN endommagées.

DÉCOUVRIR



64 Prêts à tout pour internet?

70 Gaz à effet de serre : la traque depuis l'espace

76 Dans la mallette de Thomas Pesquet

82 Une journée dans l'ISS

84 La ruée vers les astéroïdes





Satellites abandonnés ou cassés, outils perdus par les astronautes ou rochers spatiaux capturés par l'orbite terrestre font partie des plus de 330 millions de débris qui gravitent autour de la Terre, selon l'estimation de l'Esa.

Prêts à tout pour internet ?

Les constellations de satellites destinées à délivrer l'internet haut débit partout sur la planète reposent avec force la question de l'obstruction de l'orbite terrestre. PAR HUGO LEROUX

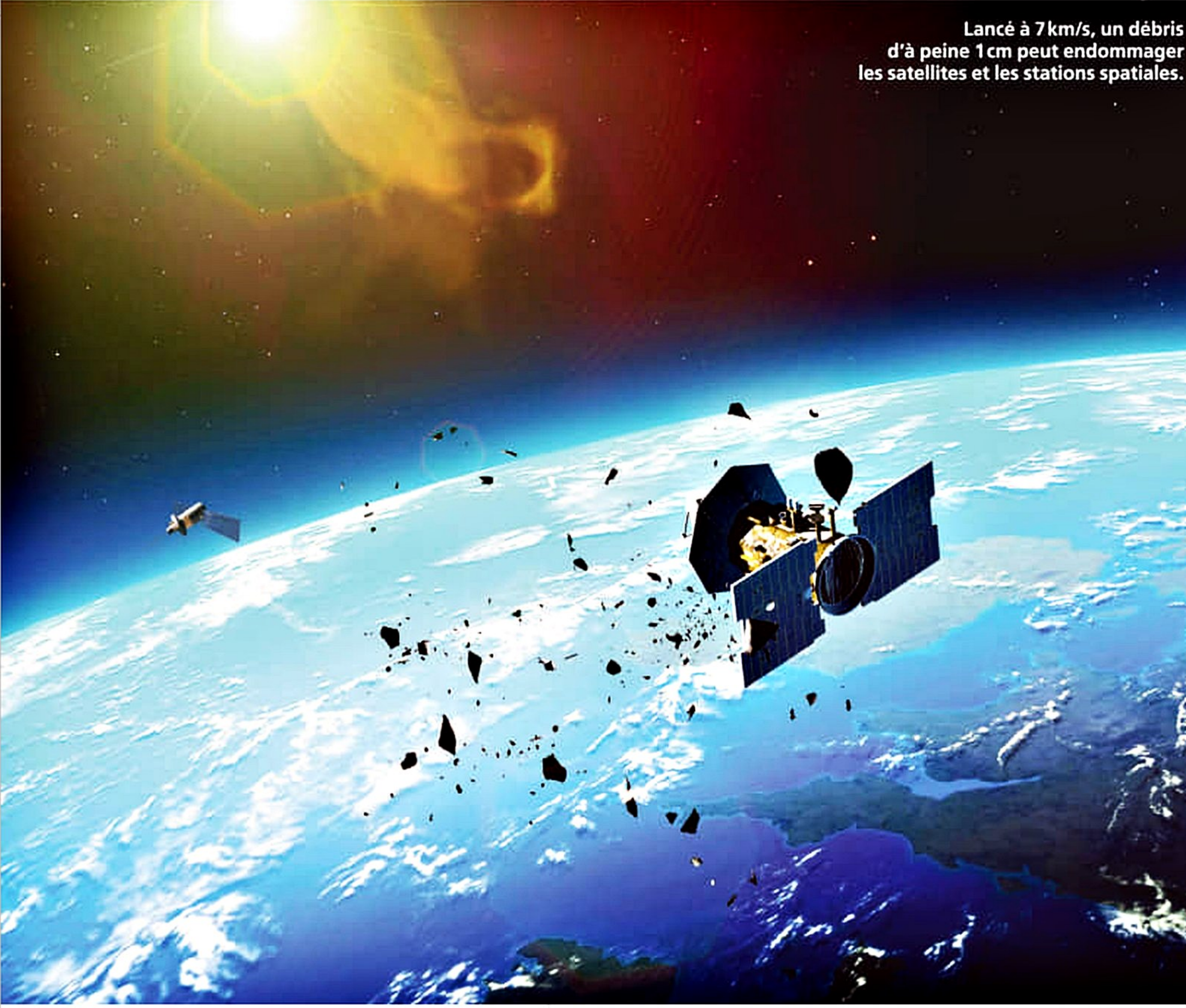
Entre 1957 – date de lancement du premier satellite, Spoutnik 1 – et le début des années 2010, de 50 à 100 satellites ont été lancés chaque année. Mais, depuis deux ans, c'est l'explosion : 1 300 en 2020 et plus de 1 500 en 2021 ! En cause, l'avènement des constellations de petits satellites en orbite terrestre basse, dont le but est de délivrer l'internet haut débit aux zones les plus reculées de la planète. L'avantage de ces nouvelles constellations ? Elles offrent une réduction de la latence de communication. *“Le signal est bien plus rapide à envoyer vers l'orbite basse – entre 400 km et 2 000 km d'altitude – que vers les 36 000 km de l'orbite géostationnaire où gravitent les satellites de communication existants. En contrepartie, il faut un très grand nombre de satellites pour couvrir l'ensemble du territoire”*, explique Caroline Laurent, directrice des systèmes orbitaux au Cnes. Deux constellations sont déjà entrées dans la course depuis 2019 : le projet anglo-indien OneWeb, qui a lancé 360 satellites et en prévoit le double à terme ; et surtout Starlink, le projet d'Elon Musk, avec près de 1 900 satellites et qui vise un total proche des 30 000 !

Ces projets pharaoniques pourraient amplifier un problème déjà préoccupant, celui des débris spatiaux qui encombrant l'orbite terrestre. En décembre 2021, l'Esa dénombrait autour de la Terre quelque 36 500 débris de plus de 10 cm,

1 million d'objets de plus de 1 cm et... 330 millions d'objets de plus de 1 mm. *“Les déchets entre 1 cm et 10 cm sont particulièrement préoccupants car on ne sait pas les observer directement. Lancés à 7 km/s, ils transportent pourtant assez d'énergie pour détruire des satellites”*, souligne Pierre Omaly, experts débris spatiaux au Cnes. Tous ces débris proviennent des 6 130 objets (satellites, étages de fusées...) déjà mis en orbite par l'humanité depuis 1957, dont une bonne moitié est aujourd'hui à l'abandon. Certains de ces objets ont explosé – à cause, par exemple, du carburant restant dans leurs réservoirs – ou ont été volontairement détruits. À ce titre, la démonstration de tir antisatellite chinois en 2007 a généré à elle seule près de 3 400 débris, dont 2 800 encore observables. Enfin, d'autres objets ont fini par se télescoper, à l'image du satellite américain Iridium 33 percuté par l'épave du satellite soviétique Kosmos 2251 en 2009.

DES RISQUES DE COLLISION ACCRUS

Avec la densification du trafic en orbite basse, les spécialistes craignent à présent une multiplication des collisions. Selon Hugh Lewis, directeur de l'Astronautics Research Group de l'université de Southampton, les satellites de Starlink sont déjà responsables de la moitié des croisements de moins de 1 km entre deux satellites. En 2021, la Chine a notamment signalé au Bureau des affaires



Lancé à 7 km/s, un débris d'à peine 1 cm peut endommager les satellites et les stations spatiales.

spatiales des Nations unies deux risques de collision entre des satellites de Starlink et sa station orbitale.

S'il convient de rappeler que seulement trois collisions ont réellement eu lieu à ce jour dans l'histoire spatiale, le scénario catastrophe que tout le monde craint est celui d'une multiplication des débris selon une courbe exponentielle, aussi appelée syndrome de Kessler. *"Jusqu'à récemment, on constatait une augmentation linéaire du nombre de débris, mais, depuis deux ou trois ans, la droite semble s'infléchir vers le haut"*, reconnaît Pierre Omaly. Un emballement extrême susceptible de rendre quasi impossible l'exploration spatiale, et même l'utilisation de satellites pour des générations. Pour l'instant, ceux de Starlink en orbite très basse, à 400 km, ne sont pas les plus préoccupants : *"Les débris à cette altitude retombent vite, en moins de vingt-cinq ans. À 1 000 km, cela prend en revanche plusieurs centaines d'années"*, rappelle l'expert. Starlink compte cependant

des projets de lancement jusqu'à 615 km, tandis que OneWeb se place à 1 200 km.

Face à cette menace, les solutions tardent à se concrétiser. *"Les États peinent à s'accorder sur un cadre international contraignant, tant l'espace est devenu un enjeu stratégique pour chacun"*, déplore Pierre Omaly. L'organisme onusien Copuos

“ Les États peinent à s'accorder sur un cadre international contraignant, tant l'espace est devenu un enjeu stratégique ”

(Committee on the Peaceful Uses of Outer Space) a certes défini en 2008 un corpus de recommandations visant à s'assurer que les nouveaux projets ne contribuent pas à générer davantage de débris. Par exemple en faisant en sorte que l'appareil puisse être vidé de ses carburants explosifs au terme de sa mission, ou qu'il puisse être rapatrié dans l'atmosphère terrestre pour s'y consumer... Très peu de pays ont traduit ces recommandations dans leurs juridictions nationales. La France a été le premier à le faire en 2008. *"Mais les États-Unis, la Chine et la Russie, qui totalisent à eux trois 90 % des lancements de satellite, continuent de s'appuyer sur des systèmes d'encadrement plus souples... dont la mise en œuvre reste parfois opaque"*, note Pierre Omaly. Des initiatives internationales ou privées visent également à établir un "code de la route" spatial et à normaliser les manœuvres d'évitement en orbite, mais n'ont pas non plus abouti à ce jour à un cadre contraignant.

UN DOMAINE STRATÉGIQUE

Pour ne rien arranger, de nombreux autres projets de constellations sont encore dans les cartons, comme le Kuiper de la société Amazon (3 200 satellites entre 590 km et 630 km d'altitude), un grand projet chinois (13 000 satellites évoluant entre 500 km et 1 145 km), mais aussi des projets plus modestes, comme ceux de Boeing (140 satellites) ou de Telesat Canada (300), ce qui pourrait porter le nombre de satellites en orbite basse à quelque 45 000 à l'horizon 2030. La commission européenne étudie sa propre constellation afin de ne pas perdre la souveraineté sur le futur domaine stratégique de l'internet satellitaire. C'est dans cette optique que Greg Wyler, fondateur de OneWeb, a récemment proposé à la France de bâtir cette constellation à partir de 350 000 nanosatellites (*voir article suivant*) ne dépassant par 30 kg chacun. Pour l'heure, ce n'est qu'un effet d'annonce : *"Il reste à prouver que des satellites si petits peuvent assurer des fonctions télécoms aussi avancées"*, estime Caroline Laurent. Quoi qu'il en soit, les prochaines ruptures technologiques en matière de satellites devront intégrer la problématique des débris spatiaux dès leur conception. *"Lancer autant de nanosatellites serait dangereux car ils ne sont pour l'instant ni assez fiables ni assez contrôlables en termes de propulsion"*, analyse de son côté Pierre Omaly. Sous peine de compromettre l'accès de l'humanité à l'espace... pour longtemps. ■

Le CubeSat est soumis à un cahier des charges strict définissant ses dimensions, sa masse et certaines contraintes, comme celle de ne libérer aucun composant dans l'espace.



© KIM SHIFLETT/ NASA

Des satellites "de poche"

La miniaturisation génère de nouvelles applications, dont certaines n'ont pas encore été imaginées. PAR HUGO LEROUX

Son nom est Angels. Il a la taille d'une boîte à chaussures, pèse 26 kg et a été mis en orbite terrestre basse, à 500 km d'altitude, en décembre 2019. Ce nanosatellite, le premier CubeSat commercial made in France, est une tête de série. Il permettra la démonstration en vol d'une miniconstellation de 25 nanosatellites baptisée Kinéis. Sa mission : repérer des objets connectés à travers le service d'observation et de surveillance de la Terre Argos, développé par CLS, une filiale du Cnes. *"Jusqu'ici, nous devons embarquer les balises Argos dans de gros satellites. Angels prouve que nous pouvons désormais le faire dans de tout petits satellites dédiés"*, se félicite Caroline Laurent, directrice des systèmes orbitaux au Cnes.

Angels incarne la révolution des nanosatellites, une catégorie bien à part : *"Ce sont des satellites*

aux dimensions standardisées, composés de cubes de 10 cm d'arête et fabriqués à partir de composants sur étagère – autrement dit, en série – là où les satellites habituels, beaucoup plus imposants, sont fabriqués selon une logique de sur-mesure”, détaille David Mimoun, professeur en systèmes spatiaux à l'Isae-Supaero. Plusieurs assemblages sont possibles : le CubeSat “de base” 1U, qui pèse 10 kg et mesure 10 x 10 x 10 cm, mais aussi des modèles 2U (2 cubes, soit 20 x 10 x 10 cm), 3U (3 cubes façon “boîte à chaussures”), 6U... et ce jusqu'à 12U. Ces CubeSats sont nés à la fin des années 1990 dans l'imagination de chercheurs de l'université de Stanford (États-Unis) qui désiraient proposer à leurs étudiants un moyen accessible de concevoir leurs propres systèmes spatiaux. Les progrès constants des composants électroniques en termes de miniaturisation et de coût ont permis leur création. “L'autre facteur qui a favorisé leur essor est la diminution drastique des coûts de lancement”, poursuit le chercheur. Certains lanceurs proposent désormais des lancements en grappes. En 2017, l'agence spatiale indienne a établi un record en lançant 104 satellites d'un coup. Le prix du billet vers l'orbite basse de ces satellites “de poche” s'établit ainsi à partir de 150 000 euros, là où celui d'un satellite géostationnaire classique se chiffre en dizaines de millions d'euros. Résultat : plus de 2 500 CubeSats devraient être lancés dans les six prochaines années, alors que, selon la base de données Nanosats.eu, “seuls” 3 400 l'ont été depuis 1998. “Aujourd'hui, beaucoup d'universités et de PME ont déjà lancé ou envisagent de lancer leurs propres nanosatellites”, se félicite David Mimoun.

SURVEILLER LES FLOTTES DE BATEAUX

Bien entendu, les nanosatellites n'offrent pas les mêmes possibilités que les gros satellites géostationnaires, ou même que les minisatellites de 100 kg à 150 kg constituant les constellations de l'internet haut débit comme Starlink. Cette limitation est liée à la charge utile, qui représente un tiers du satellite et qui lui confère sa fonction, via des instruments embarqués (antennes de communication, capteurs d'observation...). “Avec 3 kg, vous ne pouvez pas embarquer les mêmes instruments que des satellites de plusieurs tonnes. Par ailleurs, il y a aussi des contraintes physiques qui font qu'on ne peut pas tout miniaturiser. Pour assurer certaines missions de télécommunications, par exemple, il faut une certaine taille d'antenne et

Le nanosatellite français Angels, mis en orbite en 2019, vise le développement de l'internet des objets, soit l'interconnexion des objets connectés, ou la surveillance maritime via la couverture des balises Argos.



une certaine puissance électrique pour assurer les transmissions”, pointe David Mimoun.

Les CubeSats sont néanmoins bien positionnés pour envoyer des informations simples, requérant peu de données et peu d'énergie, comme celles utilisées par l'internet des objets (IoT). Kinéis envisage ainsi de suivre des objets connectés partout dans le monde. Parmi les applications pressenties : la localisation de conteneurs de marchandises, de randonneurs dans des zones non couvertes par les réseaux terrestres, ou encore de balises posées sur des animaux sauvages pour la recherche. La start-up rennaise Unseenlabs a, quant à elle, déjà lancé

“ Décomposer les fonctions jusqu'ici assumées par de très gros satellites sur un ensemble de nanosatellites ”



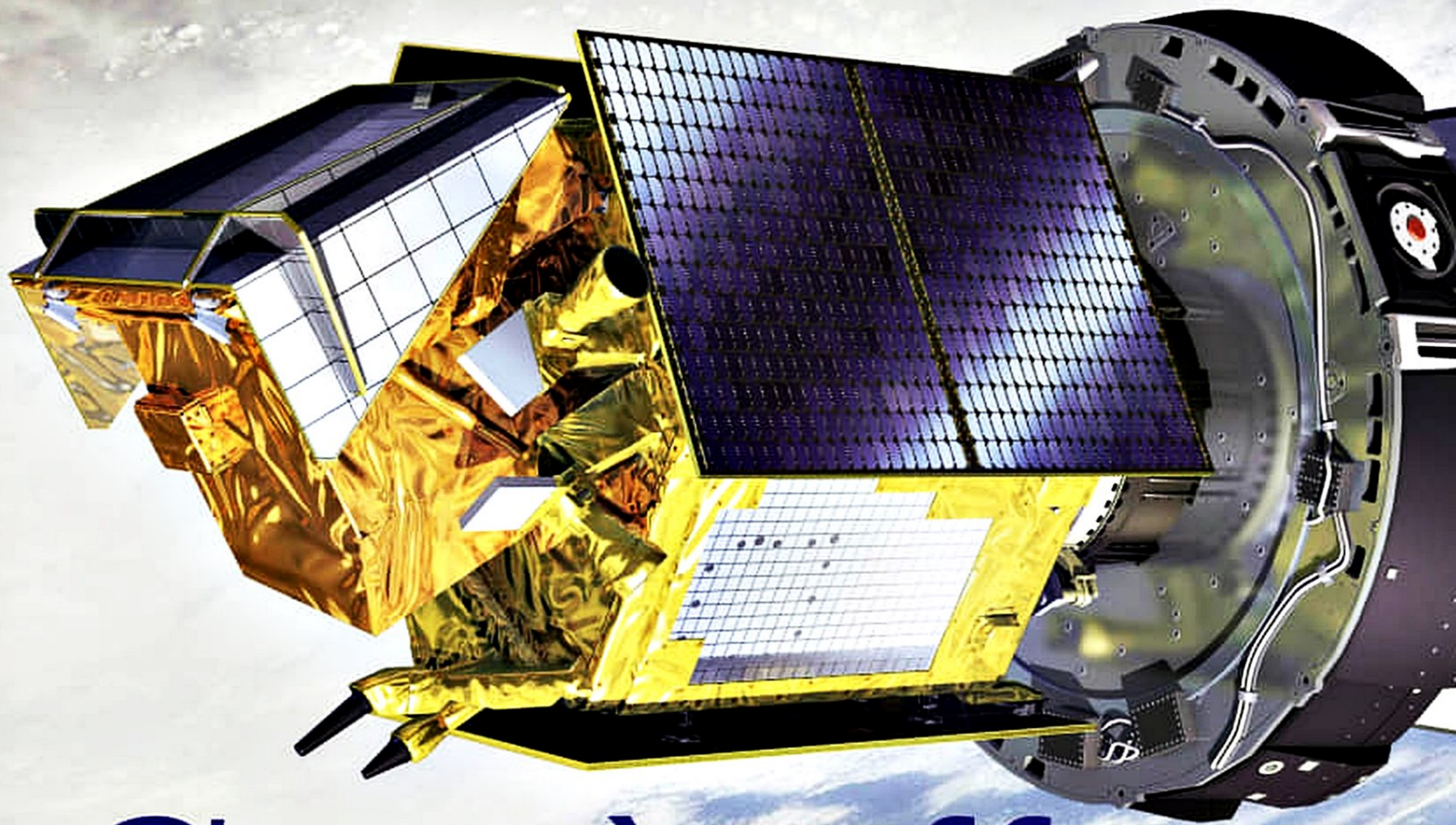
4 nanosatellites depuis 2019, et en envisage 25 de plus à l'horizon 2025, dans un but bien précis : surveiller les flottes de bateaux et prévenir des tentatives de piratage ou de pêche illégale.

Côté universités, *"l'intérêt est avant tout éducatif, pour permettre à un nombre plus large d'étudiants d'aborder le spatial, mais aussi de constituer des preuves de concept en vue de futures missions scientifiques plus ambitieuses"*, résume David Mimoun. Ce dernier a par exemple initié et conçu, avec ses collègues et les élèves de Supaero, un nanosatellite baptisé EntrySat et destiné à observer la manière dont les débris spatiaux pénètrent dans l'atmosphère. Des applications environnementales sont aussi envisageables : *"On peut dédier les nanosatellites à des missions réduites et plus précises d'observation de la Terre. Par exemple, relever des niveaux hydrologiques des rivières et points d'eau à des endroits précis est désormais possible avec la miniaturisation des altimètres et, avec une constellation, cela pourrait être fait à l'échelle de la planète"*, illustre Caroline Laurent.

Ces applications sont encore pour la plupart à peine émergentes. Mais elles pourraient s'élargir à la faveur de progrès technologiques à venir sur

les nanosatellites. La start-up tricolore ThrustMe, issue du laboratoire de l'École polytechnique, a par exemple récemment présenté un moteur ionique très compact destiné aux nanosatellites, qui demeurent pour l'instant le plus souvent dépourvus de toute propulsion, faute de place. Testé pour la première fois en 2020 sur un nanosatellite chinois, ce moteur lui a permis de modifier sa trajectoire et de changer d'orbite.

"Un autre espoir à terme serait de pouvoir décomposer les fonctions jusqu'ici assumées par de très gros satellites sur un ensemble de nanosatellites. Pour l'observation de la Terre, on pourrait par exemple confier l'étude d'une bande de fréquence très étroite et précise à chaque nanosatellite plutôt que de se reposer sur un gros outil multibande", imagine Caroline Laurent. Encore plus futuriste : l'entrepreneur spatial Greg Wyler, fondateur de la constellation de satellites OneWeb, imagine une giga-constellation de quelque 350 000 nanosatellites pour amener l'internet haut débit et ainsi concurrencer des méga-constellations comme Starlink (voir article précédent). Et si les nanosatellites incarnaient le prochain changement de paradigme du spatial ? ■



Gaz à effet de serre La traque depuis l'espace

Les satellites permettent désormais d'observer nos émissions. De nouvelles vigies du climat précieuses pour comparer contributions réelles et déclarations officielles. PAR HUGO LEROUX



Sur la photographie, un énorme panache de méthane, représenté par des pixels jaunes, semble dériver d'un point précis. La source : une exploitation de gaz en Irak. La cause ? De mauvaises pratiques ou un défaut d'entretien des infrastructures. Après analyse des images satellites, la société parisienne Kayrros a été en mesure d'identifier l'émission anormale de ce gaz à effet de serre dans l'atmosphère. *“Grâce à cette surveillance d'un genre nouveau, nous proposons aux sociétés gazières et pétrolières d'agir pour limiter leurs fuites”*, se félicite Antoine Halff, son fondateur et analyste en chef.

Cet exemple illustre un nouvel outil puissant au service de la lutte contre le changement climatique : la traque des émissions de méthane par satellite. Pourquoi le méthane en particulier ? Car la molécule CH_4 affiche un potentiel de réchauffement global 25 fois supérieur à celui du CO_2 , même si sa durée de vie dans l'atmosphère est relativement courte, de l'ordre de 10 ans. Selon le dernier rapport du Giec, la part du méthane dans les $1,1^\circ\text{C}$ de réchauffement qu'a connu la planète depuis la fin du xix^{e} siècle se monterait ainsi à $0,5^\circ\text{C}$. Ce qui en fait une excellente cible à court terme : *“En visant les émissions de méthane, on pourrait avoir un impact immédiat”*,

pointe Frédéric Chevallier, ingénieur-chercheur au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE).

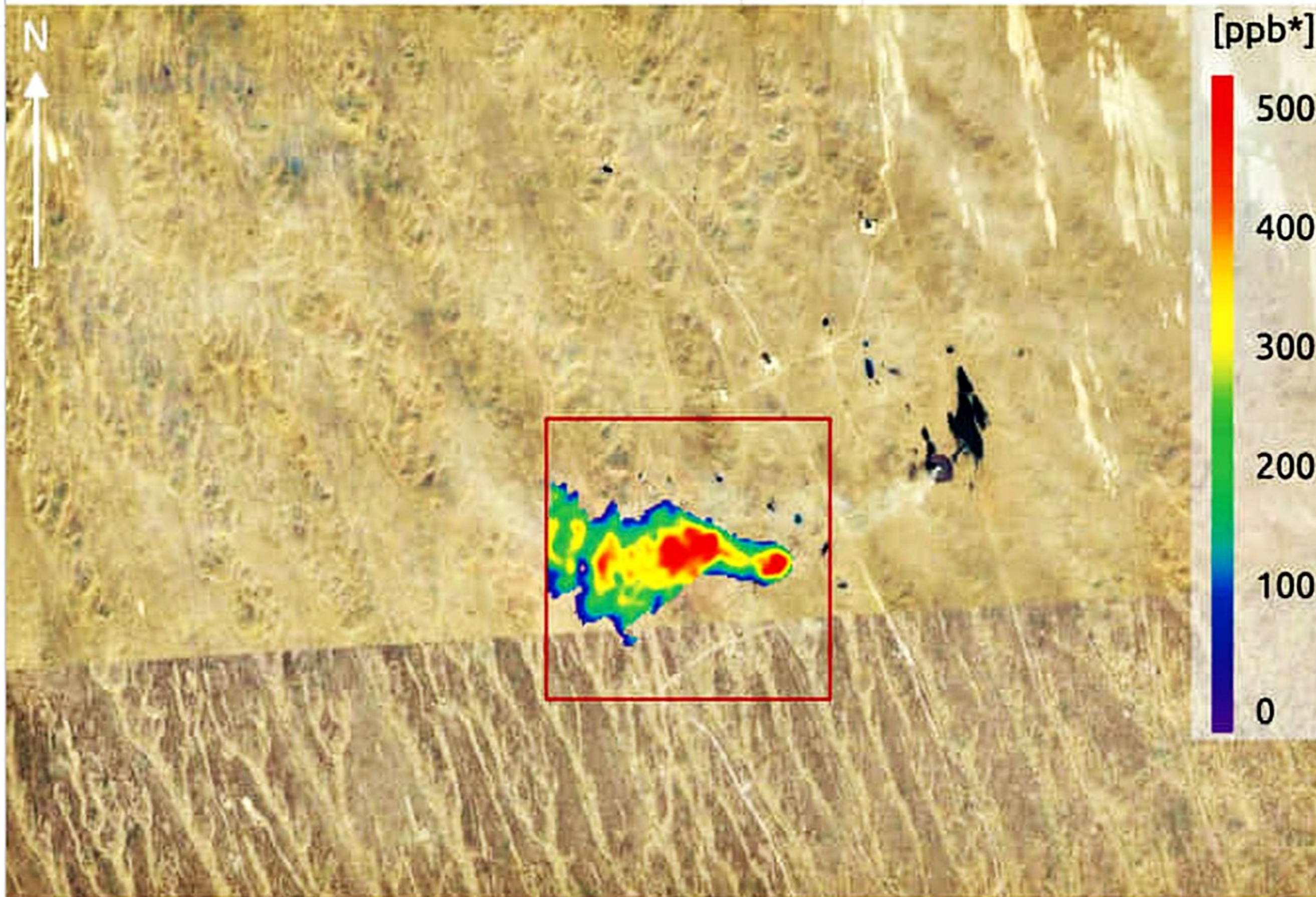
Ce *monitoring* spatial est permis par le satellite Sentinel-5p lancé par l'Esa en 2017 dans le cadre du programme d'observation de la Terre, Copernicus. Il s'appuie plus particulièrement sur son instrument baptisé Tropomi (*Tropospheric Monitoring Instrument*), un spectromètre qui fonctionne en analysant la lumière du Soleil réfléchi par les surfaces terrestres. *“Le spectromètre mesure les bandes de fréquence sur lesquelles le méthane absorbe les photons, ce qui permet de calculer la concentration du gaz dans l'atmosphère”*, résume Vincent-Henri Peuch, responsable du Copernicus Atmosphere Monitoring Service au Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF).

ALGORITHMES ET DEEP LEARNING

L'analyse des images, qui sont publiées gratuitement par l'Esa, permet de détecter des concentrations ponctuelles et anormalement élevées qui correspondent à des émissions accidentelles ou des fuites. Mais cette analyse n'est pas triviale étant donné les masses d'images en jeu : Sentinel-5p génère environ 500 gigabits de données – de quoi remplir un disque dur grand public – en une seule journée. Autre problème : la résolution des images issues de Tropomi est relativement grossière : chaque pixel correspond à un carré de Terre d'environ $3,5 \times 5 \text{ km}$... Ce qui ne permet pas toujours de remonter aux sources de méthane de façon très précise. *“Pour en tirer du sens, il faut développer des algorithmes performants”*, conclut Vincent-Henri Peuch.

C'est sur ce créneau que se lancent de nombreuses entreprises et laboratoires de recherche depuis quelques années. À l'image de Kayrros, qui analyse les images de Sentinel-5p grâce à des algorithmes de vision automatique basés sur le *deep learning*, un type d'intelligence artificielle reposant sur le modèle des réseaux de neurones. *“Nous croisons cette information avec celles de bases de données d'activités industrielles au sol et celles des modèles météorologiques de diffusion des gaz dans l'atmosphère. Cette fusion de données nous permet d'identifier la source d'un panache à quelques mètres près”*, explique Clément Giron, *data scientist* au sein de Kayrros.

Autre exemple récent, l'Institut néerlandais de



recherche spatiale SRON a identifié l'origine d'un gigantesque panache de méthane en Espagne, en croisant la vue "macro" de Sentinel-5p avec d'autres images de meilleure résolution issues de satellites de basse altitude envoyés par la société GHGSat, spécialiste de la télédétection des gaz à effet de serre. Il s'agissait d'un centre d'enfouissement de déchets situé près de Madrid, dont le dégazage massif, environ de 5 000 kg par heure, est issu de la décomposition de déchets organiques. S'il était récupéré, il suffirait à alimenter 350 000 foyers en énergie, selon les calculs de GHGSat.

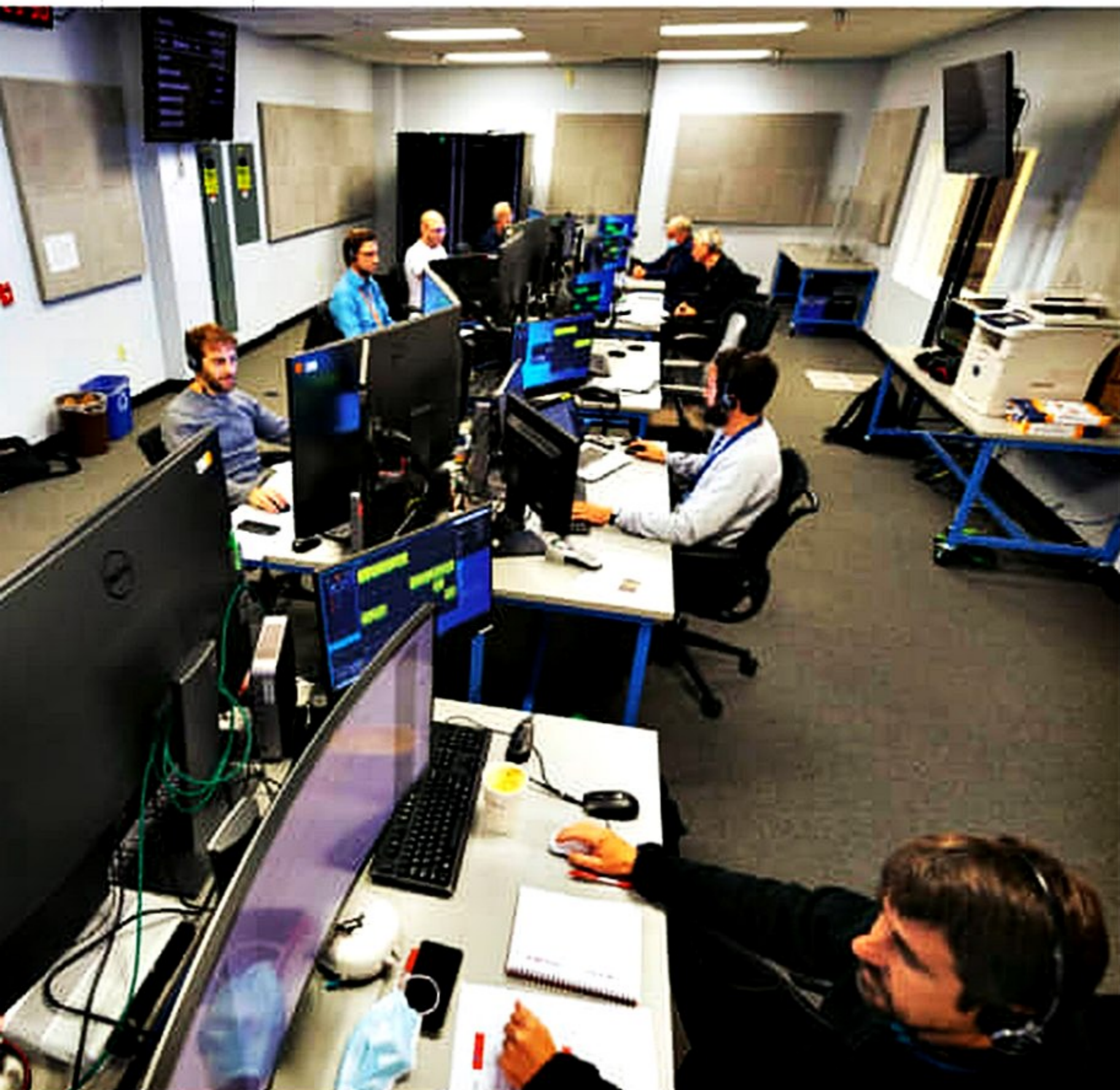
Cette information peut mener à des actions correctives par deux leviers. Le premier consiste à alerter les industriels responsables des émissions. "Ils ont tout intérêt à s'en saisir : d'une part pour valoriser le méthane perdu, qui a un prix économique élevé, et d'autre part pour montrer qu'ils agissent pour le climat", estime Antoine Halff, chez Kayrros. Le second

▲ La sonde Sentinel-5P détecte une émission de méthane en panache, provenant d'infrastructures pétrolières et gazières de la région de la mer Caspienne. > Ces images sont analysées par la société Kayrros pour déterminer l'origine de la fuite.

levier réside au niveau des États : "Ces données leur permettront de comptabiliser les émissions sur une base mesurable, alors que, pour l'instant, elles sont estimées d'après des indicateurs d'activité industrielle et économique", rappelle Vincent-Henri Peuch. Les données satellitaires pourraient ainsi faire office de juge de paix dans les accords internationaux sur le climat, à l'image du *Global Methane Pledge*, l'accord visant à réduire les émissions de méthane de 30 % d'ici à 2030, engagé lors de la COP26 de Glasgow.

À plus long terme, la mesure par satellites pourrait aussi changer la donne pour le suivi du CO₂, qui reste le principal gaz à effet de serre en raison de sa longue durée de vie dans l'atmosphère, 100 ans, 10 fois supérieure à celle du méthane. L'Esa prévoit en effet de mesurer les émissions anthropiques de dioxyde de carbone grâce au satellite Sentinel-7, dont le lancement est prévu pour 2026. Une mission bien plus ambitieuse : "Les émissions de méthane attribuables aux activités humaines sont relativement faciles à détecter car la concentration de base de ce gaz dans l'atmosphère est faible, explique Frédéric Chevallier. Le panache correspondant à une fuite dans une industrie ressortira donc assez clairement sur les images satellite. Pour les émissions de CO₂, c'est beaucoup plus compliqué car la concentration de

“ Ces données permettront aux États de comptabiliser les émissions sur une base mesurable ”



CO₂ dans l'atmosphère est aujourd'hui de l'ordre de 415 particules par millions (ppm), là où une émission importante, due par exemple à une activité industrielle lourde, se chiffrera à environ 1 ppm." Autant chercher une aiguille dans une botte de foin ! "C'est pourquoi le spectromètre monté sur Sentinel-7 devra offrir une sensibilité de 0,7 ppm avec une résolution spatiale de 2 x 2 km", avance Yasjka Meijer, responsable scientifique du programme CO2M à l'Esa. Autre difficulté liée aux émissions anthropiques de CO₂ : elles sont en partie dissimulées par l'activité des puits naturels comme les forêts ou l'océan, qui captent et relâchent sans arrêt ce gaz. "Pour faciliter l'interprétation des données, nous ajouterons à la mesure du CO₂ un instrument dédié à la mesure du dioxyde d'azote (NO₂), un gaz co-émis lors des procédés de combustion à haute température dans de nombreuses activités industrielles. Les panaches de

NO₂ se superposeront parfaitement à ceux de CO₂, ce qui améliorera considérablement nos estimations", prévoit le chercheur.

Comme pour le méthane avec Sentinel-5p, les données de la mission CO2M permettront aux décideurs d'évaluer l'efficacité de leurs politiques et d'assurer la transparence des mesures d'émission de CO₂. Cet outil rentrera dans le cadre de l'Accord de Paris adopté à l'issue de la COP21, qui vise à limiter le réchauffement moyen de la planète entre 1,5°C et 2°C.

Mais attention : ces nouveaux "Big Brother" du climat ne constituent pas pour autant une solution miracle. "Les satellites ne permettent de détecter que les grosses sources d'émissions ponctuelles, alors que la plus grande part des émissions est de nature diffuse, due par exemple à l'élevage, pour le méthane, ou aux activités industrielles et aux transports, pour le CO₂", tempère Frédéric Chevallier. Ils présentent néanmoins l'avantage de révéler des sources jusqu'ici inconnues ou sous-estimées, faciles à attaquer, et avec un bénéfice climatique immédiat. En comparaison, résorber les émissions diffuses reste indispensable, mais bien plus difficile. "Pour le méthane issu de l'agriculture, cela passe par une réduction de notre consommation de viande et donc par un véritable changement de nos modèles de société", poursuit le climatologue.

Autre point d'interrogation : ces mesures n'interviennent-elles pas trop tard, alors que l'urgence climatique est déjà palpable ? "Il est certain que nous ne devons pas attendre pour prendre des mesures ambitieuses de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Mais la mesure par satellite fournira un outil supplémentaire pour objectiver et peut-être accélérer les actions", soutient Vincent-Henri Peuch. "On est en train de développer un véritable service de surveillance mondial du climat, à l'image des services météorologiques. Et l'Europe sera en pointe là-dessus", se félicite Frédéric Chevallier. ■

Zoom sur le CO₂ en ville

Avant 2026 et le lancement du "Big Brother" du climat Sentinel-7, des satellites plus petits vont préparer le terrain de la surveillance des émissions de dioxyde de carbone : l'américain OCO-2, lancé en 2014, et le français MicroCarb, dont le lancement est prévu en 2023. Leur mission de base est plutôt orientée sur les émissions

biogéniques (issues de la biomasse d'origine agricole ou forestière) du CO₂, et pas d'origine humaines. Cependant, MicroCarb comportera un mode "zoom" dédié à l'observation des émissions des villes avec une résolution de 2,5 x 5 km. "OCO-2 a démontré qu'on pouvait mesurer des émissions de CO₂ atmosphériques

depuis l'espace. MicroCarb permettra de faire de premières mesures à une échelle plus resserrée pour fournir une preuve de concept sur les émissions anthropiques. Ses mesures serviront d'étalon à celles de CO2M, qui sera ainsi plus rapidement opérationnel", résume Philippe Landiech, chef de projet de la mission MicroCarb au Cnes.

EN 2022, REVIVEZ LA CONQUÊTE SPATIALE

Russie & États-Unis : 2 destinations mythiques pour comprendre l'histoire spatiale



Jean-Pierre Haigneré



Musée Kalouga

L'ÉPOPÉE SPATIALE À MOSCOU

EN MARS ET OCTOBRE 2022

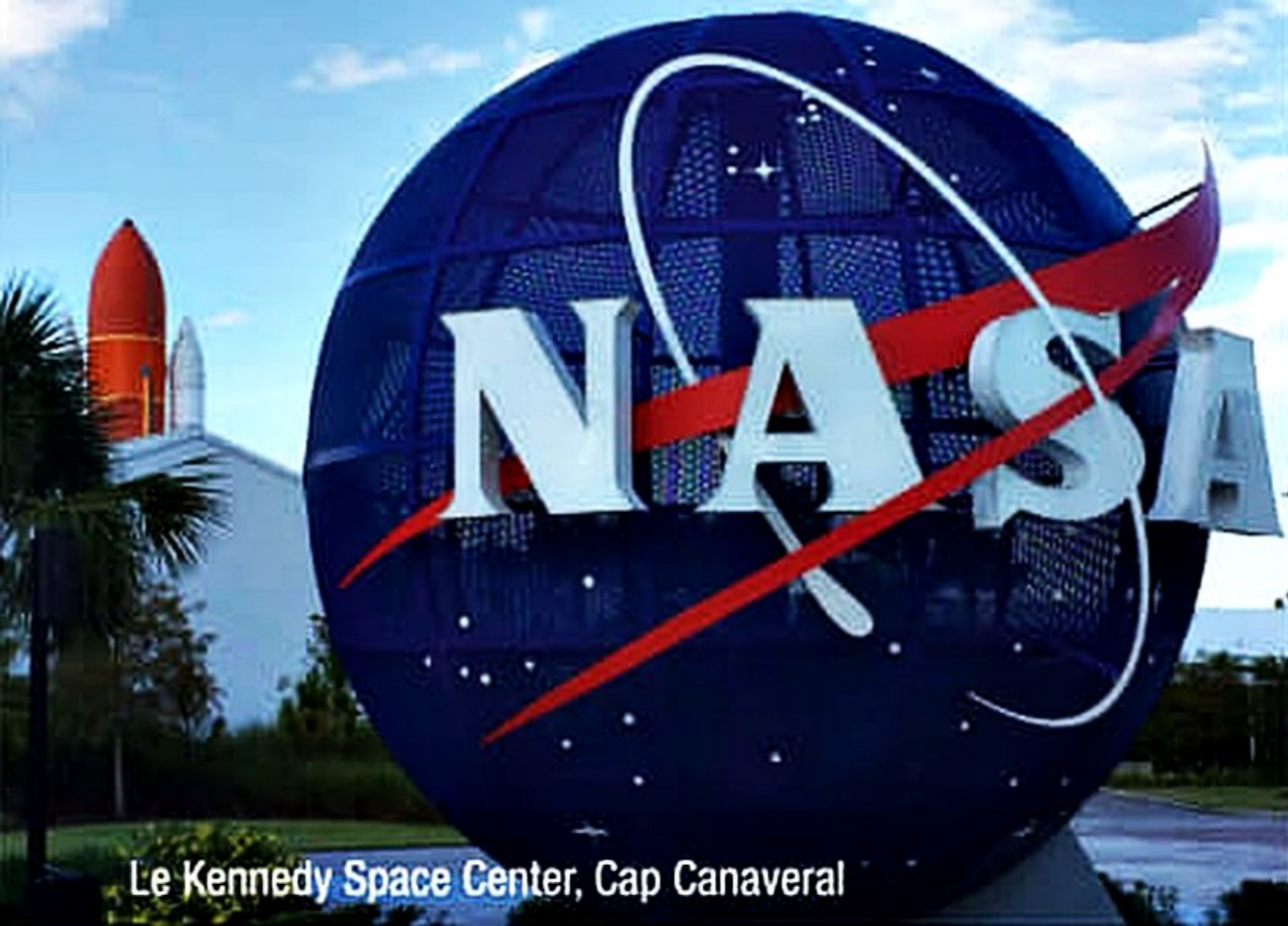
Décollage imminent vers la **Russie** pour un voyage exceptionnel de **7 jours à Moscou** et ses environs en compagnie de **Jean-Pierre Haigneré**. Sur les pas des personnages les plus emblématiques, vous découvrirez **les principaux sites** de la conquête spatiale russe.

LES POINTS FORTS DE VOTRE SÉJOUR :

- 2 départs le 19 mars et 23 octobre 2022.
- Un voyage **complet de 8 jours** à travers les **hauts lieux** qui ont marqué l'épopée spatiale russe sans **manquer les incontournables** de la capitale russe comme la **Place Rouge**.
- Le **privège d'être accompagné** par le grand astronaute français, **Jean-Pierre Haigneré** et d'échanger avec lui à volonté.
- Un **séjour en petit groupe** (20 pers max) à partager entre lecteurs et au **prix fixe de 2 299€ au départ de Paris** (vols depuis et vers Paris, nuitées, repas et visites prévus au programme).

Moscou





Le Kennedy Space Center, Cap Canaveral



Charles Frankel

SUR LES TRACES DE LA NASA

DU 22 AU 29 MAI 2022

Pendant 8 jours, revivez la **conquête spatiale américaine** en visitant les **lieux incontournables** de la NASA comme le Johnson Space Center à Houston ou le Kennedy Space Center à Cap Canaveral. Accompagné en exclusivité par le **passionné planétologue, Charles Frankel**, vous aurez également la **chance de rencontrer un astronaute américain**.

LES POINTS FORTS DE VOTRE SÉJOUR :

- Un voyage passionnant de 8 jours de Houston à Cap Canaveral, à la découverte des sites de la NASA.
- Des moments d'échange et de partage avec votre accompagnateur, le planétologue, Charles Frankel.
- Un séjour conçu et réservé à nos lecteurs (16 places seulement) au prix unique de 4 199 € au départ de Paris (vols depuis et vers Paris, transferts, nuitées, repas et visites prévus au programme).



Centre spatial Lyndon B. Johnson

En partenariat avec
NOMADE
AVENTURE

En cette période particulière, sachez que notre partenaire, **Nomade Aventure** respecte les normes sanitaires les plus strictes et vous offre des conditions de réservation et d'annulation souples afin d'aborder votre projet de voyage en toute sérénité. **Renseignez-vous vite !**

Téléchargez la documentation complète sur notre site

www.voyages-lecteurs.fr/sv

Informations & réservations

OU 01 41 33 57 04 EN PRÉCISANT **SCIENCE&VIE**

Du lundi au vendredi de 9h30 à 18h30

OU demandez GRATUITEMENT et SANS ENGAGEMENT vos brochures en retournant ce coupon à : Science&Vie - Voyages Espace - 59898 Lille Cedex 09

Épopée spatiale à Moscou **SN22ESPD**

Sur les traces de la NASA **SN22USAD**

Nom* : Prénom* :

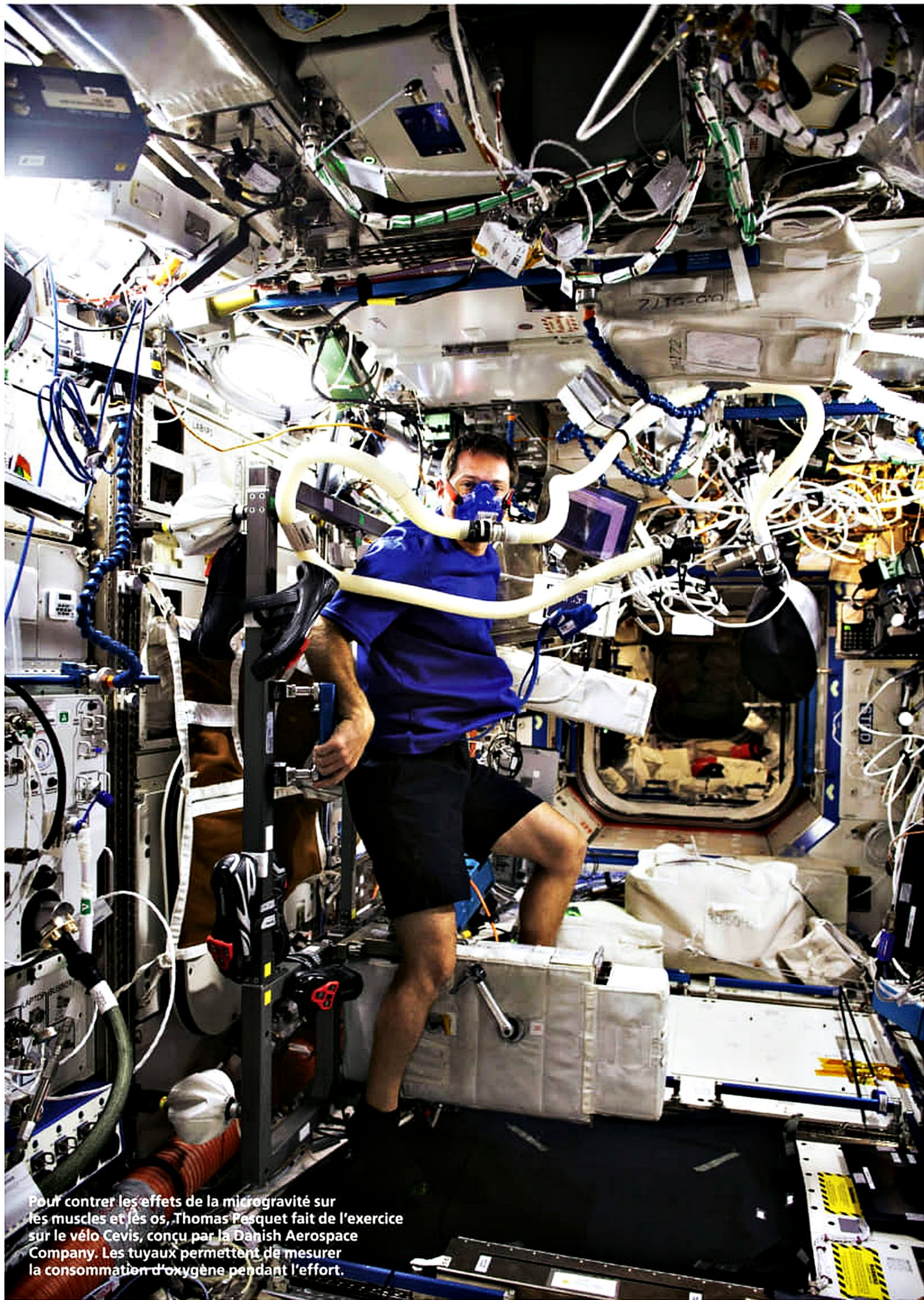
Adresse* :

CP* : Ville* : Tél. :

Pour bénéficier des offres de Science & Vie et de ses partenaires, email

* À renseigner obligatoirement pour traiter votre demande. ** Seul cas de force majeure.
Les informations recueillies à partir de ce formulaire font l'objet d'un traitement informatique fondé sur votre consentement et destiné à Reward Media France SAS en sa qualité de responsable de traitement. Les finalités poursuivies sont l'envoi de la brochure et les offres relatives aux voyages avec nos partenaires si vous y consentez. L'inscription au voyage implique l'acceptation des conditions générales et particulières de vente de Nomade Aventure au dos du bulletin de réservation joint à la brochure. Les données personnelles sont conservées jusqu'à votre demande de suppression. Conformément à la loi Informatique et Libertés n°78-17 modifiée, vous disposez notamment des droits d'accès, rectification, effacement, limitation de vos données. Vous pouvez, pour des motifs légitimes, vous opposer au traitement de vos données. Pour en savoir plus, veuillez consulter notre Politique de confidentialité. Pour exercer vos droits, écrivez à : Reward Media France - CFPI Service juridique, 40 Avenue Aristide Briand 92220 BANGNEULX ou par mail : rdp@rewardmedia.com. Vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CML - www.cml.fr Leskés Photo : Itack, Shutterstock, Fabrice Del Gayle, DR

SCIENCE&VIE



Pour contrer les effets de la microgravité sur les muscles et les os, Thomas Pesquet fait de l'exercice sur le vélo Cevis, conçu par la Danish Aerospace Company. Les tuyaux permettent de mesurer la consommation d'oxygène pendant l'effort.

Dans la mallette de Thomas Pesquet

La Station spatiale internationale (ISS) offre un environnement unique pour mener des expériences scientifiques. L'astronaute français leur a consacré près de 50 % de son temps. PAR MAGALI REBEAUD

Mardi 9 novembre 2021, la capsule Crew Dragon de SpaceX amerrit dans le golfe du Mexique, avec à son bord Thomas Pesquet, le Japonais Akihiko Hoshide et les Américains Shane Kimbrough et Megan McArthur. "À bord de l'ISS, l'une de nos principales missions consiste à préparer le futur de l'exploration spatiale", expliquait Thomas Pesquet à son retour sur Terre après cette seconde mission, baptisée Alpha. "Certaines expériences ont pour but de trouver des solutions afin de contrer les effets négatifs de l'environnement spatial sur l'être humain, particulièrement lors de longs séjours. Les autres activités scientifiques visent à faire avancer la recherche pour des applications terrestres."

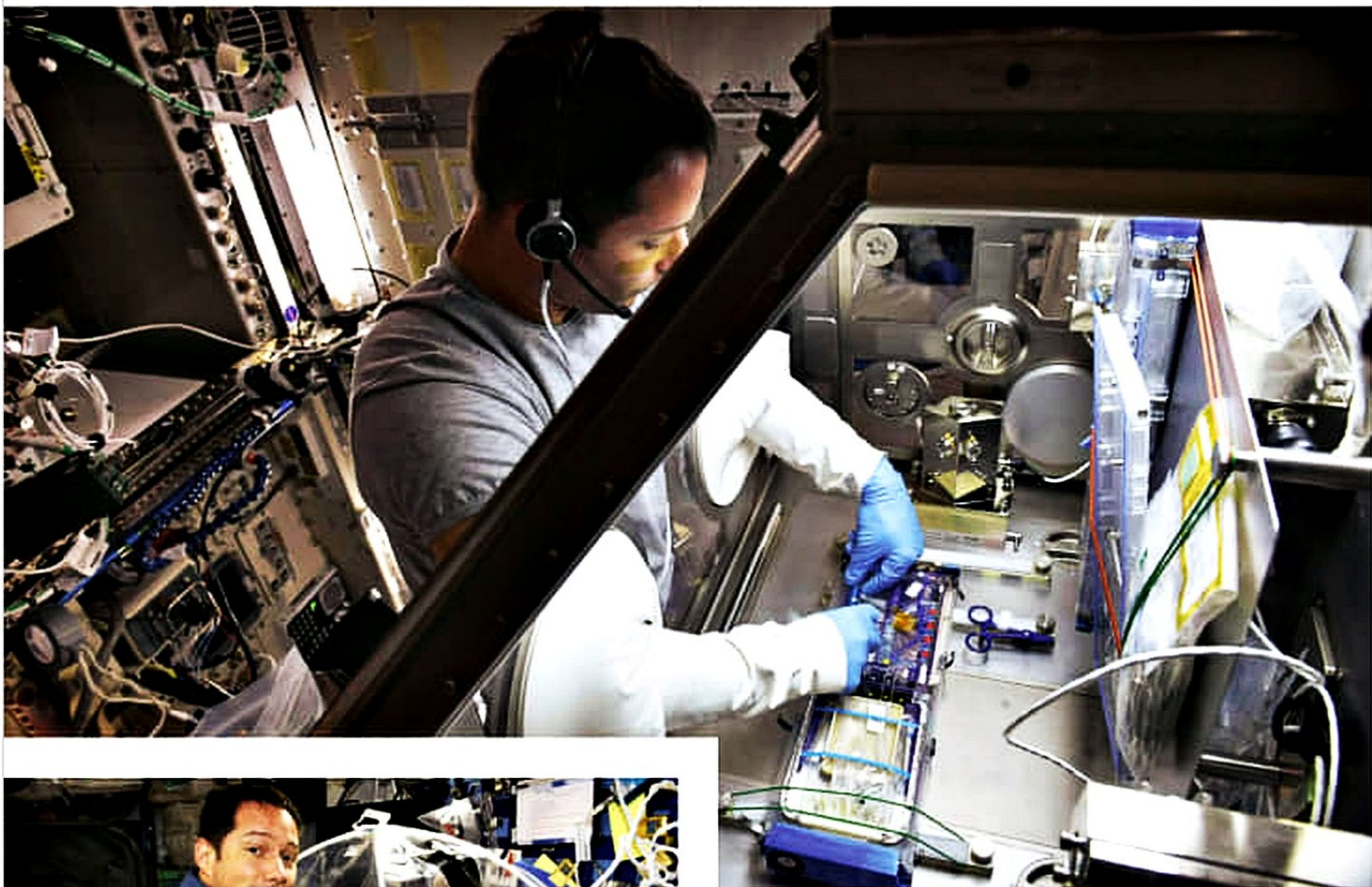
Les laboratoires qui souhaitent voir réaliser des manipulations en impesanteur ont répondu à un appel à propositions lancé par les agences spatiales des pays membres de l'ISS. Les expériences ont été sélectionnées par des experts en sciences de la vie (biologie, physiologie...) et sciences de la matière (astrophysique, physique fondamentale...). D'autres ont été proposées par des lycéens, comme l'étude de la germination et de la croissance des plantes. "Nous sommes ensuite là en tant que support aux activités scientifiques", souligne Thomas Pesquet. Quant à l'expérience portant sur le fameux blob (voir encadré p. 79), elle a été réalisée quasi simultanément dans près de 4 500 établissements scolaires !

DES PHÉNOMÈNES MASQUÉS SUR TERRE

L'impesanteur autorise en effet des expériences impossibles à réaliser sur Terre. "Pour comprendre un phénomène, il faut parfois le regarder sous

différents angles. La gravité, à l'origine de la pesanteur, influence fortement le comportement des matériaux et des fluides à toute échelle, en ayant des effets sur leur mouvement thermique, leur comportement en écoulement et leurs caractéristiques chimiques ou biologiques", expose Sébastien Rouquette, responsable du développement et de la mise en œuvre d'essais scientifiques pour la mission Alpha au Cnes. "La gravité est à l'origine de nombreux phénomènes fondamentaux comme la sédimentation et la flottabilité, la convection dans les liquides et les gaz, ou la pression hydrostatique. Ces effets qui jouent sur Terre un rôle important dans les processus physiques, biologiques et physiologiques sont quasiment inexistantes dans les conditions d'impesanteur de l'ISS." En situation d'impesanteur, on supprime donc un mécanisme qui bride le comportement et cela permet de révéler des phénomènes masqués sur Terre. Prenons l'expérience de Télémaque, sorte de "pince" acoustique testée lors de la mission Alpha. La vocation de cet outil est de capter, déplacer et manipuler des objets ou des liquides sans jamais entrer en contact avec eux. Les ondes ultrasonores qu'il émet exercent une force sur

“ À bord de l'ISS, l'une de nos principales missions consiste à préparer le futur de l'exploration spatiale ”



- ▲ Thomas Pesquet nourrit des tardigrades, dont les gènes sont analysés afin de comprendre la résistance exceptionnelle de ces organismes.
- < L'expérience Oral biofilms étudie des bactéries buccales en impesanteur pour améliorer certains soins dentaires.
- > L'expérience RPCG-2 utilise l'impesanteur pour faire pousser des cristaux de protéines à la structure quasi parfaite.
- > La pince acoustique Télémaque génère des ultrasons capables de diriger une petite bille bleue.

les objets rencontrés : en déplaçant le faisceau, il est ainsi possible de les bouger.

"Pour cette expérience, Thomas devait piéger des petites billes de quelques milligrammes, de compositions et diamètres différents, puis les déplacer le long d'un parcours comprenant des obstacles. Nous en sommes aux balbutiements de cette technologie mais sur Terre, la pesanteur crée une problématique, car le champ gravitationnel est plus fort que la pince acoustique. L'impesanteur nous permet d'étudier plus précisément le phénomène de piégeage", détaille Sébastien Rouquette. L'idée est d'envisager des applications terrestres, comme la manipulation de produits que l'on ne veut pas souiller ou dont on veut se protéger (produits dangereux, échantillons biologiques, virologiques). En médecine, cette pince acoustique pourrait servir à l'expulsion de calculs rénaux ou à la délivrance ciblée de médicaments dans l'organisme. L'expérience se poursuit à bord de l'ISS avec l'astronaute allemand Matthias Maurer.

Une autre expérience visait à étudier la manière

dont des surfaces dites "intelligentes" permettraient de stopper le développement de bactéries. Évaluer l'efficacité de matériaux à créer leur propre biofilm pour former un bouclier protecteur est intéressant pour le développement de surfaces antimicrobiennes, comme pour les boutons d'ascenseur ou les poignées de porte, mais aussi dans le cadre de la conception de futurs véhicules spatiaux.

ANTICIPER LES RADIATIONS

Autre enjeu majeur pour le futur de l'exploration spatiale : la mesure et l'anticipation des radiations. À bord de l'ISS, les astronautes reçoivent, en moyenne, une dose de radiation une centaine de fois supérieure à celle relevée sur Terre. Cette dose augmente de manière significative à l'extérieur de la Station et ne cesse de croître à mesure que l'on s'éloigne de la Terre et de la protection offerte par sa magnétosphère. L'expérience Lumina, développée spécifiquement pour la mission de Thomas Pesquet, visait à valider un dosimètre à fibre optique comme outil de mesure des radiations ionisantes.





La fibre optique présente en effet la particularité de s'obscurcir sous l'effet des radiations. Les premières données reçues au sol sont en cours d'analyse et Lumina est prévue pour fonctionner dans l'ISS pendant encore au moins un an.

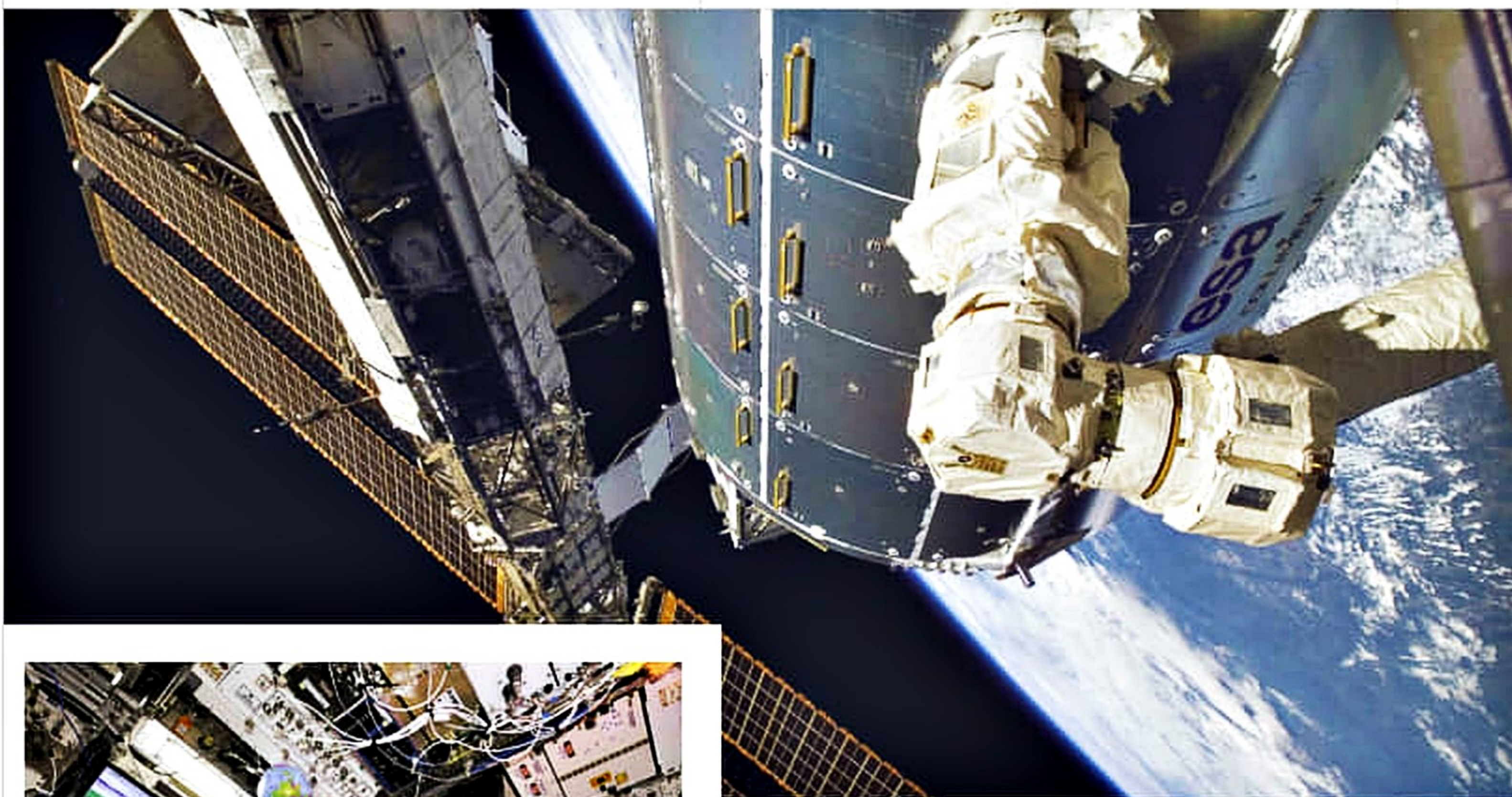
BRISER LA ROUTINE

Au cours de son premier mois en orbite, Thomas Pesquet s'est par ailleurs soumis à l'expérience GRIP, qui étudie le temps qu'il faut au système nerveux pour s'adapter à l'absence de gravité. Au programme, une série d'exercices de manipulation d'objets dans plusieurs configurations : positions différentes, trajectoires de l'objet variées, yeux ouverts ou fermés... Et, même pendant son sommeil, des expériences ont été menées sur l'astronaute ! Durant plusieurs nuits, il était équipé d'un bandeau frontal doté d'un capteur électroencéphalographique. Les résultats serviront notamment à prévoir la mise en



Le blob, un lien Terre-espace

Physarum polycephalum, mieux connu sous le nom de blob, est un organisme unicellulaire qui n'est ni animal ni végétal ni champignon. Il n'a pas de cerveau, mais il est capable de se déplacer à une vitesse de 3 mm/h, de se nourrir, de s'organiser et même de transmettre ses apprentissages à un congénère. Habitué des sous-bois des pays tempérés, se développant sur les troncs des arbres, le blob ressemble à une sorte de lichen, souvent jaune, pouvant atteindre plusieurs mètres carrés. Cet organisme étonnant, quasi immortel biologiquement, fait l'objet de recherches dans le laboratoire d'Audrey Dussutour, directrice de recherche CNRS au Centre de recherches sur la cognition animale. "L'objectif de l'expérience était d'observer l'impact de la micropesanteur sur la nutrition et le comportement exploratoire de quatre blobs placés dans des boîtes de Petri. En parallèle, les élèves de 4 500 établissements scolaires français réalisaient la même expérience", explique Audrey Dussutour. Thomas Pesquet, comme les classes, a ainsi reçu des kits avec les blobs déshydratés. Leur mission était de les "réveiller" en injectant de l'eau avec une petite seringue pour les réhydrater. Le comportement des blobs de l'ISS était alors enregistré par une petite caméra intégrée à la boîte. "Nous avons pu constater que les quatre blobs se sont bien 'réveillés', et quasiment en même temps. Ils ont exploré leur environnement puis, à la fin du deuxième jour, se sont 'rendormis'. Habituellement, le blob rampe; or, là, nous avons vu à deux reprises les blobs 'se lever'. Ils ont commencé à construire des excroissances. En termes de vitesse et d'optimisation du trajet, nous n'avons pas constaté de différences avec leur comportement sur Terre. Mais aucune classe n'a, semble-t-il, aperçu un blob 'se lever'. Alors, même si nous n'avons pas encore analysé tous les retours, nous sommes pratiquement certains qu'il s'agit d'un effet de l'impesanteur. Ce qui signifie que, comme pour tous les organismes, la gravité joue dans la façon dont le blob explore l'environnement", poursuit Audrey Dussutour.



< Le module Columbus, mis au point par l'Esa, est un laboratoire polyvalent dédié à la recherche et aux expériences scientifiques en microgravité.

place de thérapies cognitives, peut-être inspirées de la sophrologie ou de la cohérence cardiaque, afin d'améliorer l'endormissement, car la micropesanteur et l'absence de cycle naturel jour/nuit impactent le rythme circadien.

Pour compenser ces effets physiologiques négatifs de la micropesanteur, et notamment la perte de masse musculaire et osseuse, les hôtes de l'ISS doivent s'entraîner deux heures par jour. Or cet exercice physique quotidien, réalisé dans un environnement immuable, devient vite répétitif et ennuyeux. Avec Immersive Exercise, l'idée était de briser cette routine. Muni d'un casque de réalité virtuelle et de chaussures à capteurs de cadence, Thomas Pesquet pédalait tout en visionnant des vidéos filmées à 360° – parmi lesquelles, à sa demande, un parcours dans Paris à la découverte des monuments –, la vitesse de défilement variant selon sa vitesse de pédalage. Mesurer le tonus, la rigidité et l'élasticité des muscles des humains dans l'espace, mais aussi déterminer les changements dans la perception du temps, analyser les

dépenses énergétiques afin de prévoir les besoins alimentaires pour des vols de longue durée... tels étaient les autres principaux thèmes des expériences dans le domaine de la physiologie et de la santé. Certaines d'entre elles étaient initiées et préparées par le Centre d'aide au développement des activités en micropesanteur et des opérations spatiales (Cadmos) au Cnes.

UN ÉCHANGE DE BIENS OU DE SERVICES

"L'Esa détient 8,3 % des droits d'utilisation de l'ISS, ce qui nous permet d'envoyer un astronaute à bord tous les 18 mois, pendant 6 mois, et de pouvoir réaliser nos propres expériences", précise Didier Schmitt, responsable de la stratégie et de la coordination pour l'exploration habitée et robotique à l'Esa. *"Le fait de poursuivre des missions à bord de l'ISS nous permet de nous préparer pour la phase suivante : envoyer des astronautes dans le Gateway, puis sur la Lune et sur Mars."* En effet, lancée et pilotée par la Nasa, qui en assume 70 %, l'ISS a été développée avec l'agence spatiale russe et la participation des agences spatiales européenne, japonaise et canadienne. Pour l'Europe, le coût de la mission se situe aux alentours de 150 millions d'euros. Il ne s'agit cependant pas d'un transfert de fonds entre l'Agence spatiale européenne et la Nasa, mais d'un échange de biens ou de services. Ce que l'on appelle en anglais un *barter*, un troc. ■

ABONNEZ-VOUS

et restez connectés à l'actualité scientifique

12 numéros + 6 hors-séries par an



L'accès illimité au site internet, à l'appli Science & Vie et autres privilèges

EN CADEAU :
le bracelet connecté !



- Mesure cardio
- Qualité du sommeil
- Podomètre

Ce bracelet connecté compatible Bluetooth® suit votre activité tout au long de la journée. Il vous indique l'heure, la date, la distance parcourue, le nombre de pas, les calories brûlées, mesure votre fréquence cardiaque et votre tension artérielle, analyse la qualité de votre sommeil...

Caractéristiques techniques :

■ Écran d'affichage OLED couleurs ■ Bluetooth: BT4.0 ■ Batterie rechargeable 70mAh Charge: 5V ■ Compatible: IOS et Android.

Photo non contractuelle. © istockphoto.com

BULLETIN D'ABONNEMENT à retourner sous enveloppe affranchie à : Science et Vie – Abonnements – 59898 Lille cedex 9

1 Je choisis mon offre d'abonnement et mon mode de paiement :

M030 # D1366418

LA MEILLEURE OFFRE

L'offre Liberté avec hors-série : Je règle par prélèvement **5,90€ par mois** au lieu de ~~12,24€~~ et je reçois tous les mois + 6 hors-séries par an + l'accès au site (dont TV) **+ EN CADEAU le bracelet connecté.**

[1]

Résiliable à tout moment sans frais. Tarif garanti 1 an, après il sera de 6,90€ par mois.

Je complète l'IBAN à l'aide de mon RIB et je n'oublie pas de joindre mon RIB.

IBAN : F R

Vous autorisez Reworld Media Magazines à envoyer des instructions à votre banque pour débiter votre compte, et votre banque à débiter votre compte conformément aux instructions de Reworld Media Magazines.
Créancier : Reworld Media Magazines 40 Avenue Aristide Briand 92220 Bagneux France. Identifiant du créancier : FR 05 ZZZ 489479

Date : / /

Signature obligatoire :

▲ Cette offre est disponible uniquement en joignant votre R.I.B. (Relevé d'Identité Bancaire) ▲

L'OFFRE 1 AN

L'intégrale avec hors-série :
1 an (12 numéros) + 6 hors-série + l'accès au site (dont TV) **+ EN CADEAU le bracelet connecté.**
Je règle une seule fois **79,90€** au lieu de ~~143,21€~~. [2]

L'intégrale sans hors-série :
1 an (12 numéros) + l'accès au site (dont TV).
Je règle une seule fois **65,90€** au lieu de ~~106,18€~~. [3]

je règle par chèque à l'ordre de Science & Vie et le joins sans agrafe ni scotch.

Vous souhaitez régler par carte bancaire ?
Rendez-vous sur www.kiosquemag.com
c'est rapide, simple et 100% sécurisé !

2 J'indique les coordonnées du bénéficiaire de l'abonnement :

Kiosque Mag Disponible sur kiosquemag.com

Nom** : Prénom** :

Adresse postale** :

CP** : Ville** :

Tél. (portable de préférence) : (Envoi d'un SMS en cas de problème de livraison)

Email : (Pour gérer l'abonnement, accéder aux services numériques et recevoir nos offres promotionnelles. L'adresse e-mail ne sera pas communiquée à des partenaires extérieurs)

Date de naissance : (pour fêter son anniversaire)

*Le prix de référence à l'année se compose du prix kiosque (58,80 € sans HS, 94,50 € avec HS), des frais de port (7,32 € sans HS, 8,58 € avec HS), du site internet (41,40 €). ** À remplir obligatoirement. Offre réservée en France Métropolitaine valable jusqu'au 30/06/2022. DOM-TOM et autres pays nous consulter. Le produit vous sera adressé dans un délai de 4 semaines après réception de votre règlement et dans la limite des stocks disponibles. Vous disposez, conformément à l'article L. 221-18 du code de la consommation, d'un droit de rétractation de 14 jours à compter de la réception du magazine en notifiant clairement votre décision à notre service abonnement. Le coût du retour de(s) produit(s) est à votre charge. Responsable de traitement des données personnelles : Reworld Media Magazines SAS. Finalités du traitement : gestion de la relation client, opérations promotionnelles et de fidélisation. Données postales et téléphoniques susceptibles d'être transmises à nos partenaires. Conformément à la Loi Informatique et Libertés du 6-01-78 modifiée, vous pouvez exercer vos droits d'opposition, accès, rectification, effacement, portabilité, limitation à l'utilisation de vos données ou donner vos directives sur le sort de vos données après décès en écrivant à Reworld Media-Mag, c/o service juridique, 40 Avenue Aristide Briand 92220 Bagneux, ou par mail à cpd@reworldmedia.com. Vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL - www.cnil.fr. Pour toute autre information, vous pouvez consulter nos OGV sur kiosquemag.com.





UNE JOURNÉE DANS

Dans la Station spatiale internationale, le train-train n'a rien de banal. Il mêle questions pratiques et situations insolites. PAR PATRICK REBEAUD

Après une bonne nuit de sommeil, le spationaute se réveille. Parfois, il (ou elle) a la surprise de voir ses mains et ses bras flotter en l'air devant ses yeux. C'est un effet de l'impesanteur. Pour la même raison, sa tête ne s'appuie pas sur un oreiller. Le spationaute se lève. Enfin, non. Il ne se lève pas, car il a dormi debout dans un sac de couchage fixé le long du mur. De toute façon, "debout" ne veut rien dire, vu que la verticale et l'horizontale n'existent pas ici. Simplement, dans certaines pièces, par convention, on a décidé que telle paroi serait un sol et telle autre un plafond.

Le spationaute se rend aux toilettes. Dans l'espace, les liquides ne sont pas des amis. On ne doit jamais les laisser surgir à l'air libre. Ils

risqueraient de s'évader vers des installations électriques et électroniques. Aussi, c'est un tuyau adapté à l'anatomie de la personne qui recueille son urine. Celle-ci sera recyclée en eau potable. Les selles sont récupérées dans un sachet. Sachet qui en rejoint d'autres ainsi que des déchets dans un vaisseau spatial à destination de la Terre. Ce cargo se consumera au contact de l'atmosphère et deviendra pour les Terriens... une étoile filante !

Il est temps de se laver. Pas de douche, bien sûr. Des lingettes feront l'affaire. Au petit déjeuner, le pain traditionnel non plus n'est pas un ami. Ses miettes volantes risqueraient de se nicher n'importe où, par exemple dans les voies respiratoires des astronautes ou dans le dispositif de purification d'air. Le petit déjeuner et les autres repas ont été préparés de longue date. Chaque habitant

La Station spatiale internationale

- se déplace autour de la Terre à une altitude de 330 km à 420 km et à une vitesse moyenne en orbite de 27 600 km/h;
- fait le tour de la Terre toutes les 92 minutes;
- mesure 110 m de longueur, 74 m de largeur et 30 m de hauteur et offre près de 400 m³ de volume habitable.
- Sa construction et sa maintenance ont nécessité 200 missions spatiales.
- Elle est habitée en continu depuis l'an 2000;
- elle devrait encore servir jusqu'en 2030.

UTC (le temps universel), notamment le planning de travail (en gros 7 h/12 h et 13 h/17 h). Tout débute par un briefing et la lecture du programme du jour sur la tablette. Suivent des expériences scientifiques et parfois des activités éducatives à destination des scolaires. La moitié du temps de travail est dédiée à l'entretien de la Station spatiale. Après quoi, deux heures d'activités musculaires sont nécessaires pour conserver un état physique proche du Terrien moyen. Les soirées sont libres (détente en musique, visionnage de films, communication avec les proches) et les dimanches aussi. Normale, la vie ? Presque, avec quand même le plaisir de se déplacer sans marcher, en se laissant voler le long des coursives, et l'émerveillement devant le spectacle de notre planète visible depuis la coupole. Et puis il y a les moments exceptionnels comme les sorties dans l'espace pour des réparations ou des aménagements supplémentaires.

Les imprévus ont été envisagés. Certains occupants de la Station sont formés aux gestes médicaux d'urgence : intraveineuse, trachéotomie, immobilisation, massage cardiaque, suture, anesthésie dentaire. Une procédure de retour sur Terre est prévue en cas de découverte de la grossesse d'une astronaute.

Quelle loi s'applique dans l'ISS ? Dans un module des États-Unis, le droit de ce pays. Dans un module russe, la loi russe. Pour les modules européens, un accord a été passé entre les états membres. Sa mise en œuvre est confiée à l'Agence spatiale européenne.

Mais le grand bonheur des astronautes vient d'un constat : issus de cultures très différentes, ils peuvent vivre ensemble longtemps en milieu confiné dans la plus parfaite harmonie. ■



Le 30 avril 2021, l'équipage de l'ISS fêtait les 45 ans de l'astronaute américain Victor J. Glover, en trinquant avec... des boissons en sachet.

L'ISS

de l'ISS a fait connaître ses goûts culinaires avant le départ afin que lui soient préparés des plats dans la limite de 2 800 calories par jour. Pour rendre à la nourriture lyophilisée sa bonne consistance, on utilise le distributeur d'eau. Il faut pour cela ménager une ouverture dans le sachet du plat préparé. On le connecte au distributeur de liquide sur lequel on règle la quantité souhaitée. On remplit le sachet. Après déconnexion, on le réchauffe dans un petit four et "À table !". Certains fruits et poissons ont été traités avec des moyens thermiques pour leur conservation. Ils sont stockés dans des boîtes de conserve ou des sachets lyophilisés. Les plats cuits à base de bœuf, conditionnés dans des sachets d'aluminium, ont été stérilisés au moyen de rayons ionisants pour leur bonne conservation. L'arrivée de nouveaux membres d'équipage permet l'acheminement de fruits frais.

Malgré les 16 levers et couchers de soleil par 24 heures, les horaires des journées se déroulent selon des normes terrestres calées sur l'heure



La ruée vers les astéroïdes

L'extraction des minerais contenus dans les objets célestes se matérialise grâce à des bactéries : c'est le *biomining*.

PAR PASCALE-EMMANUELLE LAPERNAT-GUILHAUMON

La mission Psyché partira en 2022 vers l'astéroïde éponyme, de type M (métallique) et d'un diamètre de 226 km (illustration ci-dessus). Les experts se sont penchés sur sa valeur, annonçant des chiffres en quintillions de dollars... Il contiendrait plus de 80 % de métaux et quelque 7 % de pyroxène faible en fer, le reste étant de la matière carbonée, estimée riche en eau par les chercheurs de l'université d'Arizona. Déjà John S. Lewis, dans son livre *Mining the Sky* en 1996, estimait qu'un astéroïde de type M de 3 km pourrait contenir 30 fois plus de métaux que tout ce qui a été extrait sur Terre.

Les recherches se tournent vers le *biomining*, ou biolixiviation. Cette biotechnologie utilise les bactéries chimiolithoautotrophes pour transformer les minerais (cuivre, zinc, cobalt, or, uranium, métaux rares...) et les rendre plus faciles à extraire. Les rendements sont souvent meilleurs et le bilan environnemental également. L'expérience BioRock, de l'Esa, a été réalisée sur l'ISS pour étudier le comportement et la productivité de trois espèces de bactéries (*Sphingomonas desiccabilis*, *Bacillus subtilis*, *Cupriavidus metallidurans*) en microgravité. Les résultats sont probants. L'article "*In situ resource utilisation : the potential for space biomining*", paru

Combien y en a-t-il dans le système solaire ?

Entre les observations du SDSS (Sloan Digital Sky Survey) par le télescope du Nouveau-Mexique et celles de la sonde Gaïa, Benoît Carry, astronome adjoint à l'observatoire de la Côte d'Azur, multiplie les identifications : "On connaît 1143 366 astéroïdes supérieurs à 4 mètres, dont 200 supérieurs à 100 kilomètres. Toutes les informations sont centralisées au Minor Planet Center (MPC). Grâce à l'incroyable sonde Gaïa, les détections se multiplient, beaucoup plus précises sur les orbites, positions, spectres... Elle fait entre 25 et 150 millions d'observations par jour. On a ainsi revu à la hausse la taille de la ceinture d'astéroïdes, car on se rend compte qu'ils s'étendent à de hautes latitudes écliptiques."

Le chercheur s'enthousiasme : "On connaît entre 10 et 20 000 troyens, ces astéroïdes qui partagent la même orbite que Jupiter, et on en connaîtra bientôt 100 000 !"

dans la revue scientifique *Minerals Engineering* (janvier 2022), présente en outre cette méthode comme idéale pour utiliser les ressources de la Lune, de Mars ou des astéroïdes, afin de baisser drastiquement les coûts, réduisant le poids et la puissance au décollage des fusées. Yosephine Gumulya (Centre for Microbiome Research, université de Queensland, Australie) y explique que, sur Terre, le *biomining* est utilisé pour récupérer les métaux de débris électroniques. Il pourrait en être de même dans l'espace en recyclant les déchets, alors que cette problématique des débris spatiaux est préoccupante. L'utilisation de micro-organismes est aussi envisagée pour la

biométhanogenèse sur les astéroïdes, les transformant en "stations-service" de l'espace pour de la propulsion chimique.

UN BÉMOL SUR L'ÉCHELLE DE PRODUCTION

Le bémol pointé par Andreas Hein, directeur de l'Initiative for Interstellar Studies, est l'échelle de production. Pour que de telles biotechnologies soient rentables, elles doivent produire des minerais ou biogaz rapidement et à grande échelle. L'exploitation des ressources spatiales se tourne plutôt, en premier lieu, vers l'extraction de l'eau et l'oxygène présents en bien plus grande quantité qu'on ne le pensait.

Il explique que "la maturité technologique est là pour l'eau et l'oxygène, il existe des prototypes qui doivent être testés sur la Lune. L'utilisation des ressources in situ permettrait également de réduire les coûts de construction des futures bases lunaires, les métaux pouvant être utilisés pour construire des composants et outils : la société Made In Space, par exemple, a développé une imprimante 3D utilisable en microgravité."

EXTRAIRE LE PLATINIUM SERAIT RENTABLE

L'extraction de l'eau des astéroïdes est ainsi un projet très concret, utilisant un système de structure gonflable pour capturer un astéroïde, le réchauffer en concentrant le rayonnement solaire, condenser ensuite la vapeur et la stocker. Développés par TransAstra Corp, Mini Bee sera bientôt testé pour l'exploitation de l'eau d'un astéroïde pour de la propulsion, Honey Bee et Queen Bee pour l'extraction de l'eau sur des objets de 10 à 40 mètres...

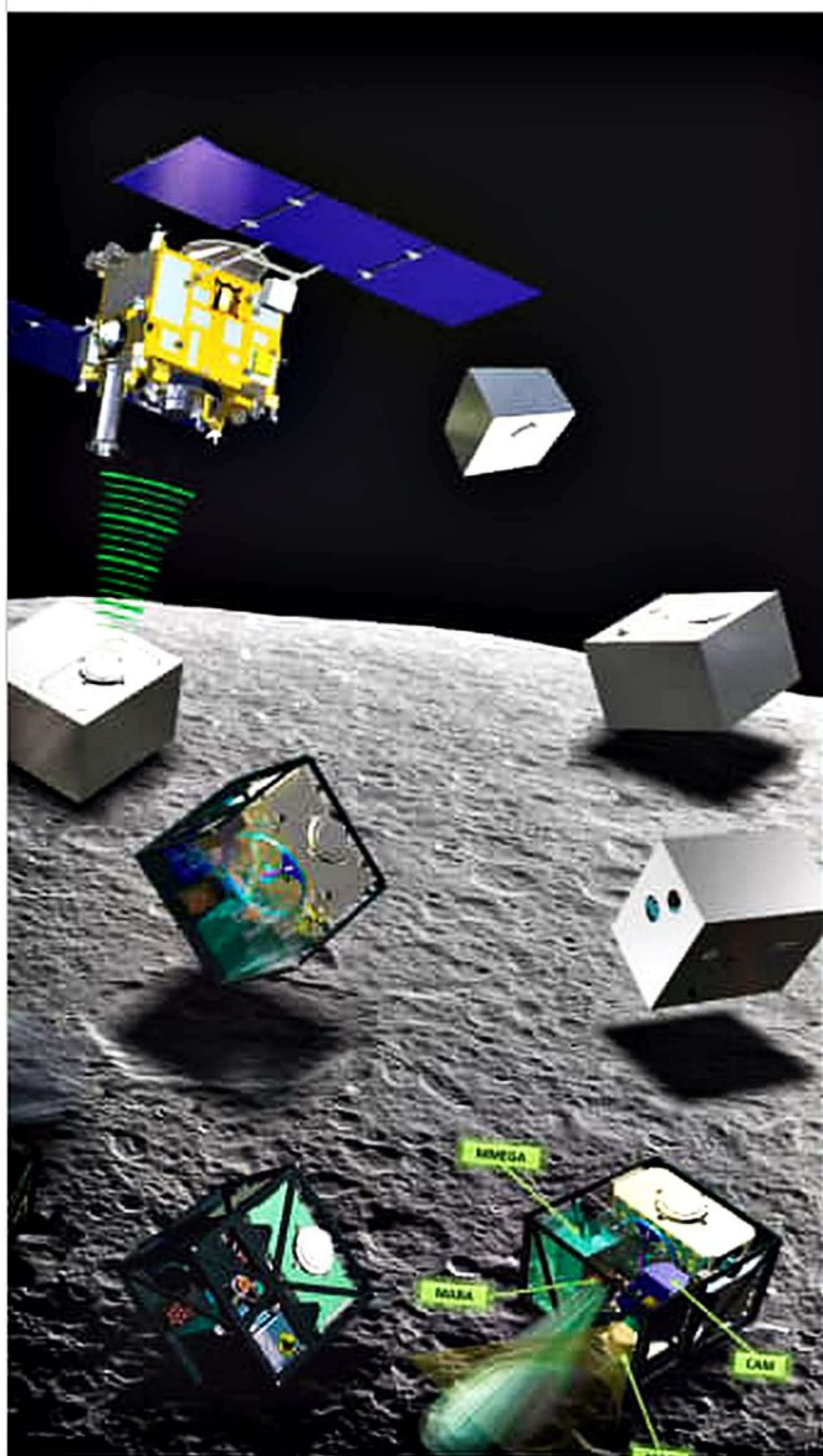
La société Bradford Space, qui a racheté Deep Space Industries, s'est spécialisée dans les systèmes de propulsion à eau. Asteroid Mining Corporation crée

une base de données des ressources spatiales... On peut chiffrer ces projets : Andreas Hein, également professeur associé au centre interdisciplinaire SnT de l'université du Luxembourg, en a fait une analyse économique publiée dans *Acta Astronautica* en 2020. "Le coût des missions tend à diminuer, grâce à SpaceX. On s'oriente vers de la production de masse, avec des petits dispositifs réutilisables dont le coût sera plus facilement amorti que celui du développement d'un seul appareil. On peut estimer les bénéfices dans des scénarios conservateurs ou optimistes. Dans ces calculs, l'exploitation de l'eau est toujours rentable. Par contre, pour les minerais, les lois du marché sont à prendre en compte : une profusion de matériaux sur un petit marché ferait s'effondrer les prix, et la rentabilité ne serait plus au rendez-vous. La bonne porte d'entrée serait le platini-um : on n'a pas encore la technologie, mais les calculs de rentabilités sont faits car la ressource est abondante et les concentrations plus élevées que sur Terre, 10 à 1 000 fois, impliquant un bien meilleur rendement." Pour ce chef d'équipe, "l'ingénierie des systèmes spatiaux, c'est juste une question de temps." ■

Un échantillonnage réussi

Le but de la mission japonaise Hayabusa 2 était de rapporter des échantillons de l'astéroïde Ryugu (taille d'environ 900 mètres). Partie en 2014, la sonde a voyagé 4 ans pour parcourir 300 millions de km avant de découvrir une surface accidentée qui a obligé une révision totale de la stratégie de descente. L'astrophysicien Patrick Michel, co-investigateur de la mission, raconte: "Il a fallu trouver les sites adaptés aux manœuvres de l'atterrisseur MASCOT et de récolte d'échantillons par la sonde, et faire face à des conditions contre-intuitives de faible gravité. Cette phase a permis d'en apprendre beaucoup sur la composition de la surface de l'astéroïde et le comportement du régolithe avec lequel la sonde a interagi. C'est tout un champ de recherche qui s'ouvre sur les propriétés de ce régolithe : sa cohésion, les forces de contact/friction, la forme et la taille des particules, leur densité,

la porosité..." Une dizaine de Français font partie de l'équipe ayant reçu le prix mondial de l'espace de la Fédération astronomique internationale, et "une petite vingtaine de Français sont engagés dans la cosmochimie pour l'étude préliminaire de ces échantillons, dont 70% sont conservés intacts pour les générations futures." La mission est en effet un grand succès: ce sont 5,4 grammes qui ont été rapportés, dont "la composition et la diversité lithologique nous en apprendront beaucoup sur la formation des planètes et le rôle des astéroïdes dans l'émergence de la vie sur Terre". La sonde, en très bon état, continue son voyage jusqu'au rendez-vous en 2031 avec un petit astéroïde (1998 KY26, de 30 mètres) à rotation rapide pour essayer de comprendre pourquoi il ne se désintègre pas. Entre-temps, elle survolera en 2026 un astéroïde de 800 mètres de diamètre d'un type spectral jamais visité.





À quoi ressemblent ces objets célestes ?

L'ESO (European Southern Observatory) a publié en octobre dernier les images des 42 objets (ci-dessus) parmi les plus grands de la ceinture d'astéroïdes située entre Mars et Jupiter. Ces images ont été obtenues grâce au VLT (Very Large Telescope) au Chili. Le plus grand est Cérés, avec un diamètre de 940 km, classé planète naine, puis vient Vesta avec un diamètre de 520 km, suivi de Pallas, Hygiea..., les plus petits objets de ce tableau étant Ausonia et Urania, mesurant moins de 90 km de diamètre. Si beaucoup d'astéroïdes sont plutôt sphériques, d'autres présentent des formes très particulières, comme Kleopatra, dont les images radar évoquent la forme d'un fémur raccourci : long de 270 km avec des extrémités plus larges. Cet astéroïde a la particularité d'avoir deux lunes orbitant autour de lui.

Les analyses spectrales montrent la grande diversité de leur composition, mais cette approche lointaine est insuffisante. Les connaissances ont fait un bond depuis la sonde NEAR Shoemaker, première à avoir orbité et atterri sur un géocroiseur de type S (Éros), en 2000. Éros est ainsi recouvert de pyroxène, olivine et silicium.

ASSEMBLAGES DISPARATES

Les missions sur Bennu, par Osiris Rex, puis sur Ryugu, par Hayabusa 2, ont révélé l'incroyable diversité des caractéristiques géologiques de surface. "On sait maintenant que ces objets sont les résultats de l'agrégation des produits d'une destruction d'un astéroïde parent. Toutes les informations obtenues par les images, le contact et les interactions de la sonde, les analyses spectrales, permettent aux chercheurs de revoir ou compléter

leurs modèles de formation et d'évolution de ces objets", explique Patrick Michel, co-investigateur des missions Osiris Rex et Hayabusa 2 et qui travaille sur le projet MMX pour envoyer un rover sur Phobos, lune de Mars. "Les 600 fragments de la météorite Almahata Sitta récupérés au Soudan en 2008, résultant de l'impact de l'astéroïde 2008 TC3 détecté 20 heures avant qu'il ne frappe le sol, montrent aussi qu'ils peuvent être très hétérogènes, contenant des lithologies très différentes, certaines n'ayant pas subi de processus à hautes température, pression et gravité les transformant chimiquement comme sur Terre." Pour l'anecdote, le chercheur précise : "Si nous n'étions pas allés chercher ces fragments juste après la chute de l'astéroïde, nous aurions pu penser qu'ils étaient d'origines différentes tant ils présentaient de diversité !"

IMAGINER

90 Le télescope spatial du siècle paré à sonder

98 Les limites humaines de la conquête spatiale

102 Jacques Arnould : *"Explorer est à la fois un droit et un devoir"*

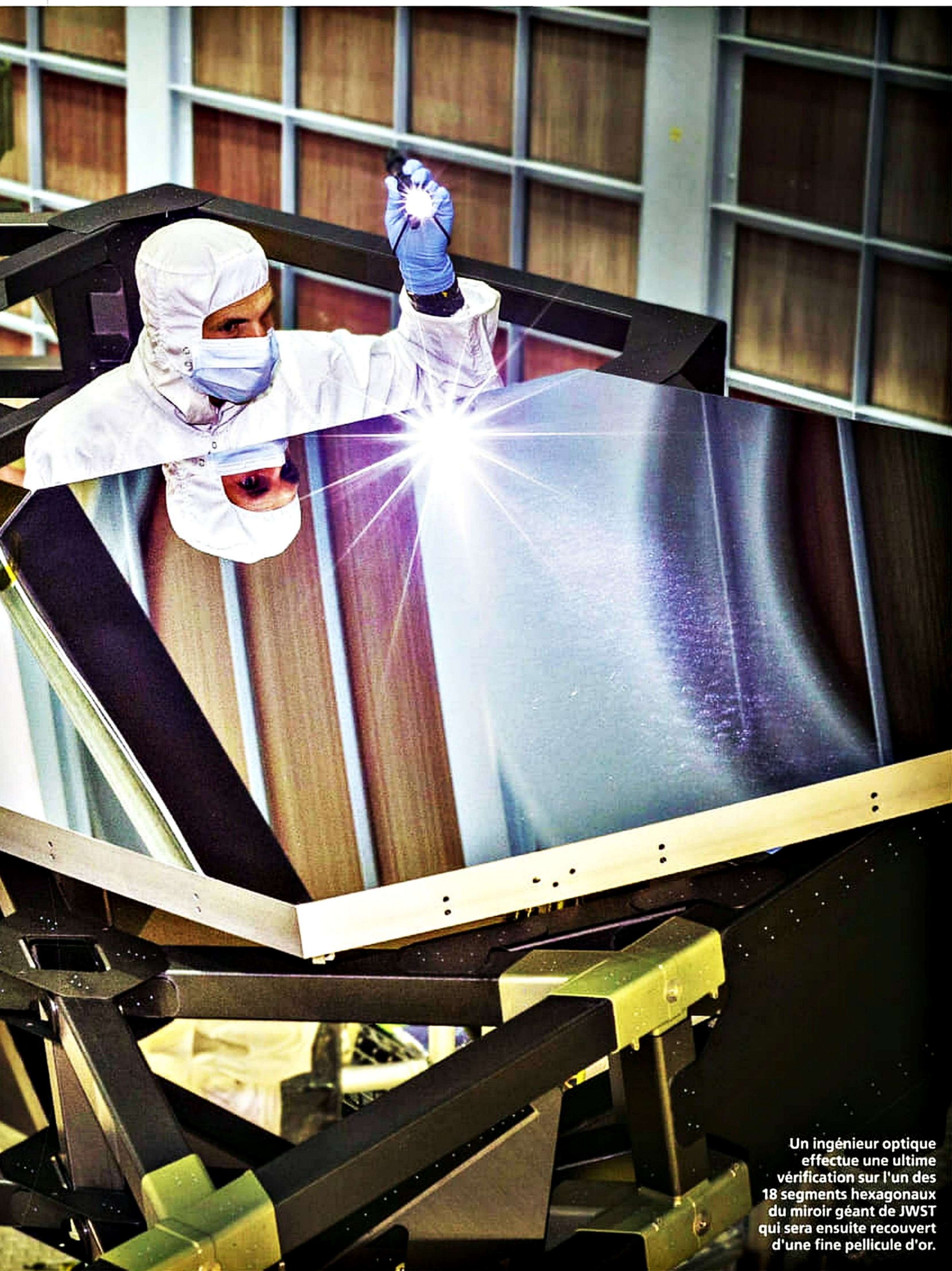






Le télescope spatial du siècle paré à sonder

Trente ans. C'est le temps qu'il aura fallu pour déployer l'instrument de tous les superlatifs : le télescope James Webb. Il devrait bientôt nous régaler d'observations correspondant à l'Univers très ancien, remplaçant la découverte avant la conquête. PAR SIMON DEVOS



Un ingénieur optique effectue une ultime vérification sur l'un des 18 segments hexagonaux du miroir géant de JWST qui sera ensuite recouvert d'une fine pellicule d'or.

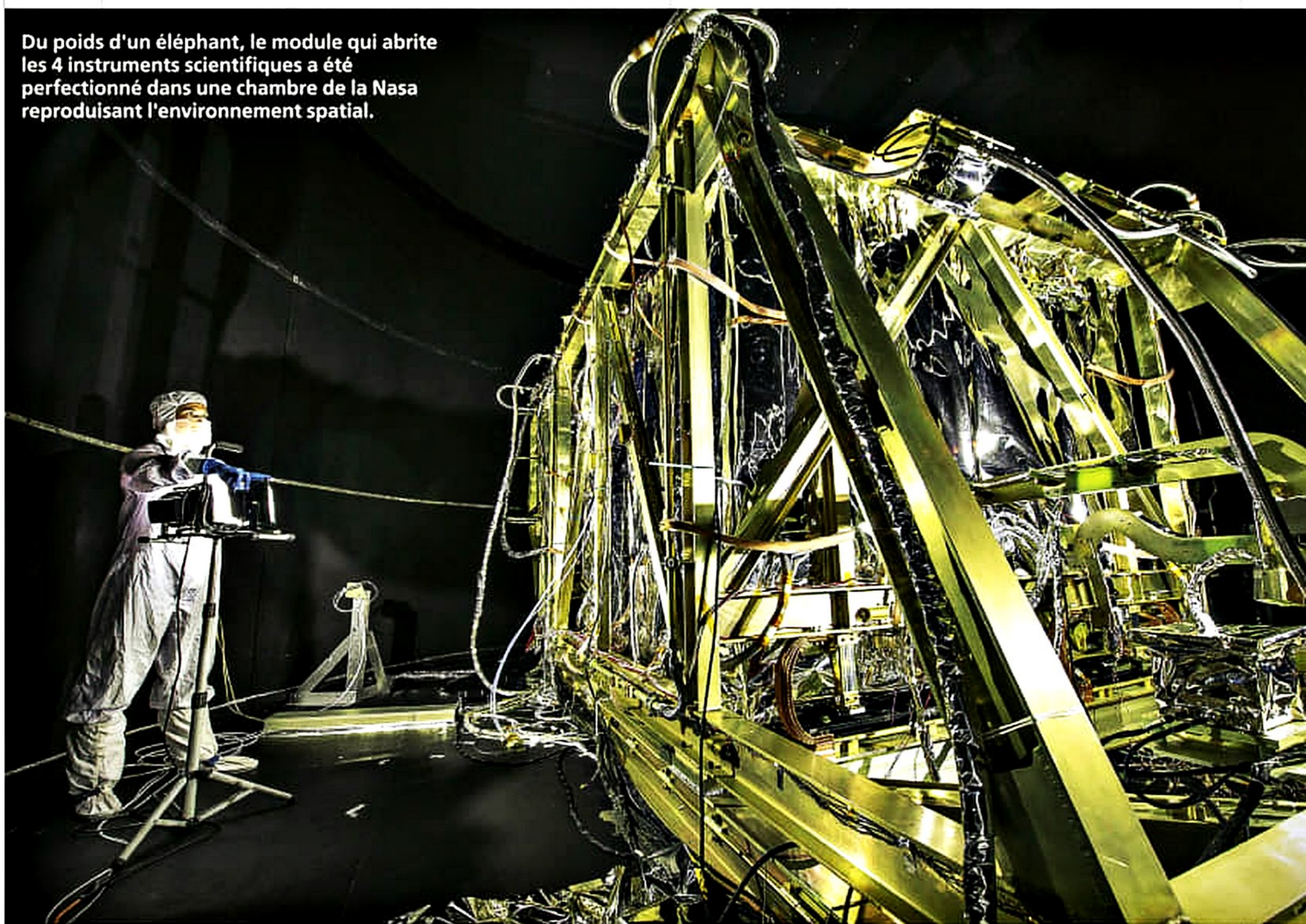
© C. GUNINI/NASA/ESA

Trente années ponctuées d'avancées et d'échecs. De tests minutieux. D'attentes, de craintes et de doutes. Après avoir vu son budget exploser et sa date de lancement repoussée une quinzaine de fois, le voilà finalement achevé, paré à sonder aussi bien les astres proches de notre Système solaire que l'Univers très profond. Encapsulé dans la fusée Ariane 5, il a été lancé avec succès le 25 décembre dernier depuis la base de Kourou, en Guyane française. Souvent qualifié de "successeur de Hubble", le James Webb Space Telescope (JWST) est sur le point de faire entrer l'observation spatiale dans une toute nouvelle ère. Car avec son miroir de 6,5 m de diamètre – contre 2,4 m pour celui d'Hubble – ce télescope sera capable de "voir" des objets d'un éclat cent fois plus faible. Et d'apporter, comme l'espère l'aréopage de plus de 1 200 chercheurs qui a travaillé à son développement, des éléments de réponses à certaines des plus grandes questions de l'astrophysique et de la cosmologie moderne.

Ce projet de télescope spatial géant trouve son

origine au début des années 1990, époque où Hubble prend son envol et commence tout juste à collecter ses premières lumières. Ce dernier étant prévu pour fonctionner une quinzaine d'années seulement, la Nasa, en partenariat avec les agences spatiales européenne (Esa) et canadienne (CSA), a en effet pris les devants pour travailler sur son remplaçant, dont le lancement était originellement prévu pour 2007. Les réflexions de départ sont fortement influencées par les limitations techniques d'Hubble. Sensible au rayonnement visible, celui-ci fera des merveilles dans l'observation d'objets relativement proches. Mais il ne permettra en revanche jamais d'accéder aux éléments les plus lointains, qui correspondent à l'Univers très ancien. *"Du fait de l'expansion de l'espace, ces astres s'éloignent de nous à grande vitesse, ce qui a pour effet de décaler la lumière qu'ils envoient vers les infrarouges",* rappelle Pierre Guillard enseignant-chercheur à l'Institut d'astrophysique de Paris. *"C'est donc assez vite décidé : le JWST observera dans l'infrarouge proche et moyen, et fonctionnera en complémentarité avec d'autres télescopes plutôt*

Du poids d'un éléphant, le module qui abrite les 4 instruments scientifiques a été perfectionné dans une chambre de la Nasa reproduisant l'environnement spatial.



Les 18 segments du miroir déployés pour tester la perfection de l'alignement.



spécialisés dans le visible. Il embarquera à son bord quatre instruments – munis d'imageurs et de spectrographes – chacun conçu pour observer des astres de nature différente. Les agences spatiales tablent également sur un miroir près de trois fois plus grand que celui de Hubble, capable de capter beaucoup plus de lumière et donc de voir des objets bien moins brillants. Qui plus est, l'augmentation de la taille du miroir permet de compenser la diminution du pouvoir de résolution du télescope, qui survient lorsqu'on augmente la longueur d'onde observée. Le James Webb gardera donc la même acuité visuelle que son prédécesseur, tout en observant une portion différente du spectre électromagnétique.

344 POINTS DE DÉFAILLANCE POSSIBLES

Toutefois, les imposantes dimensions du JWST sont assez vite devenues un immense casse-tête pour les ingénieurs en charge du lancement. En effet, le seul moyen de faire rentrer tous les éléments du

télescope dans la petite coiffe de la fusée Ariane 5 qui a assuré le décollage était de les emballer minutieusement et de prévoir leur déploiement une fois l'appareil dans l'espace. Même le miroir principal du JWST a été divisé en 18 facettes hexagonales, orientables individuellement. *"Toute cette opération requiert une cinquantaine de manœuvres mécaniques, au cours desquelles nous avons identifié pas moins de 344 points de défaillance possibles"*, commente Marcia Rieke, professeure d'astronomie à l'université de l'Arizona, qui a passé plus de vingt ans à travailler sur le JWST. *"Nous avons réalisé des dizaines de tests et je suis assez confiante, mais nous ne sommes jamais totalement à l'abri d'un problème technique."* Parmi tous les éléments qui composent l'observatoire spatial, c'est probablement le bouclier thermique de l'appareil qui inquiète le plus les chercheurs. Il s'agit d'une immense voile repliée sur elle-même à la manière d'un origami, mesurant 22 m de longueur pour 12 m

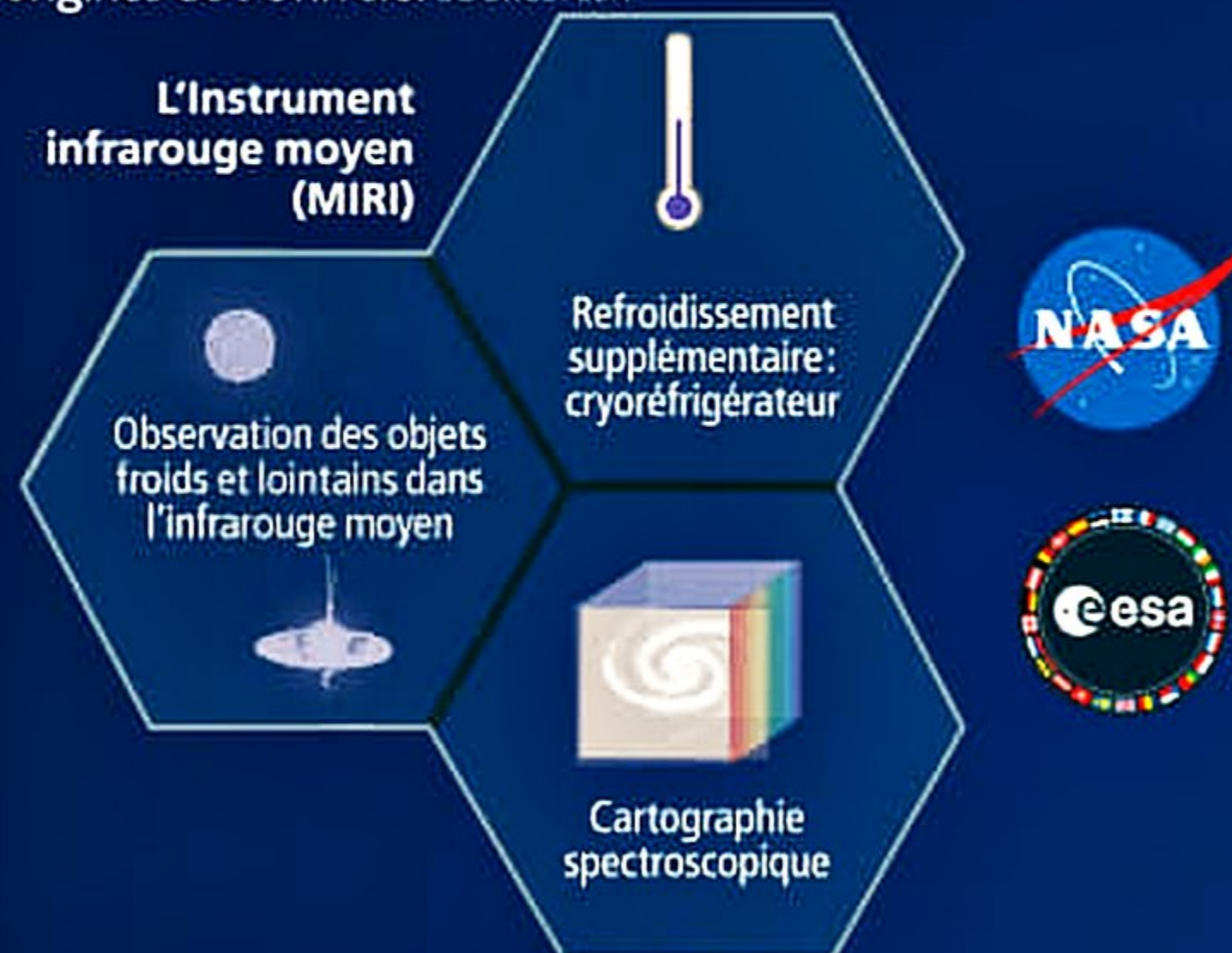
de largeur. Soit l'équivalent d'un court de tennis en superficie. "L'ouverture de cet élément a posé quelques problèmes lors des premiers tests, mais qui, semble-t-il, ont été résolus depuis", rassure Hakim Atek, chercheur à l'Institut d'astrophysique de Paris. Cette grande voile, composée de fines couches de polymère métallisé, est indispensable au fonctionnement du télescope. Sans elle, les instruments et les miroirs se retrouveraient à la merci du rayonnement solaire, mais aussi des infrarouges en provenance de la Terre et de la Lune, dont les éclats empêcheraient toute observation. Sans parler des variations de température, qui pourraient, à terme, déformer le miroir primaire. "C'est certainement le pire cauchemar de toutes les personnes qui ont travaillé sur le télescope : un problème au moment de l'ouverture de ces panneaux de protection", poursuit Hakim Atek. Si tout se déroule comme prévu, le déploiement du télescope spatial arrivera à son terme 30 jours après son lancement, au moment même où s'achèvera son long transit jusqu'à sa destination finale. Car contrairement à Hubble, qui gravite autour de notre planète à une distance de 590 km, le James Webb Space Telescope sera subtilement placé à proximité d'une région singulière du Système solaire : le point de Lagrange L2, situé à 1 500 000 km de la Terre dans la direction opposée au Soleil ! À cet emplacement, l'attraction gravitationnelle des deux astres équilibre parfaitement le mouvement orbital du télescope. Ce dernier gravitera alors autour de notre étoile en restant toujours dans l'axe de la Terre. Ce qui présente bien des avantages, comme celui d'éviter les rayonnements en provenance de la Terre, mais un inconvénient majeur : à cette distance, il sera impossible de réparer, ravitailler ou améliorer le JWST.

CAPTER LES TOUTES PREMIÈRES GALAXIES

Si toute cette laborieuse phase de déploiement se déroule correctement, le James Webb pourra – une fois passé le stade des tests et des calibrages – entamer ses premières observations au début de l'été 2022. Les attentes des chercheurs sont colossales. En effet, grâce à ce télescope, ils pourront avoir un tout nouveau regard aussi bien sur des astres proches qu'extrêmement lointains. Redécouvrir des régions du ciel célèbres et en révéler d'autres, totalement inconnues. Une chose est sûre : il y aura un avant et un après JWST. En premier lieu, les astrophysiciens espèrent réussir à capturer les toutes premières galaxies qui se sont formées quelques centaines de

La science embarquée dans JWST

Le télescope a été lancé le 25 décembre dernier. Les premières images devraient nous parvenir en juin 2022 : un accès inédit aux origines de l'Univers. SOURCE : ESA



La spectroscopie



Pourquoi étudier l'univers dans l'infrarouge ?

La lumière des galaxies situées à des milliards d'années-lumière nous parvient à travers un espace en expansion. Ceci décale la longueur d'onde de leur lumière dans l'infrarouge. Le télescope James Webb pourra capturer cette lumière émise il y a des milliards d'années.



La lumière dans le proche infrarouge révèle la formation des galaxies et traverse les couches de poussière qui enveloppent les étoiles naissantes.

Le rayonnement infrarouge moyen permet d'observer les régions où se forment les étoiles, et montre comment les étoiles massives et les trous noirs façonnent leur environnement.



Présent



Les miroirs

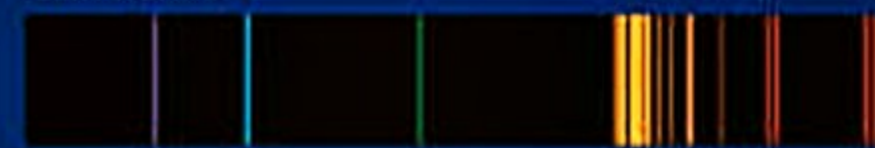
La lumière est divisée en ses différentes longueurs d'onde et focalisée sur un détecteur, formant ainsi un spectre.



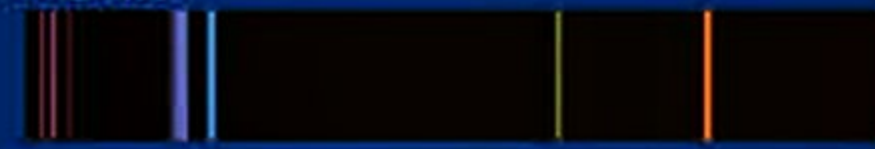
Le spectre

Les atomes et les molécules laissent des signatures uniques dans les spectres, ce qui permet de les identifier.

Carbone



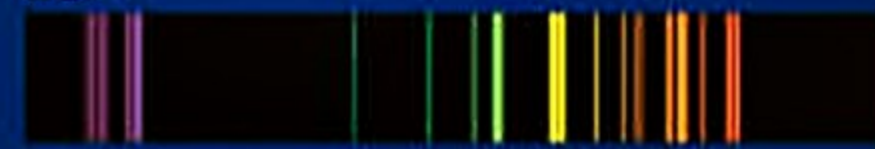
Azote



Oxygène



Fer



L'analyse spectrale

Elle permet d'étudier les atomes et les molécules présents dans la source. Les spectres révèlent également la température, la densité et parfois le mouvement des objets.





L'impressionnant bouclier thermique laissera passer moins d'un millionième de la chaleur du Soleil.

millions d'années seulement après le big bang. "C'est l'un des buts principaux de ce nouveau télescope spatial : nous aider à connaître l'environnement de formation des premières galaxies, confirme Hakim Atek. Ainsi pourrons-nous peut-être enfin savoir, entre autres, si ces premiers agglomérats d'étoiles ont pu ou non être la source du fameux phénomène de réionisation, une étape clé de l'évolution de notre Univers." En effet, les modèles cosmologiques actuels induisent que, quelque part entre 300 et 800 millions d'années après le big bang, l'Univers est passé d'un état neutre à un état ionisé, c'est-à-dire que la plupart des atomes d'hydrogène – qui constituent la quasi-totalité de la matière à cette époque – ont subitement perdu leur unique électron. Les étoiles particulièrement lumineuses composant les premières galaxies font partie des pistes privilégiées pour expliquer cette étonnante réionisation, et les observations du JWST pourraient bien apporter une confirmation à cette hypothèse.

CIBLER LES RÉMANENTS DE SUPERNOVAE

Mais cette sensibilité au domaine infrarouge présente d'autres avantages précieux. Elle permet par exemple de plonger au cœur des vastes nuages de gaz et de poussière qui, à l'instar de la nébuleuse d'Orion, constituent de véritables pouponnières d'étoiles. Complètement opaques dans le domaine visible, ceux-ci deviennent en effet quasiment transparents

en infrarouge ! Qui plus est, avec son immense miroir, le JWST va permettre aux chercheurs d'observer pour la première fois la naissance d'étoiles lointaines, qui sont apparues dans des conditions radicalement différentes de celles que connaît l'Univers aujourd'hui. Et donc de mieux cerner l'évolution de ces fascinantes pouponnières d'étoiles. La comparaison entre la formation d'étoiles récentes et d'autres plus primitives par le biais de ces observations infrarouge compte ainsi parmi les grands objectifs scientifiques du JWST. Tout comme l'étude des rémanents de supernovae, ces nuages de gaz issus des spectaculaires explosions d'étoiles massives, et dont les chercheurs

En faisant travailler les deux télescopes en duo, nous pourrions enfin approfondir grandement notre connaissance de ces mondes extrasolaires



L'Européen Euclid à la recherche de l'énergie sombre

Si le JWST attire en ce moment les regards de chercheurs du monde entier, d'autres missions spatiales en cours de développement pourraient bien jouer un rôle dans les prochaines grandes découvertes en astrophysique. Beaucoup d'espoirs se fondent en effet sur le télescope spatial Euclid de l'Esa, qui devrait être lancé début 2023. *"Il s'agit d'un instrument bien plus modeste, mais qui a été spécifiquement pensé pour répondre à l'un des plus grands mystères de la cosmologie moderne : celui de la nature de l'énergie sombre"*, présente Yannick Mellier, chercheur à l'Institut d'astrophysique de Paris. Cette forme d'énergie hypothétique, remplissant tout l'Univers et imaginée comme source de l'actuelle accélération de son expansion, concentre en effet de nombreuses questions. Les astrophysiciens espèrent donc qu'Euclid et ses observations de milliards de galaxies dans les domaines du visible et de l'infrarouge proche pourraient enfin permettre de faire la lumière sur cette énigmatique énergie sombre. Plus généralement, ce télescope fait partie du programme Cosmic Vision de l'Esa, qui comporte de nombreuses missions exclusivement dédiées à l'observation et à la découverte en astrophysique, comme Solar Orbiter lancée en 2020 et qui étudie notamment le vent solaire, ou Juice qui décollera plus tard cette année à destination des satellites gelés de Jupiter. *"Comme le montrent les nombreuses missions prévues pour les prochaines années, nous sommes en plein âge d'or de l'astrophysique"*, s'enthousiasme Pierre-Olivier Lagage.

peinent à capter les détails. En particulier, la nébuleuse du Crabe, formée suite à l'explosion d'une étoile en l'an 1054, fait partie des cibles prioritaires. Les astrophysiciens espèrent réussir à observer au plus profond des couches de gaz qui la composent, et mieux caractériser l'astre qui en a été à l'origine.

ÉTUDIER LES EXOPLANÈTES

Au cours du développement du télescope James Webb, un tout nouveau champ de recherche a fait son apparition, qui fait désormais partie des plus en vogue aujourd'hui en astrophysique : l'étude des exoplanètes. En effet, depuis la première découverte d'une planète tournant autour d'une autre étoile que le Soleil en 1995, près de 5 000 autres mondes ont été débusqués. *"Hubble a joué un rôle fondamental dans l'étude des exoplanètes, et notamment de leur atmosphère, spécifie Tom Brown du Space Telescope Science Institute de Baltimore (États-Unis). Mais de nombreuses informations ne sont accessibles qu'en infrarouge et, en faisant travailler les deux télescopes en duo, nous pourrions enfin approfondir grandement notre connaissance de ces mondes extrasolaires !"* Avec un peu de chance, les chercheurs espèrent même observer pour la première fois l'atmosphère de planètes de la taille de la Terre. *"Le système Trappist-1, que l'on sait déjà composé d'au moins sept planètes rocheuses en orbite autour d'une naine rouge, sera*

étudié en priorité, précise l'astrophysicien Pierre-Olivier Lagage, l'un des responsables scientifiques du télescope à l'Esa. Nous allons d'abord essayer de voir si certaines de ces planètes ont une atmosphère, et ensuite essayer de mesurer leur concentration en vapeur d'eau, dioxyde de carbone ou méthane..." L'objectif est évident : tenter de déterminer si l'un ou l'autre de ces mondes situés à 40 années-lumière de nous est compatible avec la vie extraterrestre. Pour terminer, le JWST observera également des objets bien plus proches de nous, et pourrait nous délivrer des informations cruciales sur les planètes géantes de notre Système, et notamment les lointaines Uranus et Neptune qui sont aujourd'hui encore assez méconnues des chercheurs. Bref, on ne compte plus les domaines pour lesquels ce fameux télescope du siècle sera décisif. Plus que quelques mois à patienter avant de le voir récolter ses premières lumières, et d'entrer dans une toute nouvelle ère... ■

Les limites de la conquête

Si le rêve des voyages interplanétaires semble plus accessible que jamais, les chercheurs doivent encore trouver des contre-mesures physiologiques et psychologiques pour éviter que les astronautes développent des maladies graves ou tombent dans la confusion. PAR KHEIRA BETTAYEB



humaines

spatiale

Retourner sur la Lune, puis fouler le sol de Mars, près de 600 fois plus loin, et aller au-delà, vers des planètes qui gravitent hors de notre système solaire, à des années-lumière (1 al étant égale à 9461 milliards de km), pour atteindre les exoplanètes GJ 357 d et 55 Cancri e (à respectivement 31 et à 40 al de la Terre), ou, encore plus loin, HD 0307 g ou Kepler 16 b (à 42 et 200 al) : voilà la vision de la Nasa, présentée dans une vidéo mise en ligne fin 2021 (go.nasa.gov/3Fr8dG1). Mais, pour que ce rêve devienne réalité, il faudra auparavant relever plusieurs défis colossaux... Et pas seulement techniques : *"Il sera déterminant de dépasser un autre type d'obstacles, souvent éclipsés par les défis techniques, mais aussi limitants : ceux liés au fait que l'espace est un environnement hostile pour notre corps et notre esprit"*, souligne Guillemette Gauquelin-Koch, responsable des sciences de la vie au Cnes et co-coordinatrice d'un récent livre sur ce sujet (*L'Humain et l'espace – Ses adaptations physiologiques*, éd. Books On Demand, 2020).

UN DÉCONDITIONNEMENT PHYSIOLOGIQUE

Dans l'espace *"pose notamment problème l'impesanteur, à savoir l'absence de gravité, cette force invisible qui attire tous les objets sur Terre vers le centre de celle-ci"*, commence Guillemette Gauquelin-Koch. De fait, notre corps a été façonné pour vivre avec cette force, laquelle interagit avec la plupart de nos fonctions physiologiques. Résultat, dès que nous n'y sommes plus soumis, nos organes se mettent au repos. Survient alors un "déconditionnement" à plusieurs niveaux : *"Le cœur perd de son efficacité à pomper le sang en direction de la tête ; les muscles s'atrophient ; les os se décalcifient ; l'inactivité physique entraîne des perturbations métaboliques comparables à un début de diabète ou à l'obésité..."*, développe Marc-Antoine Custaud, physiologiste à l'université d'Angers, qui étudie les effets de l'impesanteur sur le corps. Conséquence : au retour dans un champ de gravité – terrestre,

L'astronaute Don Pettit est extrait de la capsule Soyouz qui vient d'atterrir dans une région du Kazakhstan, en juillet 2012. Il a effectué une mission de six mois et demi à bord de l'ISS.



martien (environ 3 fois plus faible, mais non nul) ou autre –, les astronautes présentent un risque important de syncope (perte de connaissance) dû à l'afflux rapide du sang dans la partie inférieure du corps, et ne peuvent donc plus maintenir la position debout avec une circulation sanguine insuffisante au niveau du cerveau. De plus, leurs os peuvent être aussi fragiles que ceux de personnes âgées. Or Marc-Antoine Custaud fait remarquer que, *“sur Mars ou d'autres planètes lointaines, il n'y aura personne au sol pour assister l'équipage à son arrivée”*.

DES RADIATIONS COSMIQUES MUTAGÈNES

Lors de travaux publiés en 2019, une équipe de chercheurs internationale a découvert que l'impesanteur pourrait provoquer un autre trouble plus grave : après analyse des données médicales de 11 astronautes ayant séjourné en moyenne six mois à bord de l'ISS, il est apparu qu'une longue exposition à l'impesanteur peut induire *“un écoulement stagnant ou rétrograde”* (dans le sens inverse) dans la veine jugulaire interne (dans le cou) et la formation de caillots dans les veines, pouvant conduire à une embolie pulmonaire (obstruction d'une artère des poumons) mortelle si elle n'est pas traitée en urgence.

Outre l'impesanteur, *“les agences spatiales redoutent un autre facteur de risque susceptible de*

nuire fortement à la santé des astronautes, ajoute la physiologiste Guillemette Gauquelin-Koch : les radiations hautement énergétiques qui balayent en permanence le vide intersidéral, émises notamment par le Soleil et les autres étoiles du cosmos”. Sur Terre, nous sommes protégés de la majeure partie de ce flux énergétique invisible grâce au champ magnétique terrestre. Cependant, la portée de ce bouclier ne va pas jusqu'à Mars, et encore moins au-delà... Or les radiations cosmiques présentent plusieurs risques majeurs. *“Elles peuvent léser l'ADN et provoquer ainsi l'apparition de cancers, notamment des leucémies et des mélanomes. Elles peuvent aussi entraîner une cataracte, qui induit une baisse de la vision pouvant aller jusqu'à la cécité. Enfin, elles peuvent occasionner un*

“ L'espace est un environnement hostile pour notre corps et notre esprit





▲ En 2019, la mission internationale Sirius-19 a étudié les effets de l'isolement et du confinement sur le comportement, la santé et les performances de 6 volontaires pendant quatre mois.

vieillesse accélérée, responsable d'une perte de la masse osseuse et d'un épaississement des parois du cœur et des artères, ce qui augmente le risque de fractures osseuses et d'accidents cardio-vasculaires potentiellement mortels (infarctus du myocarde...)", détaille Nicolas Foray, radiobiologiste à l'Inserm à Lyon, dont l'unité a publié en avril 2021 un article faisant le point sur ces risques.

Enfin, Guillemette Gauquelin-Koch relève que "les voyages interplanétaires butent sur un troisième grand type de facteurs à risque pour l'humain : ceux susceptibles d'altérer la psychologie des astronautes, et non leur physiologie". Inquiétant ici notamment le long confinement qu'impliqueront les voyages interplanétaires, où un nombre restreint de personnes vivra pendant de longs mois entre les "quatre murs" d'un vaisseau, l'éloignement de la "Terre-mère" et des proches, et le fait que les astronautes auront conscience qu'en cas de problème technique ou autre, ils ne pourront pas revenir rapidement sur Terre ou être secourus. "Ces situations extrêmes sont susceptibles d'induire angoisse, stress et frustrations, et d'augmenter le risque de conflits au sein de l'équipage", analyse

Benoît Bolmont, neuroscientifique à l'université de Lorraine. "Ces troubles peuvent nuire au bien-être de l'équipage, voire à sa santé, et par conséquent au succès de la mission", estime quant à lui Michel Nicolas, chercheur en psychologie du sport et de la performance à l'université de Bourgogne.

UN AMENUISEMENT RISQUÉ DES ÉCHANGES

Mais le pire pourrait survenir une fois l'équipage arrivé à destination... Lors d'une étude russe parue en novembre 2021, où 3 femmes et 3 hommes ont participé pendant cent vingt jours à la simulation d'un voyage vers Mars, il est apparu qu'une fois "installé" sur la Planète rouge, l'équipage pourrait couper peu à peu ses échanges avec le centre de contrôle sur Terre, en raison de l'éloignement et du retard dans les communications dû à la distance. Or "un tel 'détachement' peut conduire à une résistance de l'équipage aux recommandations [provenant de la Terre] et à une prédominance de leur prise de décision basée sur leurs connaissances, leurs valeurs et leurs priorités", préviennent les auteurs. Autrement dit, cet amenuisement des échanges avec la Terre est susceptible de faire sombrer les colons dans une certaine anarchie... et compromettre ainsi la mission !

"En savoir plus sur les risques qu'encourent le corps et l'esprit humains lors d'un voyage dans l'espace lointain sera capital pour développer des stratégies permettant de prévenir ou de diminuer ces risques", souligne Guillemette Gauquelin-Koch. Dans le monde, notamment aux États-Unis, en Europe, en Russie et en Chine, plusieurs équipes travaillent à la mise au point de telles 'contre-mesures'. Par exemple, en décembre 2021, des chercheurs américains ont rapporté qu'une sorte de sac de couchage permettant de forcer le sang et la lymphe à redescendre vers les membres inférieurs "peut être une contre-mesure efficace" contre un autre trouble survenant lorsque le corps est soumis plusieurs mois à l'impesanteur : le "syndrome neuro-oculaire associé à l'espace", où les fluides corporels s'accumulent au niveau de la tête écrasent peu à peu le globe oculaire. Mais de nombreuses autres pistes sont explorées pour parer à chacun des risques mentionnés plus haut : protocoles d'exercices physiques pour contrer la perte musculaire et osseuse, blindage adapté pour rendre le vaisseau imperméable aux radiations, programmes de gestion du stress... De quoi réaliser enfin le rêve de voyages interplanétaires ? ■

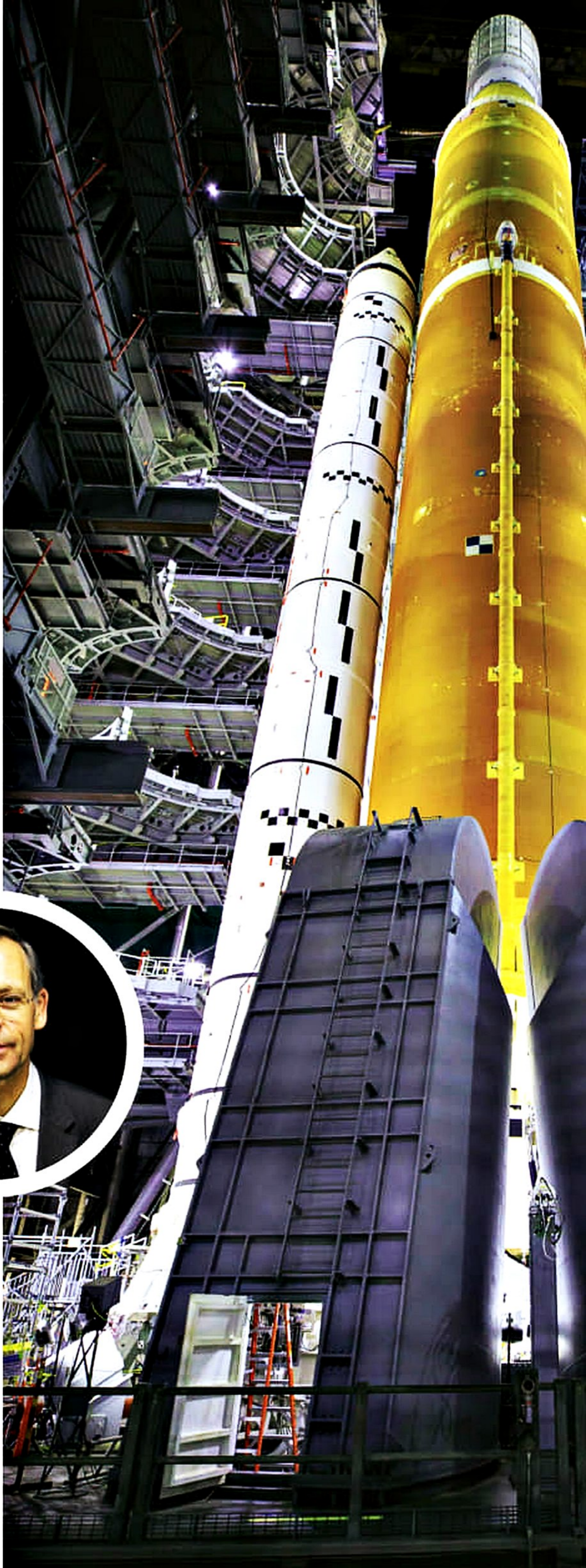
JACQUES ARNOULD

“Explorer est à la fois un droit et un devoir!”

Pour préparer le futur de l'exploration, l'expert éthique au Centre national d'études spatiales invite à une réflexion fondamentale. PAR MAGALI REBEAUD

Docteur en histoire des sciences et en théologie, Jacques Arnould occupe un poste relativement unique dans le monde de l'aéronautique, puisque le Cnes est la seule agence à avoir formellement intégré l'éthique à son organisation.

Cette réflexion fondamentale de tout peuple afin d'établir ses normes, ses limites et ses devoirs consiste en priorité à se poser des questions, et conduit à se demander et à décider ce qui est bien, sensé et raisonnable de faire. Comme le dit Jacques Arnould, *“l'éthique consiste à interroger les évidences et à gérer les possibles”*. C'est peut-être un peu réducteur, mais accepter cette démarche conduit à prendre un peu plus conscience du sens et des conséquences de nos actes, même si tout cela se déroule à des centaines de kilomètres au-dessus de nos têtes.





Symbole de l'exploration spatiale, le lanceur SLS, le plus puissant construit à ce jour, va permettre de retourner sur la Lune, dès cette année, dans le cadre du programme Artemis, et de préparer les futures missions habitées vers Mars.

SVHS: Qu'est-ce que l'éthique de l'espace? Et pourquoi doit-on penser à une éthique de l'exploration spatiale?

Jacques Arnould: L'exploration de l'espace est très certainement l'une des activités les plus extraordinaires que l'humanité ait jamais entreprises. Elle a véritablement quitté son domaine de vie pour affronter, grâce à son génie technique, un milieu qui lui est aussi étranger qu'hostile. Et cette exploration lui a apporté non seulement des connaissances uniques sur son origine et celle de l'univers, mais aussi des possibilités nouvelles en termes de communication et de prévision – ce que nous appelons l'espace utile. Pour autant, nous devons rester des êtres intelligents, raisonnables. Nous devons nous demander pour quelles raisons nous avons entrepris d'explorer l'espace, de l'utiliser, et pour quelles raisons nous allons continuer à le faire. Tel est le fondement de l'éthique des activités spatiales : essayer de répondre à la question du pourquoi. Nous devons aussi nous interroger sur les moyens que nous mettons en œuvre, ainsi que sur les conséquences, bonnes ou mauvaises, de nos activités dans l'espace. Pour le dire autrement, nous devons distinguer la destination – et l'espace en offre d'extraordinaires ! – et le but. Sans but valable et pensé, il est inutile d'aller dans l'espace et de l'explorer.

SVHS: Existe-t-il une "loi" éthique internationale concernant l'exploration spatiale?

J. A. : Il existe un droit spatial. Il est fondé sur un traité, des accords qui reposent sur des principes, comme ceux de

non-appropriation, de libre accès, d'utilisation pacifique. À mes yeux, ce droit est le reflet d'une véritable démarche éthique. Ces textes ont été élaborés et votés au sein de la communauté internationale depuis plusieurs décennies. Il faut donc aujourd'hui nous interroger sur la manière de les faire évoluer. Ce n'est pas facile, mais le chapitre que nous sommes en train d'écrire, celui du New Space*, l'exige.

**Le New Space désigne une industrie spatiale (née aux États-Unis) d'initiative privée, c'est-à-dire une ouverture de l'espace à de nouveaux acteurs et une extension du champ d'application des technologies spatiales. SpaceX, Blue Origin, Virgin Galactic sont les acteurs les plus emblématiques de ce mouvement qui regroupe plus de 1 000 entreprises, dont le but est de "démocratiser" l'accès à l'espace.*

SVHS: Comment appréhendez-vous ce tourisme spatial promis par le New Space et les autres activités non scientifiques?

J. A. : Le tourisme spatial constitue effectivement aujourd'hui la vitrine du New Space. Nous ne devrions pas nous en étonner, puisque durant toute l'histoire de l'humanité, le militaire et le marchand ont suivi de près l'explorateur. Et, plus récemment, le touriste. Ce qui est beau dans cette volonté d'ouvrir l'espace à davantage de monde, c'est que cela entretient le rêve, l'exploration, cette ouverture d'esprit dont nous avons tous besoin, y compris pour être plus responsables de notre planète. Mais il faut rester attentif à l'évolution de la situation. L'encombrement des orbites, la pollution de l'atmosphère ne peuvent pas être ignorés.

SVHS: Des règles ont-elles été mises en place pour la gestion de ces débris spatiaux ?

J. A. : Dans l'espace se trouvent des outils désormais essentiels à la gestion de notre société. Les débris spatiaux sont les reflets de nos activités et des besoins que nous avons de l'espace. Nous avons du mal à admettre que nous puissions salir cette voûte céleste qui représente pour nous, les humains, l'une des images de la beauté, de la pureté. Le problème est que nous sommes effectivement en train de transformer les orbites autour de la Terre en un dépotoir. Et non en une poubelle. La poubelle est en effet un instrument moderne de gestion des déchets, ce dont nous ne disposons pas encore dans l'espace. Il y a plus de trente ans que les acteurs du spatial s'inquiètent du danger que constitue l'accroissement du nombre de débris autour de la Terre. Sans attendre que des lois soient élaborées et appliquées au niveau international – les processus sont en cours, mais prennent du temps –, ces acteurs eux-mêmes ont déjà mis en place des codes de "bonne conduite", des structures de suivi des mesures à prendre afin de mieux savoir ce qui se passe et de gérer ce vrai problème. Mais la question demeure extrêmement sensible.

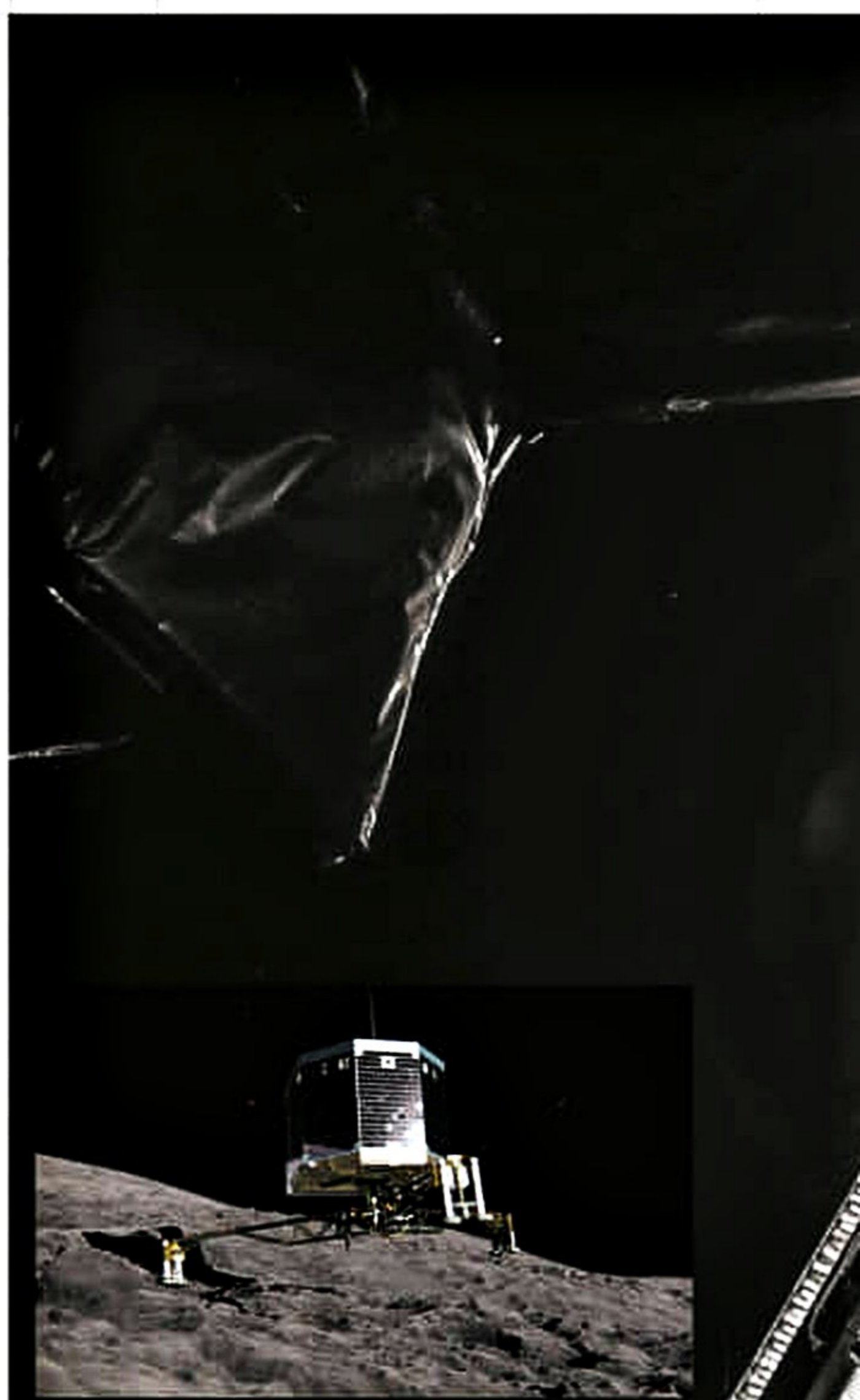
SVHS: Au milieu du Pacifique, il existe même une sorte de "cimetière" des objets spatiaux où gisent plusieurs centaines d'engins. Comment gérer cela sur le plan éthique ?

J. A. : Ce point Nemo fascine beaucoup d'entre nous. L'idée que viennent y tomber les restes de nos plus gros satellites, de leurs pièces qui n'ont pas été incinérées lors du retour dans l'atmosphère est assez surprenante. Mais il est indispensable d'éviter, autant que possible, que de tels "résidus" menacent des zones habitées. Et, très honnêtement, cette pollution paraît très réduite, en comparaison de ces immenses concentrations de plastique qui mettent en danger les êtres qui vivent dans l'océan. Soyons honnêtes dans notre approche quand nous dénonçons les manières dont nous polluons notre planète, et essayons de les réduire toutes !

SVHS: Le Comité pour la recherche spatiale (Cospar), créé en 1958, a élaboré des procédures pour circonscrire ces pollutions...

J. A. : Voilà effectivement un bel exemple de démarche éthique qui associe penser et agir, à un niveau international. Le Cospar s'inquiète depuis longtemps des risques de pollution des sites extraterrestres par des engins ou des humains venus de la Terre,

“ Nous devons nous demander pour quelles raisons nous avons entrepris d'explorer l'espace, de l'utiliser, et pour quelles raisons nous allons continuer à le faire ”



En 2014, la sonde Rosetta larguait, sur la comète Tchouri, Philae, un atterrisseur conçu pour analyser sa composition. L'Agence spatiale européenne, à l'origine de la mission, n'en est pas pour autant propriétaire, l'espace étant régi par le principe de non-appropriation.

comme d'ailleurs des risques de pollution de la Terre lors de retours d'échantillons extraterrestres. Souvenez-vous de la mise en quarantaine des premiers astronautes à avoir marché sur la Lune. Le Cospar a donc établi des règles de protection qui tiennent compte du caractère "invasif" des missions et de la sensibilité du milieu extraterrestre : les conditions de Mars sont plus favorables aux formes biologiques que celles de Mercure ; les précautions vis-à-vis de la première sont donc plus grandes. Ces règles sont une initiative essentielle de la part de la communauté scientifique. Elles devront être associées à une



réflexion sur les raisons mêmes d'explorer et sur les risques que nous sommes prêts à courir pour découvrir des mondes inconnus.

SVHS: *Comment appréhender l'éventuelle appropriation des ressources spatiales, par les entreprises privées notamment ?*

J. A. : Même si l'image du "prospecteur de l'espace" est aussi ancienne que le début de l'aventure spatiale, l'idée d'exploiter les ressources spatiales a pris une certaine consistance avec l'apparition du New Space. C'est une question importante, car le droit spatial est fondé sur le principe de non-appropriation et

le statut de patrimoine commun de l'humanité conféré aux corps célestes. Certains défendent ce principe coûte que coûte ; d'autres estiment qu'il est temps de l'abandonner. Il convient de trouver une voie raisonnable entre ces deux extrémités, par exemple celle de la concession, qui permette à chacun de trouver son intérêt. Des juristes y travaillent.

SVHS: *Que faire si une société s'approprie du minerai sur un corps céleste ?*

J. A. : Les instances internationales et la communauté des juristes de l'espace commencent

à réfléchir à une telle situation. Cela ne pourrait évidemment pas se faire discrètement. Et n'aurait rien à voir avec un geste comme celui de planter un drapeau à la surface d'un corps céleste. Il y aurait donc forcément des réactions. Pour être honnête, je suis plus inquiet à l'idée qu'un tel acte puisse être commis à l'égard de l'Antarctique, s'il y avait un intérêt à le faire. L'Antarctique est unique, les corps célestes sont innombrables.

SVHS: *Quel droit avons-nous d'explorer l'Univers et de l'exploiter ?*

J. A. : J'aime bien votre expression "le droit d'explorer". Je pense aussi qu'il s'agit d'un devoir ! Car j'aime dire que nous explorons comme nous respirons. Nous avons besoin, individuellement et collectivement, d'expirer, autrement dit de sortir de nous-mêmes pour nous frotter à l'inconnu, pour découvrir la nouveauté, et d'inspirer, autrement dit d'ingérer, de faire nôtre le monde qui nous entoure. Un humain qui n'est plus explorateur, qui ne rêve pas de traverser la frontière, perd une grande part de son humanité. Il y a dans notre condition humaine cette propension à l'exploration. Et l'espace est une des manières de l'alimenter, de l'honorer. Explorer est à la fois un droit et un devoir... mais nous ne pouvons l'entreprendre qu'avec raison et discrétion. Et il en est de même de l'exploitation.

SVHS: *Et... que fera-t-on, le jour où l'on va découvrir de la vie sur une autre planète ?*

J. A. : Évidemment, tout dépend de ce que nous découvrirons... Entre des fossiles de bactéries sur Mars et une rencontre

La colonisation de Mars pose des limites techniques, mais aussi éthiques, à commencer par la possible destruction de formes de vie encore inconnues.



© GETTY

du troisième type, il y a de la marge ! Nous pourrions en rester à la perspective scientifique si ces "E.T." sont loin de nous ; mais nous pourrions avoir des réactions moins pacifiques dans d'autres situations... Le monde des idées est préparé depuis longtemps à une telle découverte, il se pose la question depuis des siècles – les auteurs de science-fiction, par exemple, ont déjà bien creusé la question et envisagé de nombreuses hypothèses. En revanche, le monde politique ne s'y est pas préparé : rares sont les occasions d'en parler.

SVHS: Quelles limites doivent être posées à la perspective de la colonisation spatiale, et en particulier de Mars ?

J. A. : La démarche éthique ne donne pas d'emblée une réponse à cette question ; en revanche, elle exige que nous nous interroguions sérieusement sur les raisons pour lesquelles nous pourrions entreprendre de coloniser une planète

comme Mars. Une telle décision, qu'elle soit prise par des États ou des entreprises privées, aurait d'importantes conséquences en termes scientifiques, techniques, économiques, sociaux. Nous devrions les déterminer, les évaluer et essayer de prendre la décision la plus raisonnable. Cela n'aurait rien d'évident, car ces conséquences dépasseraient sans doute nos repères habituels.

SVHS: Et quid de la militarisation ?

J. A. : C'est là un sujet immense. Je me contenterai de rappeler deux choses : d'une part, l'espace est né de la guerre et les militaires ont toujours eu recours aux techniques spatiales, en tout premier lieu pour éviter une guerre nucléaire. D'autre part, la définition d'une arme est bien trop vague pour que nous nous inquiétions brutalement d'apprendre que nous devons défendre nos satellites en orbite : un boulon abandonné dans l'espace, un laser pointé vers le ciel

peuvent mettre hors d'état un satellite en orbite. Autant dire que nous devons faire preuve de prudence à ce sujet.

SVHS: Est-il raisonnable d'engager autant de moyens dans l'exploration de l'espace ?

J. A. : Explorer et même exploiter l'espace sont des activités proprement humaines dans lesquelles nous engageons, d'une certaine manière, notre survie, mais aussi notre développement comme espèce humaine. Et, pour le faire, nous devons engager non seulement notre raison, mais aussi notre curiosité, notre imagination et tout ce qui fait de nous des êtres humains. Des êtres humains en devenir... ■



Le Voyage dans l'espace – Petites extrapolations sans gravité sur le cosmos et l'humanité, de Jacques Arnould, éd. Transboréal, 2021, 96 p., 8€.

CHIMIE
SCIENCES
ROBOTIQUE

PHYSIQUE

SCIENCE & VIE

DES ATELIERS SCIENTIFIQUES

À DOMICILE POUR VOS ENFANTS !

Les titres jeunesse de *Science & Vie* vous proposent des ateliers exclusifs réalisés par les Savants Fous, les spécialistes des animations scientifiques. Ces ateliers ont été spécialement conçus pour nos jeunes lecteurs.

DES ATELIERS
POUR LES 3-6 ANS



DES ATELIERS
POUR LES 6-12 ANS



DES ATELIERS
POUR LES 11-15 ANS



INFORMATIONS ET RÉSERVATION AU

01 85 09 78 00

(en précisant Science & Vie) ou sur

LESSAVANTSFOUS.FR/SCIENCE-ET-VIE



Crédits photos : © Les Savants Fous, © Shutterstock. Visuels non contractuels.

INTERROGER

110 Questions Réponses

114 On en parlait déjà

118 Et ça, l'avez-vous lu ?

120 Space culture





Questions Réponses

Pourquoi Pluton n'est plus une planète ?

C'est en effet le cas depuis 2006, année au cours de laquelle l'Union astronomique internationale (IAU) a revu la définition d'une planète selon 3 critères: c'est "un corps céleste qui est en orbite autour du Soleil, possède une masse suffisante pour que sa gravité l'emporte sur les forces de cohésion du corps solide et le maintienne en équilibre hydrostatique sous une forme presque sphérique, et [qui] a éliminé tout corps susceptible de se déplacer au voisinage de son orbite". Or, si Pluton est bien en orbite autour du Soleil et possède une forme sphérique, d'autres corps célestes sont présents autour de son orbite. Dès lors, si elle n'est plus considérée comme une planète, qu'est-elle? L'IAU l'a définie comme une planète naine, soit un corps céleste qui partage les deux premières caractéristiques des planètes citées plus haut, mais qui n'a pas une masse suffisante pour dégager le voisinage de son orbite et qui n'est pas un satellite. Un statut qui ne fait toujours pas l'unanimité au sein de la communauté scientifique. A. S.

Spationaute, cosmonaute ou astronaute ?

Quelle différence entre ces termes? Le pays! Ainsi, les Européens se sont accordés sur la notion de voyageurs (*naute*) spatiaux, d'où "spationautes", tandis que les Américains de la Nasa, qui filent vers les étoiles (*astra*), sont des astronautes. Les Russes voguent dans l'univers (*cosmos*) et sont des cosmonautes. Mais cela ne s'arrête pas là: les Chinois sont des taïkonautes (*taikōng* désigne l'espace) et les Indiens vont dans le ciel (*vyoman*) en tant que vyomanautes! Plus que de leur nationalité, l'appellation dépend surtout du pays d'envoi des voyageurs. Ainsi le Français Jean-Pierre Haigneré se considère-t-il cosmonaute, pour être parti avec les Russes à bord de la station Mir. A. D.

Pourquoi les fusées ne s'envolent-elles pas verticalement ?

Vous l'avez peut-être remarqué, mais alors que les fusées sont droites au décollage, elles s'inclinent assez vite en montant. Pourquoi ne pas juste filer droit? Car l'objectif est justement de retomber! L'idée d'une mise en orbite est d'acquérir suffisamment de vitesse pour que la trajectoire de descente soit orbitale. C'est-à-dire, tomber en permanence autour de la Terre! C'est ce que l'on appelle la rotation gravitationnelle, ou *gravity turn* pour les anglophones. Pour cela, l'idéal est de se lancer à l'équateur, où l'on peut s'aider de la rotation de la planète et ainsi économiser du carburant. A. D.



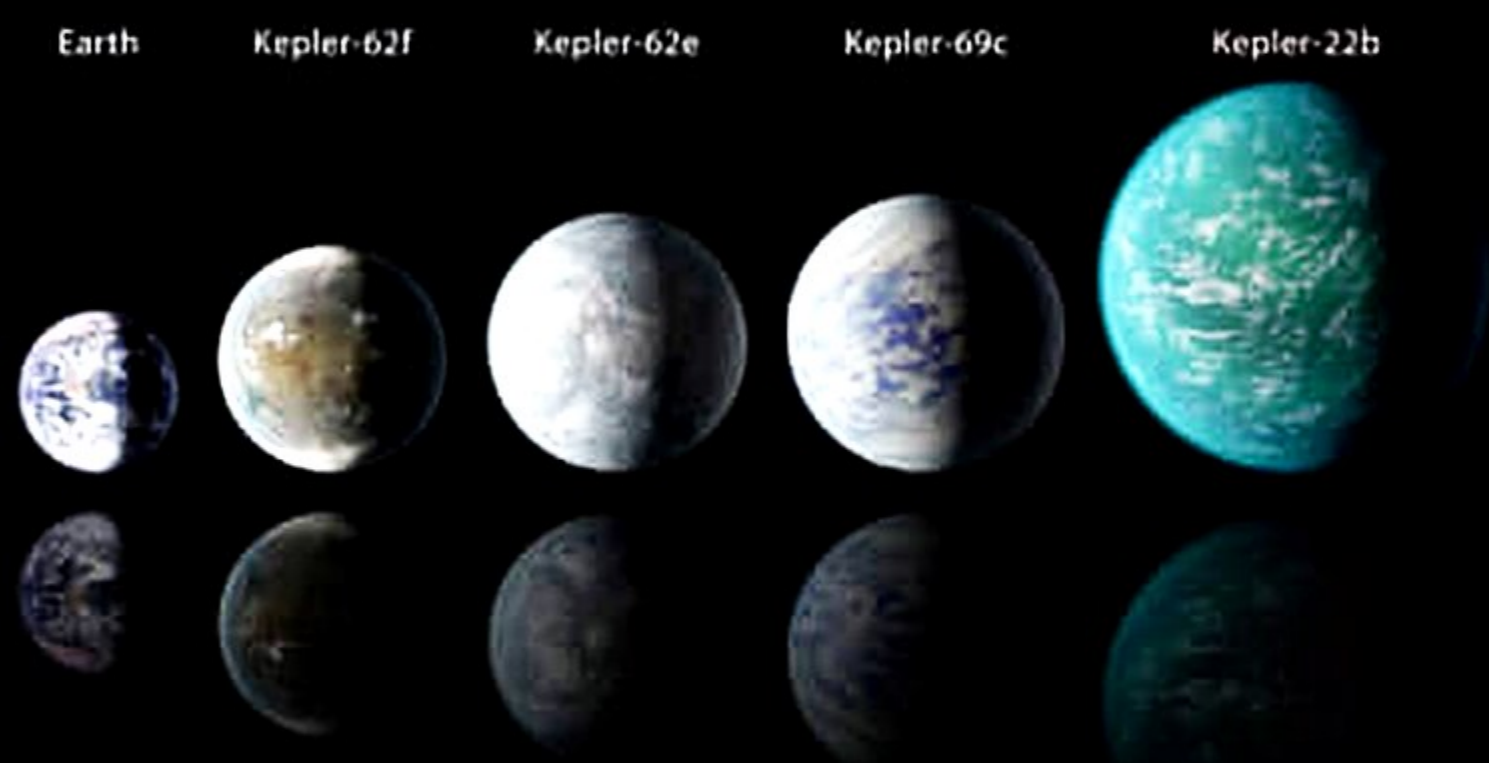


Apesanteur ou impesanteur ?

Ces deux termes peuvent être utilisés pour signifier l'absence de sensation de poids (ce qui ne veut pas dire que le poids n'existe pas). Toutefois, on peut noter une différence. "Apesanteur" désignerait l'absence absolue de pesanteur, concept théorique où la gravité serait inexistante. "Impesanteur" indiquerait plutôt l'absence apparente de pesanteur : la gravité, bien qu'elle existe toujours, n'est pas ressentie. Les scientifiques préfèrent quant à eux parler de "micropesanteur" ou "microgravité". Ces termes expriment le fait que, dans un avion en vol parabolique ou dans une station spatiale en orbite, il existe encore une infime pesanteur résiduelle, car des forces autres que le poids continuent de s'appliquer sur les corps. M. R.

Existe-t-il des planètes potentiellement habitables ?

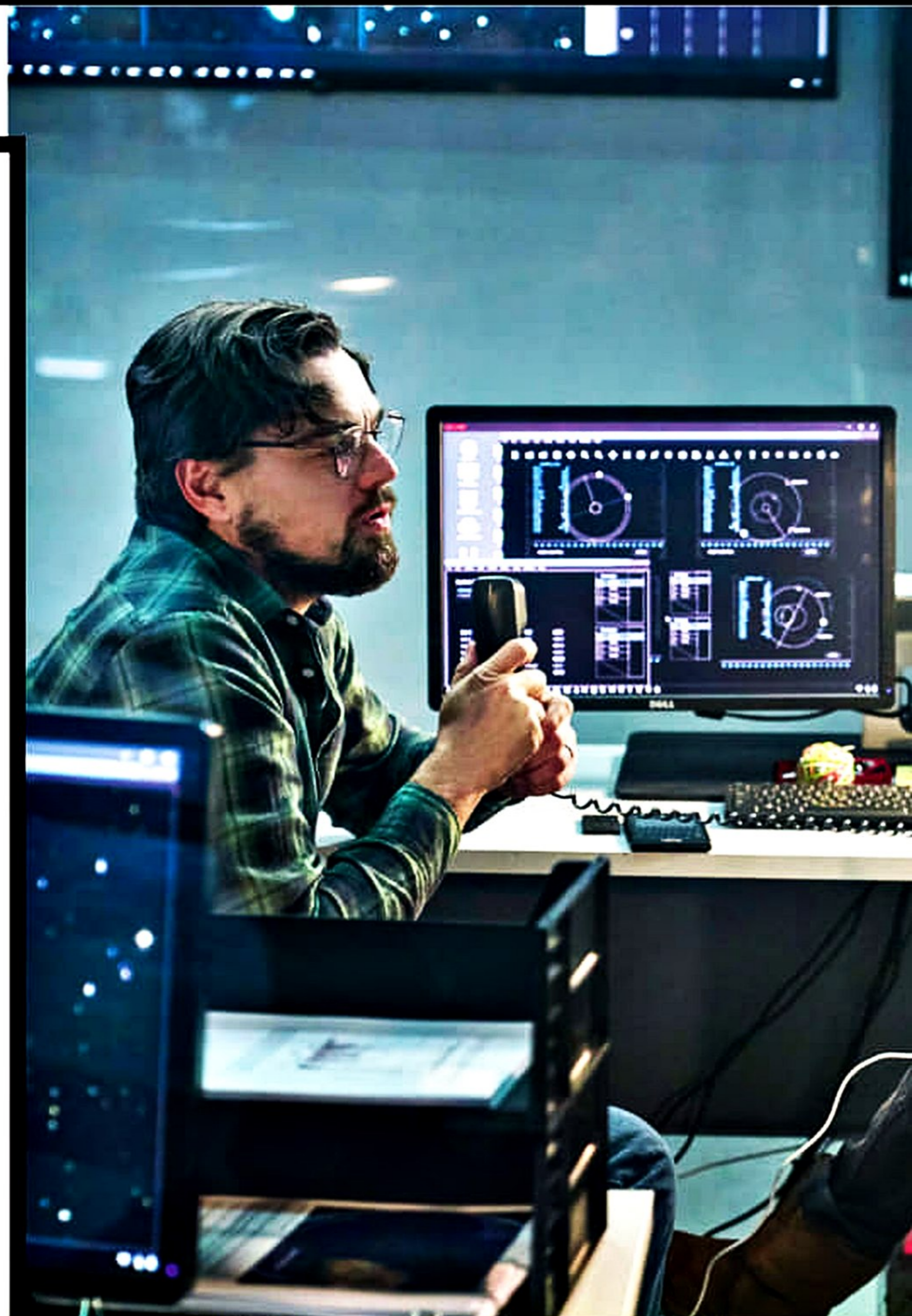
La réponse est oui. Et il existe même une base de données en ligne (en anglais) qui les référence : The Planetary Habitability Laboratory (Bit.ly/3mRCYN4). Ce laboratoire de recherche collaboratif et virtuel, dirigé par Abel Méndez, professeur en astrobiologie planétaire à l'université de Porto Rico, cartographie l'univers habitable. Grâce aux données partagées par la Nasa et à l'Indice de similarité avec la Terre (ESI), qui compare les propriétés d'une planète donnée et celles de la nôtre (le résultat obtenu est compris entre 0 pour "aucune similarité" et 1 pour "identique à la Terre"), le site dresse la liste des exoplanètes



potentiellement habitables découvertes par les télescopes spatiaux et terrestres au cours de ces dernières décennies. Au moment où nous écrivons ces lignes, elles seraient ainsi au nombre de 59. Parmi elles, 21 auraient une composition rocheuse et pourraient maintenir de l'eau liquide en surface ; les 38 autres "pourraient être des mondes océaniques ou des mini-Neptunes", précise le site. A. S.

Que nous apprennent les cratères?

En fonction de la taille et de la forme du cratère, on peut estimer les dimensions et parfois l'angle d'arrivée de l'objet ayant percuté le sol. Plus un objet est gros, plus il sera pulvérisé par la force de l'impact et les retombées peuvent être planétaires, comme dans le cas de Chicxulub, au Mexique: *"Les poussières sont venues se déposer et on en trouve les traces – comme à Bidart, à côté de Biarritz – entre les couches Crétacé et Paléogène, formées il y a environ 66 millions d'années, explique Ludovic Ferrière, expert en cratères d'impact et conservateur, au Muséum d'histoire naturelle de Vienne, de la plus importante collection de météorites au monde. La géochimie permet de trouver des traces d'astéroïdes incorporées à la roche, caractérisées par des anomalies chimiques: présence d'iridium et d'autres éléments rares à la surface de la Terre."* Le géologue explique que les astéroïdes peuvent être étudiés sur Terre, quand ils deviennent météores en entrant dans l'atmosphère puis comme météorites quand ils arrivent au sol. Pour cela, *"des réseaux de caméras filment le ciel, comme le réseau Fripon permettant de détecter les météores, de calculer leur orbite et d'en savoir plus sur leur origine. Il est très important de pouvoir très vite récupérer des morceaux afin qu'ils ne subissent pas trop de modifications en conditions terrestres. On a ainsi pu observer un très beau météore en Autriche, le 19 juillet 2020, traversant le ciel pendant 24 secondes! Un morceau a été trouvé en juillet 2021 grâce à la participation de citoyens amateurs."* P.-E. L.-G.





Peut-on se défendre contre un impact majeur d'astéroïdes ?

Depuis 2009, les plus grands experts se réunissent tous les deux ans lors de la Conférence de défense planétaire pour une simulation d'approche d'un astéroïde. En temps réel, on leur annonce l'identification d'un géocroiseur, le but étant de déterminer sa trajectoire, sa taille, le lieu possible d'impact et la conduite à tenir. Pour Patrick Michel, directeur de recherche au CNRS au laboratoire de la Côte d'Azur, *"le problème, comme avec la pandémie que nous traversons, c'est d'avoir un discours scientifique et cohérent, de fixer des seuils de déclenchement d'alerte et de savoir quelle conduite tenir"*. Les objets supérieurs à 140 m sont spécialement surveillés, notamment par le système Sentry-II de la Nasa. Le projet DART a ainsi pour objectif de tester un protocole de déviation d'astéroïde d'un diamètre de 160 m (Dimorphos, lune de Didymos) en envoyant une sonde le percuter, pendant qu'un petit satellite CubeSat (LICIACube) filmera pendant 100 secondes après l'impact. Patrick Michel, responsable scientifique de la mission Hera, précise que *"l'Esa enverra une sonde en 2024 pour mesurer pendant six mois les conséquences que le choc aura eues sur l'astéroïde. Grâce à DART et Hera, nous aurons ainsi une expérience d'impact entièrement documentée, ce qui nous permettra de valider nos modélisations ou de les réviser pour les rendre plus fiables."* P.-E. L.-G.

Quels sont les principaux cratères d'impact sur Terre ?

Ludovic Ferrière, expert des cratères d'impact, tient la liste à jour : 200 cratères ont été découverts – notamment par l'observation satellite – et confirmés ensuite sur le terrain. Cratères, ou plutôt astroblèmes, car *"tous ne sont pas – ou plus – de 'vrais' cratères, l'érosion ayant en partie effacé les traces"*. Pour confirmer leur origine d'impact, il faut identifier la principale preuve : la présence de minéraux choqués, en particulier des grains de quartz. Le géologue explique que *"leur formation n'est possible qu'à de très fortes*

pressions. Ce quartz choqué présente, à l'échelle microscopique, des stries parallèles dites déformations planaires." Les trois plus gros connus sont celui de Vredefort, en Afrique du Sud, d'un diamètre de 300 km et vieux d'environ 2 milliards d'années ; quasiment du même âge, celui de Sudbury, au Canada, avec un diamètre de 250 km ; puis le plus connu du public, Chicxulub au Mexique, de 180 km de diamètre, datant de 66 millions d'années et ayant causé l'extinction des dinosaures. Pour

ce passionné, découvreur notamment du cratère de Luizi, en République démocratique du Congo, l'étude de ces cratères permet de faire de la planétologie à peu de frais... Dans cette optique, il cite le projet de science participative Vigie-cratère, une plateforme internet fournissant des images topographiques pour identifier de possibles structures d'impact, invitant à vérifier sur place s'il y a des cônes de percussion – structure rocheuse se formant lors d'impact –, par exemple. P.-E. L.-G.

On en parlait déjà

Jusqu'aux confins du cosmos, *Science & Vie* a suivi les grandes découvertes et avancées de la conquête spatiale.



1914

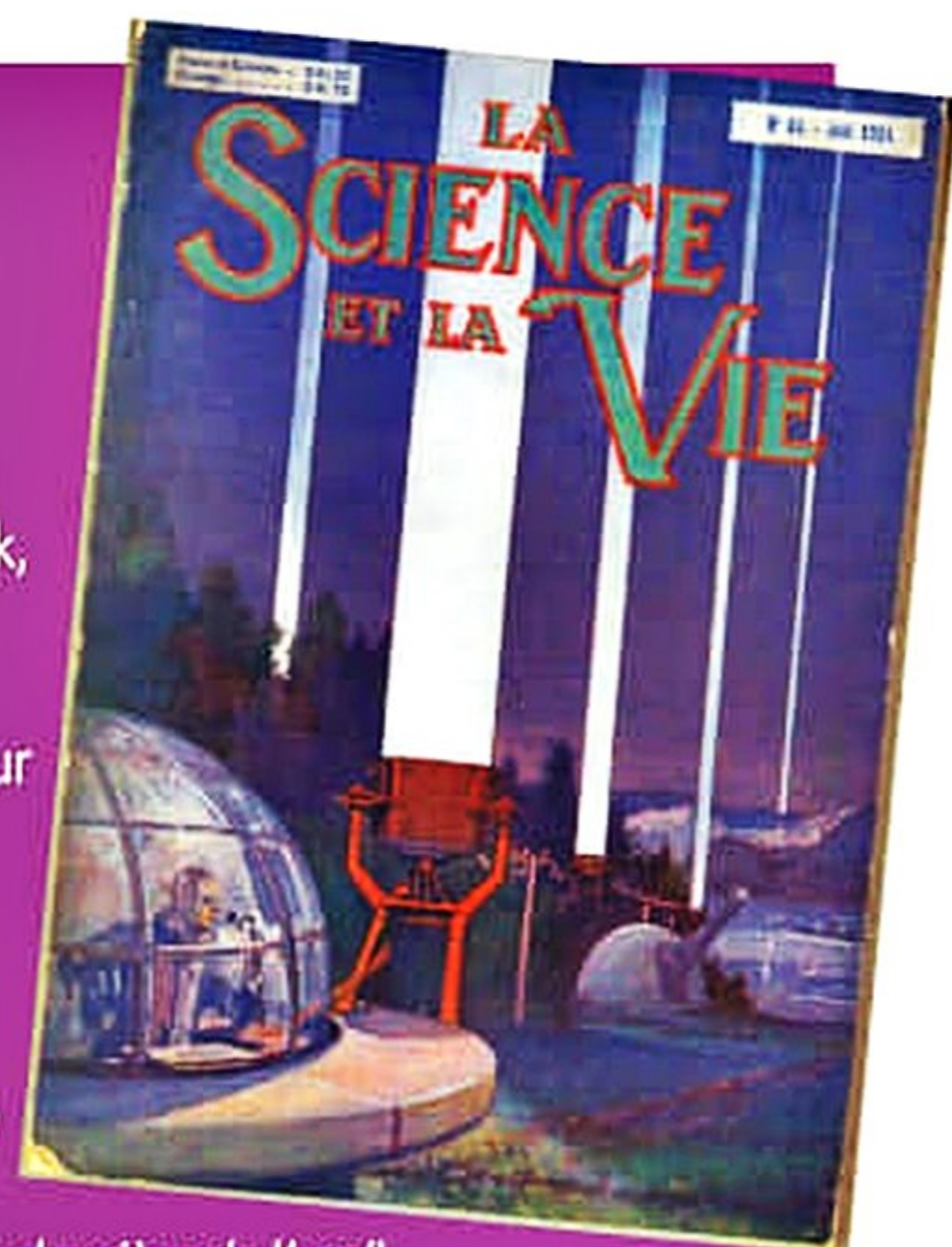
La Lune n'est pas un astre mort

Camille Flammarion, président et fondateur de la Société astronomique de France, prend la plume pour défendre le caractère vivant de la Lune, qualifiée à l'époque de "morne désert". Pourtant, des variations à sa surface ont été observées. Pour lui, elles "indiquent la présence d'éléments mobiles, eau, air, liquide, gaz, atmosphère, quelle que soit leur composition chimique". Et il affirme: "ces teintes foncées ne seraient-elles que de la glace fondue, ce serait déjà quelque chose".

1924

Communiquer avec Mars

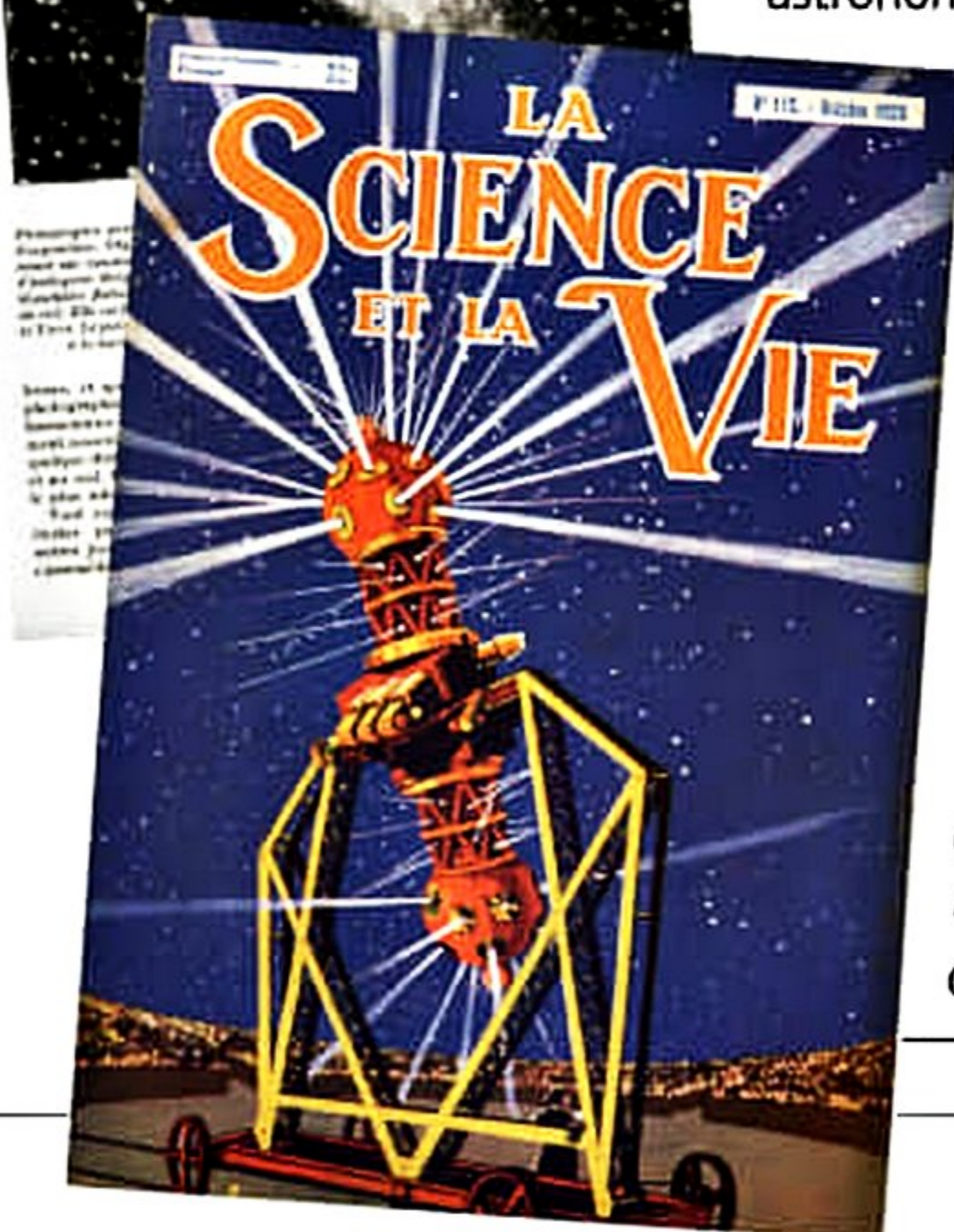
Terre, téléphone, Mars. M.H. Gernsback, membre de la société américaine de physique, expliquait comment utiliser une cellule photoélectrique pour communiquer avec d'hypothétiques Martiens. Il suffit de moduler "à l'aide d'un microphone, le courant circulant dans un puissant arc voltaïque à électrodes de charbon. De cette façon la voix ou la musique serait d'abord amplifiée et ensuite impressionnée par la lumière de l'arc". Reste à faire tout ceci de nuit pour que l'observateur martien réceptionne ce message sur un audioamplificateur. Allô ?



1926

Un million d'univers autonomes

Gabrielle Renaudot Flammarion, astronome et directrice de l'Observatoire de Juvisy-sur-Orge, nous invite à un voyage aux confins de l'univers à la vitesse de la lumière. Nous voici au-delà du million d'années à la rencontre d'une multitude de nébuleuses spirales qu'il convient de regarder "comme autant de voies lactées" où se logeraient "2 quadrillions de soleils". Et de se demander: "Et combien de satellites, de planètes, combien de manifestations vivantes autour de ces innombrables foyers?"





SCIENCE & VIE

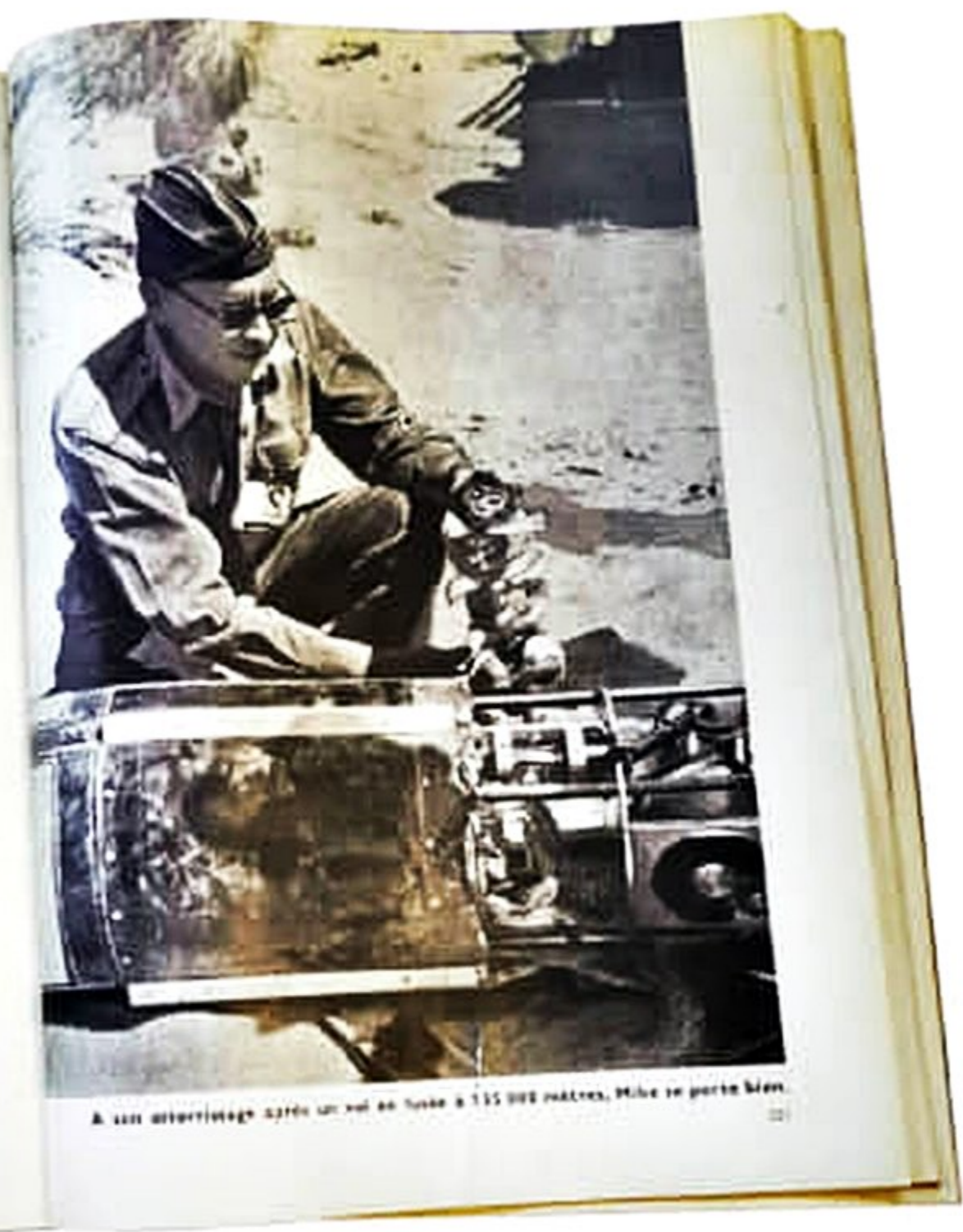
LES ANIMAUX DANS L'ESPACE

L'homme à 10.000 km/h
Voiture sport française ?
Conception : 2 grandes découvertes U.S.

SCIENCE & VIE

LES ANIMAUX DANS L'ESPACE

SCIENCE & VIE



À leur décollage après un vol en fusée à 135 000 mètres, Mike se porte bien.

1958

“Comme dans l'arche de Noé, entrera le dernier, l'homme”

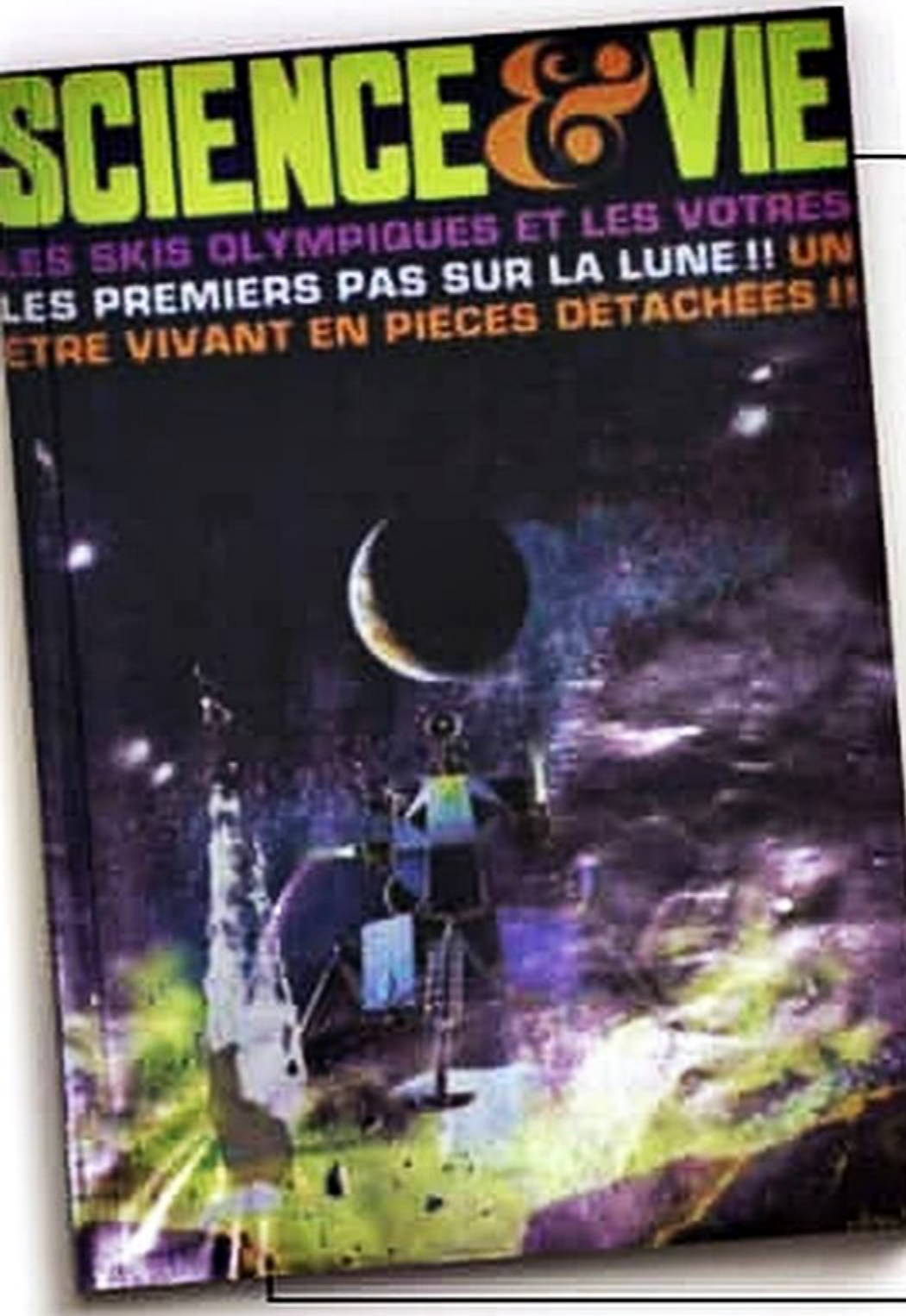
Savoir “si la barrière cosmique se laissera traverser par l'homme”, c'est la tâche des animaux et insectes des premiers vols spatiaux: mouches, moustiques, abeilles, bombyx, souris, rats, chiens, singes... comme les macaques des Philippines, Pat et Max, revenus d'un vol en fusée à 135 000 mètres. Ces singes sont “assez proches de l'homme pour le renseigner sur les effets psychiques de l'isolement et de la clausturation dans les futurs astronefs”. Car après entraînement, les plus calmes seront projetés dans l'espace. “Mais comme Laika, les premiers animaux du cosmos ne reviendront pas.”



1976

Détection de la vie sur Mars

Carl Sagan, professeur d'astronomie et de sciences spatiales, a travaillé pendant plus de dix ans sur la première mission martienne américaine, baptisée Viking. Il détaille dans ce long article, les objectifs de cette “exploration d'envergure de la surface d'une autre planète”. Outre la prise de photo, l'analyse de son atmosphère, la collecte et l'étude d'échantillons de sol martien, tous les espoirs portent sur les “expériences biologiques”. En clair, “la détection de la vie sur Mars” en analysant “les produits du métabolisme des organismes” présents sur le sol. Ou pas.



1968

Ce curieux insecte

Dix-huit mois avant le premier pas sur la Lune de Neil Armstrong, la Nasa simulait les opérations qui seraient effectuées dans le module de commande, le “CM”; et le module lunaire, avec la mission Apollo 5. Parmi les tests: la maîtrise d'un hypothétique incendie. Car, un an auparavant, ce type de sinistre était survenu dans le CM et avait coûté la vie à trois astronautes américains.



1989

Voir le passé le plus lointain

Elle s'appelle 4C41.17. Il s'agit de la plus lointaine galaxie jamais observée à $z = 3,8$. Ce "z" mesurant "l'ampleur du décalage vers le rouge" des raies spectrales du rayonnement de la galaxie due à l'effet Doppler, soit "la modification apparente de la fréquence d'un signal". Ce "z" mesure donc la vitesse de fuite, soit "la distance par rapport à l'observateur, puisque la vitesse croît avec l'éloignement". Pour nous parvenir, sa lumière a donc voyagé pendant 15 milliards d'années!



1994

Explorer la surface sélène

Vingt-cinq ans après l'exploit de la mission Apollo 11, l'Agence spatiale européenne annonce le retour sur la Lune. L'objectif est de s'y installer selon un programme en trois phases dont la dernière verrait la création d'une base pour l'installation humaine: "l'extraction de l'oxygène de régolite conditionnera l'implantation ultérieure d'une colonie". Un projet qui évoquait, à l'époque, l'horizon 2030. On y est presque!





2013

Chercheurs d'or spatiaux

Les "Space cow-boys" lorgnent les richesses extraterrestres et notamment sur l'"He-eldorado lunaire". Car notre satellite disposerait de 1 million de tonnes d'hélium 3, qui permettrait la fusion nucléaire dans des réacteurs prototypes pour une nouvelle source d'énergie. Mais il y a aussi les "pépites volantes" que sont les astéroïdes: platine, or, cobalt, olivine, spinelle... sont autant de métaux précieux qui s'y trouveraient. Pour contrôler les convoitises, l'article évoque la "création d'une instance régulatrice, à l'image de l'Autorité internationale des fonds marins".

2017

Un vieillissement accéléré

Les scientifiques avertissent: la traversée spatiale vers Mars ne sera pas sans conséquence. À l'arrivée: "Incapacité à se tenir debout, risques de fractures et de syncopes, déficience visuelle, perturbations du système nerveux..." Rien que dans l'ISS, on observe comment l'ensemble des masses liquidiennes du corps se répartissent différemment, entraînant "hyperpression intracrânienne et hypopression au niveau des membres inférieurs". Sans oublier une perte osseuse de plus de 20% en six mois, l'épaississement des parois des artères carotides et fémorales et un dérèglement métabolique.



2020

La première molécule du cosmos

13 juillet 2019: une équipe d'astrophysiciens allemands et américains de l'Institut Max-Planck viennent de dénicher le Graal, caché dans la nébuleuse NGC7027: la molécule HeH+, l'hydrure d'hélium, "la première molécule de l'Univers". Car HeH+ a initié "la formation d'hydrogène moléculaire (H₂), deuxième molécule en date de l'Univers" qui a permis la naissance des premières étoiles, qui elles-mêmes ont fait émerger de nouveaux atomes, puis de nouvelles molécules... jusqu'à la formation de la Terre, il y a 4,5 milliards d'années.



On a trouvé la première molécule de l'Univers

C'est une quête centenaire qui aboutit aujourd'hui. Découverte d'une molécule, une fois évaluer d'atmosphère à l'échelle cosmique. HeH+ De quel façon? la naissance d'un Univers de chimie. Par Jean-François Wyder.

ET ÇA, L'AVEZ-VOUS LU?

Voici quelques questions pour vous donner envie de feuilleter ce numéro une nouvelle fois, de la première à la dernière page.

A/ OBJECTIF MARS

Combien de jours de voyage faudra-t-il pour arriver sur Mars ?

- 1/ 3 jours
- 2/ 210 jours
- 3/ 670 jours

B/ OBJECTIF LUNE

Pour quelle future conquête notre satellite naturel est-il un tremplin opérationnel ?

- 1/ Vénus
- 2/ Mars
- 3/ Jupiter

C/ LANCEURS RÉUTILISABLES

À quel milliardaire doit-on l'avancée technologique des lanceurs réutilisables ?

- 1/ Elon Musk
- 2/ Jeff Bezos
- 3/ Kim Kardashian

D/ OBJECTIF VÉNUS

Pour quelle raison l'exploration de Vénus a-t-elle été relativement délaissée ?

- 1/ Elle est située trop loin de la Terre.
- 2/ Elle n'est plus considérée comme une planète.
- 3/ Son atmosphère est particulièrement hostile.

E/ UN MANUEL DE GÉOPOLITIQUE À CIEL OUVERT

Qu'est-ce qu'une arme cinétique espace-espace ?

- 1/ Un délire de science-fiction.
- 2/ Un arsenal placé en orbite par un milliardaire belliqueux prêt à lutter contre des formes de vie extraterrestres.
- 3/ Un satellite capable de tirer sur un autre satellite.

F/ LÀ-HAUT, ÇA TOURNE!

Quelle nation gagne pour l'instant la course cinématographique dans l'espace ?

- 1/ La Russie avec le film *Le Défi*.
- 2/ Les États-Unis avec le dernier Tom Cruise.
- 3/ La France avec Thomas Pesquet dans un film de Claude Lelouch.

G/ TOURISME: POUR QUELQUES MINUTES D'IMPESANTEUR

Pour aller passer quelques jours à bord de l'ISS, il vous faudra...

- 1/ réserver le voyage auprès de la société AxiomSpace et déboursier 55 millions de dollars.
- 2/ réserver un siège dans une fusée Blue Origin à 35 millions de dollars.
- 3/ faire partie d'une équipe de tournage.

H/ À QUOI SERVENT LES VOLS ZÉRO-G?

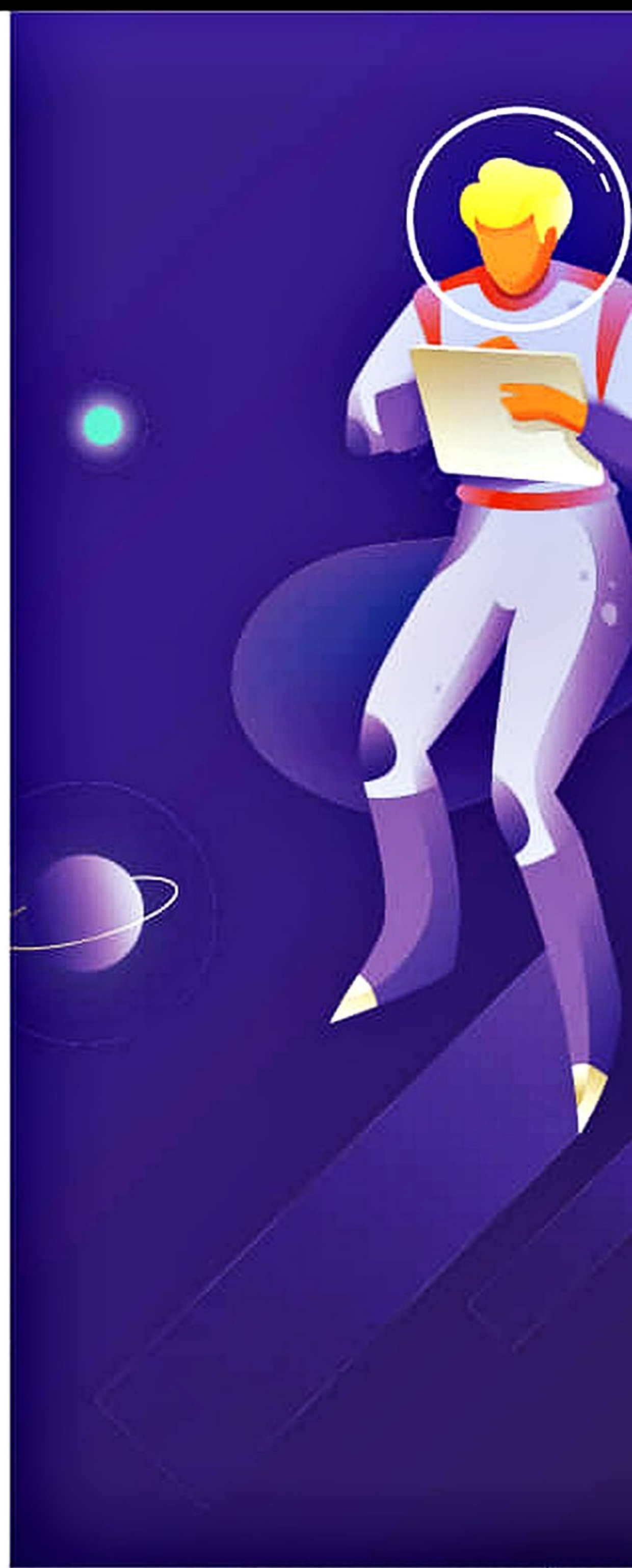
Comment s'appelle la manœuvre qui permet d'expérimenter l'impesanteur à bord de l'avion zéro-G ?

- 1/ L'hyperbole.
- 2/ La parabole.
- 3/ La chute orbitale.

I/ ANIMOSTRONAUTES

Quel est le premier animal à avoir été envoyé dans l'espace ?

- 1/ Un rat nommé Hector.
- 2/ Une chienne nommée Laïka.
- 3/ Une mouche.





© ADOBE STOCK

J/ PRÊTS À TOUT POUR INTERNET?

Qu'appelle-t-on le syndrome de Kessler?

- 1/ Un scénario catastrophe où on assisterait à un emballement des collisions entre les débris gravitant autour de la Terre et créant eux-mêmes davantage de débris.
- 2/ La difficulté pour les États à trouver un consensus pour nettoyer l'espace de ses débris.
- 3/ La peur paralysante que ressent un astronaute sur l'ISS à l'idée d'être touché par un débris lors d'une sortie extravéhiculaire.

K/ GAZ À EFFET DE SERRE, LA TRAQUE DEPUIS L'ESPACE

Quelle sera la mission du satellite Sentinel-7 dont le lancement est prévu en 2026?

- 1/ Détecter les hausses de température significatives (supérieures à 1°C) par région du globe, dues au changement climatique.
- 2/ Mesurer les émissions anthropiques de dioxyde de carbone grâce à un spectromètre.
- 3/ Détecter et identifier les émissions anthropiques de méthane.

L/LA RUÉE VERS LES ASTÉROÏDES

Qu'est-ce que le biomining?

- 1/ Une biotechnologie utilisant les bactéries chimiolithoautotrophes pour transformer les minerais et les rendre plus faciles à extraire.
- 2/ Une technique de forage écoresponsable.
- 3/ Un laboratoire d'étude et d'analyse des minerais présents sur les astéroïdes.

M/ LE TÉLESCOPE SPATIAL DU SIÈCLE PARÉ À SONDER

Que révèlent les lumières dans le proche infrarouge qui seront captées par le télescope spatial James Webb?

- 1/ La formation des premières étoiles et galaxies.
- 2/ Les messages potentiellement envoyés depuis une autre planète habitée.
- 3/ La présence de trous noirs.

SPACE CULTURE

Films, séries, livres, expos... Une myriade de possibilités pour se distraire, apprendre et changer d'univers. PAR COLINE BOUVART

Des séries

En octobre dernier, plus de cinquante ans après la diffusion du premier épisode de *Star Trek*, la fiction devenait réalité : William Shatner, 90 ans, alias le capitaine Kirk, embarquait à bord de la fusée Blue Origin pour un vol de quelques minutes dans l'espace. Jeff Bezos, patron de Blue Origin et grand fan de la série, réalisait alors sûrement un rêve de gosse. Et si le succès des séries de science-fiction spatiale était là, dans cette capacité à inspirer et faire rêver ?

STAR TREK, SÉRIE FONDATRICE

*"On mesure mal en France l'impact qu'a eu la série Star Trek aux États-Unis et dans le monde, car elle n'est arrivée que quinze ans après dans notre pays, remarque le journaliste Romain Nigita, co-auteur de *Serie's Anatomy. Le 8^e Art décrypté* (éd. Fantask, 2017). Mais elle a considérablement marqué la communauté scientifique et suscité des vocations, y compris parmi*

Star Trek



le personnel de la Nasa. Nichelle Nichols fut la première Afro-américaine à tenir un rôle principal dans une série, et le symbole était si puissant que lorsqu'elle songera à la quitter, Martin Luther King lui-même interviendra pour l'en dissuader." Devenue culte, dans les années 1960, *Star Trek* est la première série de SF à être plus réaliste que les autres, à rebours de la saga de films *Star Wars* qui décide de prendre la voie d'une SF fantasy. En plus de cinquante-cinq ans, elle a donné naissance à de nombreuses petites sœurs : *Star Trek Nouvelle génération*, *Deep Space Nine*, *Voyager*, *Enterprise*, *Discovery*, *Picard*... *"Chaque épisode est une nouvelle histoire, et la prospective scientifique permet de contourner la censure et de parler de sujets de société : racisme, guerre du Vietnam, conflit israélo-palestinien... Et les dernières séries dérivées ont adopté*

un format feuilletonnant plus actuel."

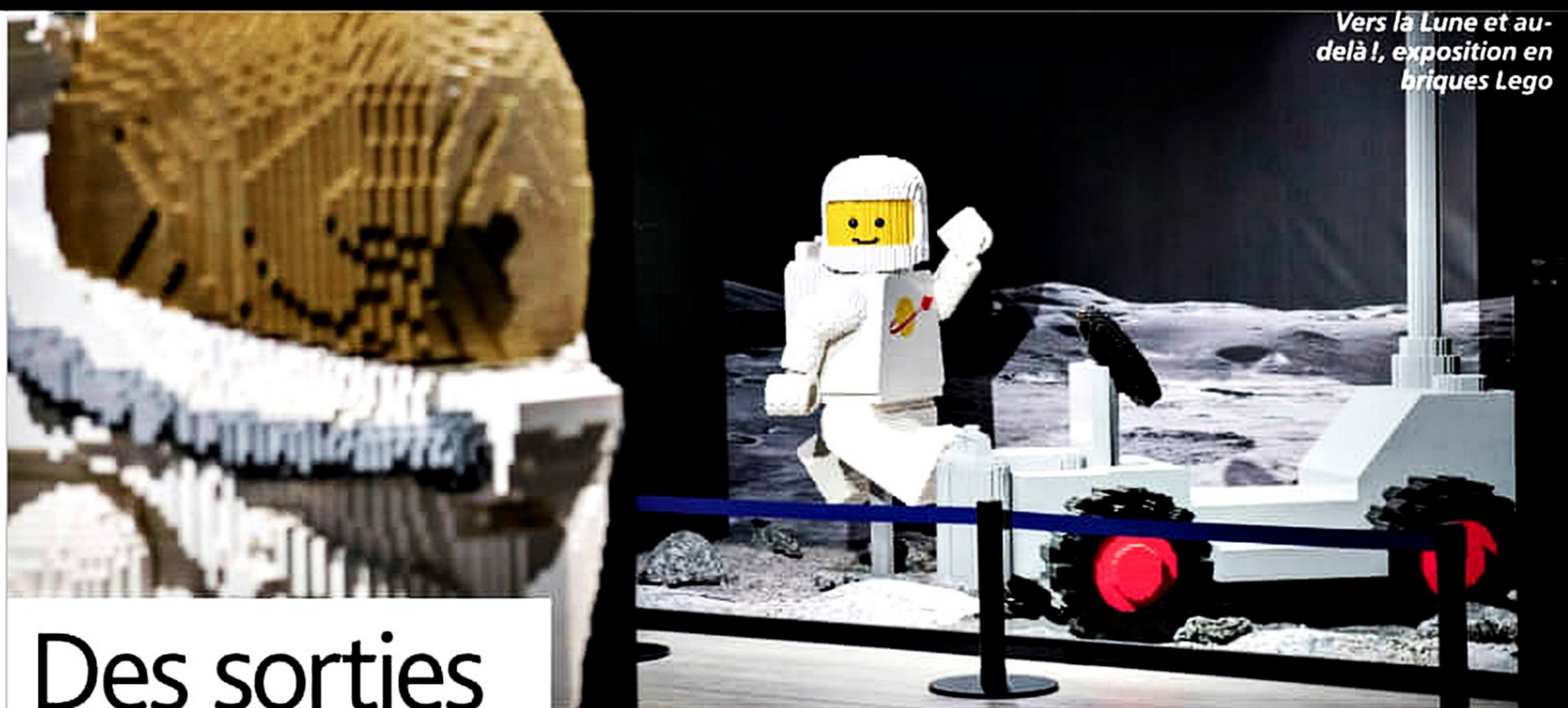
Une autre série, outre-Manche, est devenue culte : *Doctor Who*. Créée en 1963, elle est encore diffusée aujourd'hui. *"Comme pour James Bond, chacun a son Docteur préféré. C'est un extra-terrestre à apparence humaine qui voyage dans l'espace et dans le temps. C'est moins réaliste que Star Trek mais tout aussi*

efficace. Finalement, pour qu'une série marche, il faut qu'elle trouve le bon curseur, entre réalisme scientifique et divertissement."

LES NOUVELLES GALAXIES

Quelles sont les dernières nées des séries et comment renouvellent-elles le genre ? *For All Mankind*, sur Apple TV+, est une uchronie dans laquelle l'URSS a posé le pied sur la Lune avant les États-Unis, et où la course à l'espace se poursuit. *"C'est une série originale, réaliste, en miroir de nos préoccupations actuelles."* La française *Missions*, sur OCS, dépeint le duel entre des milliardaires pour financer une mission sur Mars, puis la mission elle-même : *"Il y a trois saisons pour le moment. C'est de la SF pure, teintée de comédie en première saison. C'est une série très originale, ambitieuse, une vraie petite pépite"*. Autre série française, *Ovni(s)*, sur Canal +, raconte l'histoire de scientifiques chargés d'enquêter sur les ovnis. *"C'est une série comique plutôt pas mal, plus intéressante que Avenue 5 ou Moonbase 8 (deux séries américaines diffusées respectivement sur OCS et Canal+), qui sont sympathiques, mais pas extraordinaires."* *The Expanse*, sur Amazon Prime, renoue avec une veine plus épique, de grande mythologie. *"Ses héros sont des routiers de l'espace, qui conduisent les vaisseaux. C'est une projection de ce que pourrait être l'espace dans 200 ou 300 ans, avec la colonisation d'autres planètes, des interrogations sur l'identité de chacun ou la tentation de la sécession : se sent-on encore Terrien ou plus attaché à la planète où l'on vit ?"* Le genre ne finit pas d'inspirer les créateurs et de faire rêver les spectateurs.

Vers la Lune et au-delà!, exposition en briques Lego



Des sorties

LA CONQUÊTE SPATIALE EN LEGO

Plus de 180 000 briques Lego pour retracer l'histoire de la conquête spatiale: ses étapes clés, sous forme de 28 constructions originales, se dévoilent sous un jour ludique et intergénérationnel. Le parcours suit trois axes: l'histoire aéronautique et spatiale, la conquête lunaire et l'aérospatiale dans la fiction. Le musée propose également des ateliers ouverts à tous pour approfondir et enrichir leur expérience de manière divertissante.

Jusqu'au 29 mai. Musée de l'Air et de l'Espace, aéroport de Paris-Le Bourget, 93352 Le Bourget. Museeairespace.fr

LE TERRAIN MARTIEN

La cité de l'Espace inaugure au printemps 2022 un événement dédié à la Planète rouge dans ses jardins. Ce "Terrain martien", conçu en partenariat avec le Cnes, offrira une reconstitution de l'environnement martien très immersive. Le visiteur pourra également assister aux démonstrations de deux répliques grandeur nature et motorisées des rovers martiens, Perseverance et Zhurong.

À partir du printemps 2022. Cité de l'Espace, avenue Jean Gonord 31506 Toulouse. Cite-espace.com

Et aussi...

- "VAISSEAU TERRE", au planétarium de Vaulx-en-Velin, jusqu'au 2/01/2023.
- "EXPLORE MARS" ET "DE LA TERRE AUX ÉTOILES", à la foire d'Alençon, du 2 au 7/03/2022, puis à la cité des Sciences de Bastia du 15/09/2022 au 15/06/2023.
- "LUNE" ET "DE LA TERRE AUX ÉTOILES", à la foire d'Albi, du 16 au 20/03/2022.
- "SPACE DREAMS", au festival Big Bang Bordeaux, du 18 au 21/05/2022.
- "ASTRONAUTES", à la Rotonde à Saint-Étienne, du 25/09 au 23/12/2022.

Des livres

Safari rouge, t.1: Octopus

de Didier Schmitt, Ava Dobrynine, Olivier Pâques et Thomas Rome, éd. Weyrich, 120 p., 19,50 €.

Écrite par un spécialiste du sujet, en charge de l'exploration humaine et robotique à l'Agence spatiale européenne, cette bande dessinée de fiction scientifique (ou d'anticipation technologique) nous embarque en 2080, direction Mars...

Dernières nouvelles de Mars,

de Francis Rocard, éd. Flammarion, 176 p., 12 €.

Lauréat du prix Roberval Grand Public en novembre dernier, l'astrophysicien

Francis Rocard propose dans cet ouvrage un guide du voyage vers Mars. Il évoque une à une les différentes difficultés qui devront être surmontées et comment elles seront résolues. Ce qui paraît impossible est déjà en préparation, et à travers un exposé détaillé, technique, précis, enrichi d'infographies, l'astrophysicien dévoile les coulisses de ce projet d'humanité, de civilisation. Passionnant, tout en restant très accessible.

À la conquête du cosmos,

60 ans d'aventures spatiales françaises, éd. Flammarion, 96 p., 32 €.

Ce coffret, imaginé et conçu avec le Cnes, propose de découvrir les plus grands moments

de la conquête spatiale française, depuis les premiers lancements de fusées en Algérie, jusqu'à la mission Alpha à bord de la Station spatiale internationale. Outre le livret (incluant une chronologie), vous trouverez 60 photographies emblématiques de cette aventure.

Mars, le mook de l'exploration,

N°1 et 2, collectif, éd. Weyrich, 232 p. et 248 p., 27,90 € et 22 €.

Deux mooks riches et intelligents qui passionneront tout lecteur curieux de l'aventure martienne, et qui n'hésitent pas à bousculer et poser les questions qui peuvent déranger, comme dans le tome II: l'exploration spatiale, mais pour quoi faire ?



Des films

La sélection imparable de **Roland Lehoucq** (ci-contre), astrophysicien au commissariat à l'énergie atomique de Paris-Saclay, coauteur de *L'Humain dans l'espace, entre réel et fiction* (éd. La Martinière), et *La science fait son cinéma* (éd. Le Béal)



LE VOYAGE DANS LA LUNE, GEORGES MÉLIÈS (1902)

"Dans le premier film de science-fiction de l'histoire du cinéma, adaptation du roman de Jules Verne, Georges Méliès livre une fantaisie agrémentée d'effets spéciaux qui raconte l'expédition de six scientifiques sur la Lune et leur retour sur Terre."

FRAU IM MOND, FRITZ LANG (1929)

"Ce film muet est plus qu'impeccable d'un point de vue scientifique. L'anticipation et le réalisme sont stupéfiants, la trajectoire en 8 que l'on voit dans le film est exactement celle que suivront les fusées lunaires. Fritz Lang était conseillé par Hermann Oberth, l'une des quatre grandes figures tutélaires de l'aéronautique mondiale. C'était si précis techniquement que Hitler fit détruire les maquettes du film et interdire sa diffusion, pour préserver le secret militaire. C'est Fritz Lang qui imagine un compte à rebours pour dramatiser le départ de la fusée : son idée sera

reprise en astronautique pour tous les lancements de fusée."

DESTINATION MOON, IRVING PICHEL (1950)

"C'est aussi un film très réaliste : les scènes d'accélération, d'apesanteur où les personnages sont écrasés dans leur siège au décollage... Sa fusée à étages à propulsion atomique inspirera directement Hergé pour ses albums lunaires. La partie voyage dans l'espace est vraiment très réussie."

2001, L'ODYSSÉE DE L'ESPACE, STANLEY KUBRICK, 1968

"C'est un choc visuel, les effets spéciaux sont spectaculaires. Et Kubrick a voulu recréer les choses de manière très scrupuleuse. La station lunaire, la station orbitale, le vaisseau, tout paraît crédible. C'est impeccable d'un point de vue scientifique, même sur les éléments spéculatifs, et c'est aussi un très bon film quasi indépassable."

GRAVITY, ALFONSO CUARÓN (2013)

"Le film se passe dans l'espace. Cuarón a fait un travail remarquable, les décors, les stations sont parfaitement restitués. La caméra subjective rend les choses aussi intéressantes. Le comportement d'une flamme en apesanteur, les effets de collision ou

de déplacement, tout est très exact. Les seuls détails scientifiquement erronés ont été de toute évidence tordus pour des raisons narratives. Sinon, l'héroïne meurt vingt fois !"

INTERSTELLAR, CHRISTOPHER NOLAN (2014)

"Le décollage de la fusée vers le vaisseau qui les emmène vers Saturne est bien restitué, les représentations du trou de ver et du trou noir sont très bien faites sans être parfaites pour des raisons esthétiques assumées par Nolan. Je valide donc scientifiquement la partie vol, celle sur les trous noirs, mais le reste est ensuite un peu ridicule, notamment l'aspect catastrophe climatique qui est très incohérent. Les effets de dilatation de durée sont également parfaitement plausibles, même si c'est extrême."

LE BUZZ

DON'T LOOK UP AU FIRMAMENT

C'est un film événement, doté d'un casting 5 étoiles ! Deux astronomes (Leonardo DiCaprio et Jennifer Lawrence) découvrent qu'une comète inconnue va détruire la Terre dans un peu plus de six mois. Ils tentent d'éveiller les consciences et de prévenir la catastrophe. Une métaphore plutôt réussie de la crise climatique, du déni et de l'inaction auxquels se heurte le monde scientifique. Disponible sur Netflix.

SCIENCE & VIE ET OBJECTIF SCIENCES INTERNATIONAL
PRÉSENTENT

ENTRÉE
GRATUITE

terra
SCIENTIFICA

Salon international
des sciences participatives
et du voyage scientifique

LE SALON DES VOYAGES QUI ONT DU SENS

Vos prochaines vacances se trouvent ici !

Venez en solo, en famille ou entre amis à la rencontre des agences de voyages, associations, parcs naturels et centres de recherche.

Ateliers • Conférences • Expositions

Tout pour réussir un voyage à votre image.



Les 25, 26 & 27
mars 2022

1^{ERE} ÉDITION

ENTRÉE GRATUITE

à la Cité des sciences
et de l'industrie, Paris



WWW.TERRA-SCIENTIFICA.COM • INFO@TERRA-SCIENTIFICA.COM
TÉL. : +33 (0)1 85 08 17 40

SCIENCE & VIE

OBJECTIF
SCIENCES
INTERNATIONAL

Avec la
participation
de :

cité

sciences
et industrie



cnes

CENTRE NATIONAL
D'ÉTUDES SPATIALES

**ENSEMBLE,
POURSUIVONS
L'AVENTURE
SPATIALE
DÉBUTÉE IL Y A 60 ANS**



cnes.fr



YouTube

