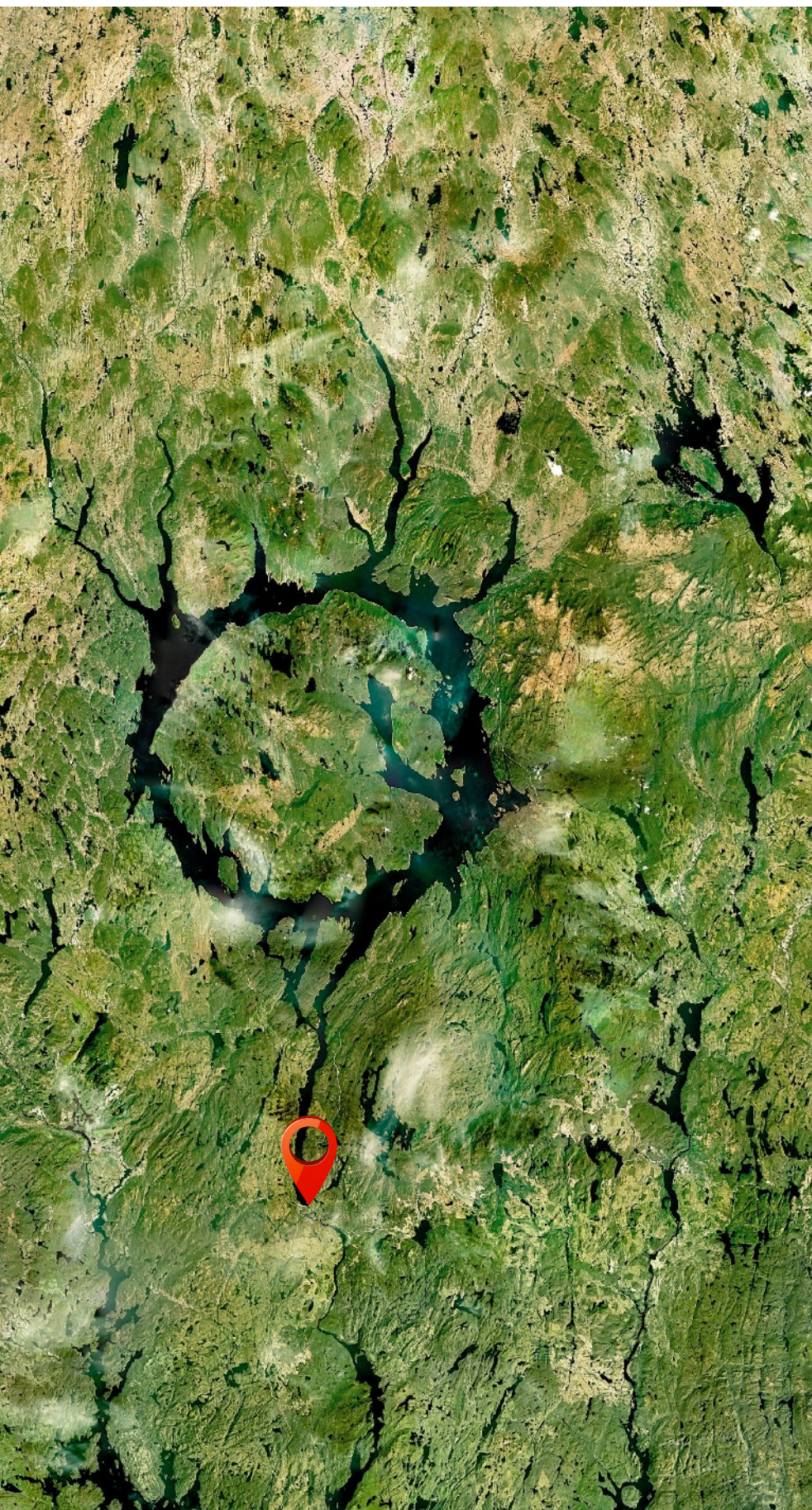




contemporains, comme la formation du cratère de Rochechouart-Chassenon, entre les départements français de la Charente et de la Vienne. Certains spécialistes parlent de *catena*, un alignement d'impacts météoriques consécutifs à la dislocation d'un astéroïde.

On fait difficilement mieux qu'une des six grandes extinctions de masse que la Terre a connues comme remise à zéro de la nature ! Le cratère de Manicouagan, ou plutôt ce qu'il en reste, c'est-à-dire l'astrolème, est aujourd'hui rempli d'eau à la suite de l'édification du barrage Daniel-Johnson. Au centre, le mont Babel, de 952 mètres de hauteur, marque le centre du choc météoritique. Vue du ciel, l'étendue d'eau a une forme circulaire qui lui vaut le surnom d'« Œil du Québec ». Aujourd'hui, toute la région est une réserve où la biodiversité est protégée.

C'est là que Paul Duncombe, accompagné de scientifiques et d'artistes notamment innus (un peuple autochtone de la péninsule du Labrador), s'est installé dans la station Uapishka aux abords du cratère de Manicouagan afin d'enquêter sur les singularités géographiques, géologiques, zoologiques, botaniques, anthropologiques... du terrain, grâce entre autres à la réalisation de scans tridimensionnels de zones remarquables, de prélèvements d'échantillons, de relevés d'empreintes animales. L'idée est d'explorer l'ensemble des mécanismes ayant conduit à la reconquête du site après l'impact (la roche aurait mis de 1600 à 5000 ans pour refroidir complètement) par les végétaux, les insectes et autres espèces vivantes et ce, jusqu'aux premières cultures autochtones et l'engloutissement artificiel des vastes forêts du territoire par les eaux. L'ensemble de l'expédition et de ses conclusions fera l'objet d'installations artistiques présentées au Canada et en France.

Paul Duncombe, qui réfléchit depuis longtemps aux crises écologiques majeures, à commencer par celle que nous traversons, s'est déjà illustré sur le terrain de la reconquête de la nature. De fait, plusieurs de ses œuvres mettent en scène la colonisation de vestiges (une Citroën 2CV, un banc public arraché, un arbre déraciné...) par la faune et la flore. Cette fois, les échelles spatiales et temporelles sont d'un tout autre ordre. ■

Le site internet du projet :
<http://www.projetcoal.org/coal/>



L'auteur a publié :
**Pollock, Turner, Van Gogh,
Vermeer... et la science**
(Belin, 2018)

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

EN ROUTE VERS MARS! MAIS QUELLE ROUTE?

Il s'agit de choisir les trajectoires des sondes spatiales de telle façon que les moteurs-fusées consomment le moins possible de carburant.



Le lancement de plusieurs missions spatiales vers Mars est prévu cette année, entre la mi-juillet et le début d'août. Une fenêtre favorable qui ne se répète que tous les 26 mois.

Tianwen-1, Hope, Mars 2020... Le point commun à tous ces noms? Il s'agit de missions spatiales à destination de Mars dont le lancement est prévu entre la mi-juillet et le début d'août 2020. Une accumulation temporelle qui n'est pas fortuite: ces missions profitent d'une fenêtre de lancement vers la Planète rouge qui ne s'ouvre que tous les 26 mois. Toutes ces sondes spatiales suivront la même trajectoire, *grosso modo* une demi-ellipse. Pourquoi cette fenêtre? Et quelles trajectoires ces engins empruntent-ils? Les lois de la mécanique permettent de répondre.

DU BON USAGE DES MOTEURS À RÉACTION

Comment, dans le Système solaire, modifier une trajectoire régie exclusivement par l'attraction gravitationnelle du

Soleil et des autres planètes? Pour ce faire, il faut exercer une force. Or dans le vide spatial, il n'y a ni sol terrestre sur lequel prendre appui, ni eau sur laquelle flotter, ni air pour se faire porter. Si l'on exclut l'utilisation de la lumière du Soleil comme le font les voiles solaires, la seule possibilité qui reste est le principe de l'action et de la réaction.

Lorsqu'un système physique éjecte une masse vers l'arrière, la conservation de la quantité de mouvement (le produit de la masse par la vitesse) implique que le reste du système est propulsé vers l'avant. En pratique, pour les moteurs-fusées, la force propulsive résultant de cette éjection est le produit du débit de masse par la vitesse d'éjection. Cela a deux conséquences.

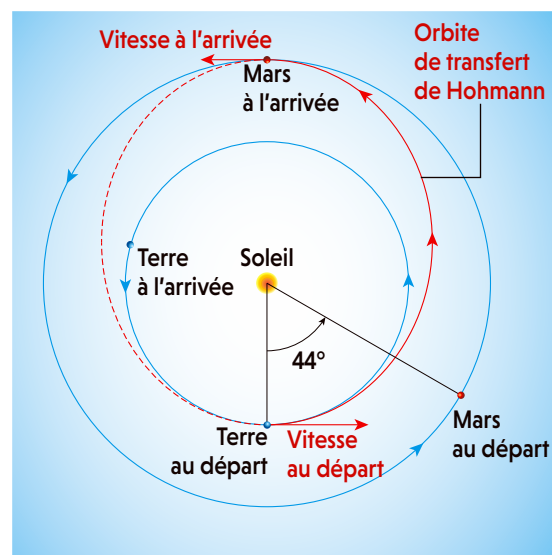
D'une part, cette force ne dépend pas de la vitesse déjà acquise par la fusée; autrement dit, il n'est pas de plus en plus

difficile d'accélérer (contrairement au cas d'une voiture!). D'autre part, les moteurs à combustion chimique utilisés pour les sondes interplanétaires ne peuvent fonctionner en continu, compte tenu des petites quantités de carburant embarquées et des débits massiques requis pour accélérer convenablement. Une fois la sonde spatiale libérée de l'attraction terrestre, à l'échelle de la durée et des distances d'une mission vers Mars, tout se passe comme si le fonctionnement des moteurs se limitait à quelques brefs instants et provoquait une variation de vitesse instantanée. On parle alors d'«incrément» de vitesse de la sonde en un point de sa trajectoire.



L'ORBITE DE TRANSFERT DE HOHMANN

La fenêtre de lancement la plus favorable pour une mission vers Mars se reproduit tous les 26 mois. Dans cette situation ici représentée, les propulseurs de la sonde lui confèrent un incrément de vitesse à son départ depuis la Terre, dans le sens du mouvement. Cela met la sonde sur une partie de trajectoire elliptique, l'« orbite de transfert de Hohmann », jusqu'à rejoindre l'orbite de Mars (assimilée ici à un cercle pour simplifier) au périhélie de l'ellipse. Là, un second incrément de vitesse est donné à la sonde pour qu'elle accompagne la Planète rouge dans son mouvement de révolution.



Comment dans ces conditions aller sur Mars? Pour simplifier, une fois la sonde partie de la Terre, oublions l'attraction de cette dernière ainsi que celle de Mars et des autres planètes, et imaginons que notre engin se trouve sur la même orbite que la Terre. Cela signifie que l'on part d'une trajectoire quasi circulaire autour du Soleil parcourue à la vitesse, respectable, de 29,8 kilomètres par seconde (km/s).

Toute modification de vitesse transformera cette orbite circulaire en une ellipse dont le Soleil est un foyer, seule forme possible de trajectoire pour les objets piégés par le champ de gravitation du Soleil. Comment, dans cette situation, choisir l'incrément de vitesse pour optimiser la trajectoire et utiliser le moins possible de carburant? Autrement dit, dans quelle direction pointer et quel incrément minimal de vitesse fournir?

L'idée qui vient naturellement à l'esprit est de s'éloigner du Soleil, donc de pousser dans la direction opposée à notre étoile. Mauvaise idée! Comme l'illustre l'encadré page 90, la trajectoire qui en résulte est beaucoup plus limitée que lorsque l'incrément de vitesse est fourni dans la direction de la vitesse initiale.

OPTIMISER LA TRAJECTOIRE

On peut le comprendre d'un point de vue énergétique. L'énergie fournie à l'engin spatial par la force de poussée (qui, on l'a vu, est indépendante de son mouvement) est d'autant plus élevée que cette force et la vitesse sont colinéaires. Or, à la fin, pour s'éloigner du « puits » de gravité du Soleil, il faut bien augmenter son énergie mécanique.

En poussant dans le sens du mouvement, on optimise cette augmentation en plaçant la sonde sur une trajectoire

elliptique, le point où est appliqué l'incrément étant le périhélie (le point le plus proche du Soleil) de cette ellipse. L'incrément minimal est alors celui pour lequel l'aphélie (le point de l'ellipse le plus distant du Soleil) est sur l'orbite de Mars. Cela correspond à un supplément de vitesse de 2,9 km/s et la trajectoire suivie, appelée « orbite de transfert de Hohmann » en l'honneur de l'ingénieur allemand Walter Hohmann qui l'a proposée en 1925, est une demi-ellipse (voir l'encadré ci-dessus). Ce type de trajectoire est communément employé avec les satellites artificiels, pour les transférer d'une orbite basse >

Les auteurs ont notamment publié : **En avant la physique!**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



> (à 300 km d'altitude) vers une orbite géostationnaire (à 35800 km).

Suivre cette trajectoire «optimale» a cependant deux conséquences. Sa durée est parfaitement connue en vertu des lois de Kepler régissant le mouvement d'un corps en orbite autour du Soleil: 258 jours. Cela fixe la fenêtre de lancement, car il faut que, 258 jours après le départ de la mission depuis la Terre, Mars soit sur son orbite dans la position diamétralement opposée par rapport au Soleil. Ce n'est possible que si Mars est dans une certaine position par rapport à la Terre au moment du départ, ce qui n'arrive que tous les 26 mois.

Seconde conséquence: à l'arrivée sur l'orbite martienne, la vitesse de la sonde est seulement de 21,5 km/s, insuffisante pour suivre Mars qui se déplace à 24,1 km/s. Un nouvel incrément de 2,6 km/s est donc nécessaire, pour un total à l'aller de 5,5 km/s. Notons qu'il reste tout à fait possible de faire le voyage plus vite et de partir à une autre période, mais cela nécessite alors bien plus de carburant pour une même masse utile.

PROFITER DE LA GRAVITÉ DES PLANÈTES?

On peut établir de la même façon les paramètres du voyage retour: la durée totale atteint 974 jours, très longue pour des cosmonautes! De plus, ce scénario est très idéalisé du point de vue énergétique, car il oublie qu'avant d'être soumis à la seule force gravitationnelle du Soleil, il faut pouvoir quitter le puits de gravité de la Terre et, pour le retour, celui de Mars. Cela nécessite d'atteindre des vitesses considérables, appelées vitesse de libération, respectivement de 11,2 km/s et 5,1 km/s, qui viennent s'ajouter aux incréments précédents.

Cela explique pourquoi il peut être avantageux de choisir un lancement depuis une orbite basse: il faut toujours payer énergétiquement pour amener les éléments de la fusée sur cette orbite mais, ensuite, le coût du voyage est notablement réduit, en profitant de la vitesse déjà acquise. Des calculs donnent ainsi un incrément de 3,6 km/s au lieu des 2,9 km/s.

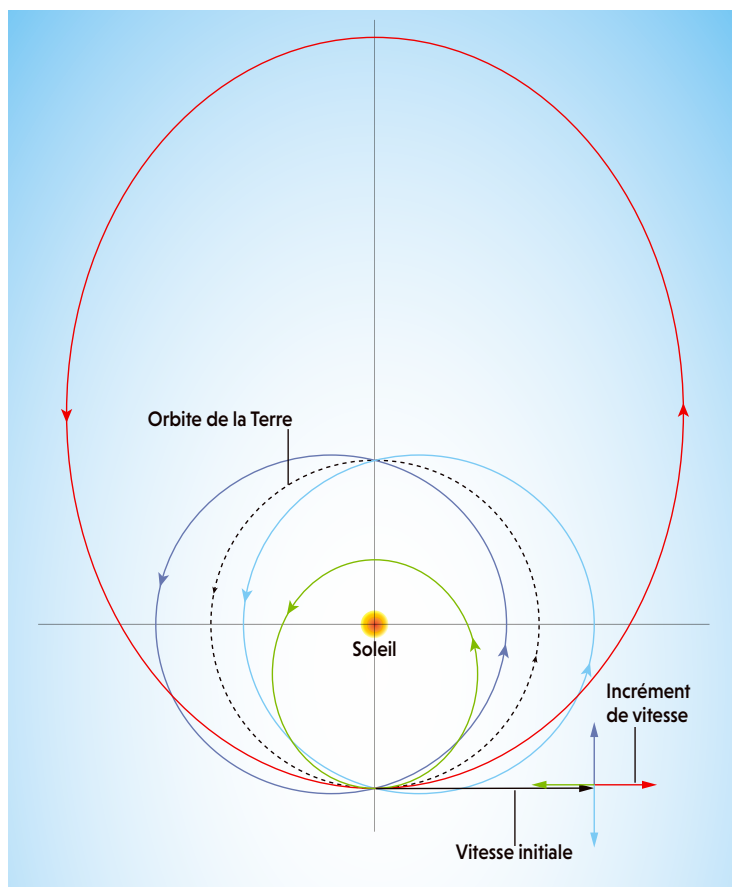
Les gravités planétaires présentent parfois quelques avantages. Imaginons que notre sonde spatiale arrive au voisinage de Mars en la devançant sur sa trajectoire. Si elle arrive suffisamment près de Mars, l'attraction gravitationnelle de Mars devient supérieure à l'attraction gravitationnelle du Soleil. On dit que la sonde est rentrée dans la sphère d'influence de Mars, dont le rayon est estimé à environ 600000 km. Sa

trajectoire est alors contrôlée par Mars, sa vitesse va rapidement augmenter en se rapprochant de la planète, avec le risque soit de la percuter, soit de la frôler à plus de 5,1 km/s et de repartir dans l'espace. C'est pourquoi on freine en général la sonde pour la placer en orbite basse avant qu'elle ne se pose sur la planète. Nul besoin de l'accélérer comme on l'avait évoqué (même si freiner coûte aussi de l'énergie).

On peut aussi jouer sur l'influence gravitationnelle de Mars pour raccourcir la durée du voyage: comme l'orbite de Mars est tangente à l'orbite de transfert à l'aphélie, on peut faire tomber la sonde dans le puits de gravité de la planète bien avant que l'aphélie soit atteint. Le gain peut alors atteindre un bon mois. ■

UN INCRÉMENT DE VITESSE BIEN DIRIGÉ

L'incrément de vitesse appliqué à une sonde spatiale à son départ depuis la Terre donne à l'engin une trajectoire elliptique différente selon la direction de l'incrément. Lorsque l'incrément est donné dans le sens du mouvement initial (celui de la Terre), l'énergie acquise est maximale et la trajectoire qui en résulte (en rouge) a la portée la plus grande. Trois autres situations (en vert, bleu clair et bleu foncé), pour des incréments dirigés en sens opposé ou perpendiculairement au mouvement, sont également figurées ici.



BIBLIOGRAPHIE

A. Stinner et J. Begoray, **Journey to Mars : The physics of travelling to the red planet**, *Physics Education*, vol. 40(1), pp. 35-45, 2005.

L. M. Celnikier, **Basics of Space Flight**, Frontières, 1993.

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT !**



N° 513 (juill. 20)
réf. PL513



N° 512 (juin 20)
réf. PL512



N° 511 (mai 20)
réf. PL511



N° 510 (avril 20)
réf. PL510



N° 509 (mars 20)
réf. PL509



N° 508 (fév. 20)
réf. PL508



N° 507 (jan 20)
réf. PL507



N° 506 (déc. 19)
réf. PL506



N° 505 (nov. 19)
réf. PL505



N° 504 (oct. 19)
réf. PL504



N° 503 (sept. 19)
réf. PL503



N° 502 (août 19)
réf. PL502

À retourner accompagné de votre règlement à :

Next2C – Service abonnements Pour la Science – 26 BD Président Wilson CS 40032 – 67085 Strasbourg CEDEX – email : pourlascience@abopress.fr



OUI, je commande des numéros de Pour la Science,
au tarif unitaire de 9,90 €.

1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES à 5 chiffres
correspondant aux numéros commandés :

1^{re} réf. _____ 01 x 9,90 € = 9,90 €
2^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
3^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
4^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
5^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
6^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €

TOTAL À RÉGLER _____ €

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris
Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

Offre valable jusqu'au 31/12/2020 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique. pourlascience.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques.
Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Téléphone _____

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

N° _____

Date d'expiration _____

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) _____

Signature obligatoire :



RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR
BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR