

La Recherche

La Recherche

www.larecherche.fr

L'HUMAIN
DANS
L'ESPACE



L'interaction SOLEIL-TERRE

JUIN 2020 - N° 560 - DOM 7,40 € - BEL 7,40 € - LUX 7,40 € - ALL 8,20 € - ESP 7,40 € - GR 7,40 € - ITA 7,40 € - PORTCONT 7,40 € - CH 12,40 FS -
MAR 65 DH - TUN 9,50 TND - CAN 10,99 \$ - CAN - MAYOTTE 8,80 € - TOM SURFACE 970 XPF - TOM AVION 1620 XPF

L 13412 - 560 H - F: 6,40 € - RD



COVID-19

PRÉDISPOSITION
GÉNÉTIQUE ET RÔLE
DES HORMONES



SOUFFRANCE SOLITUDE DÉSARROI

Face à l'épreuve du Covid-19,
France Alzheimer accompagne les familles

 un service d'écoute téléphonique avec des bénévoles formés et des psychologues.

Trouvez le numéro de votre association départementale sur francealzheimer.org

 une émission spéciale animée par un expert pour répondre aux questions des proches aidants et des personnes malades.

Écoutez ses conseils tous les vendredis à midi sur radiofrancealzheimer.org

Chaque jour
à leurs côtés,
grâce à vous

FAITES UN DON!

www.francealzheimer.org



**FRANCE
ALZHEIMER**
& MALADIES APPARENTÉES



Terre-Lune, le retour

Il y a deux trousseaux à outils dans la Station spatiale internationale, révèle le spationaute Jean-François Clervoy, que nous remercions ici de livrer aux lectrices et lecteurs de *La Recherche* ce regard inattendu sur ce fleuron de la présence humaine en orbite terrestre (p. 40). Anecdote? Pas autant qu'il y paraît. L'une des trousseaux correspond à des outils réglés sur le système métrique. L'autre sur les pouces, pieds et yards. Celle-ci pour les Américains, celle-là pour... tous les autres! Tout ou presque est ainsi dit sur la prééminence actuelle des États-Unis dans l'espace. Six décennies après le premier vol de Youri Gagarine, en 1961, incarnant la puissance spatiale qu'était alors l'URSS, et cinquante et un ans après le « *petit pas pour l'homme, grand bond pour l'humanité* » de Neil Armstrong sur le sol sélène.

Si l'interrogation sur la présence des humains, demain, dans l'espace revient en couverture, c'est que cette aventure singulière ne cesse de se réinventer. À l'heure où des firmes privées américaines promettent la Lune (p. 41), Xavier Pasco, directeur de la Fondation pour la recherche stratégique, explicite la nouvelle façon qu'il y aura d'habiter l'espace Terre-Lune (p. 36). Il en précise les enjeux géostratégiques. Après la course États-Unis-URSS, la reprise du témoin par la Chine et l'implication toujours

marginale de l'Europe. Quant à savoir si des humains se poseront un jour sur Mars, on a tout le temps de lancer les paris! Merci à Francis Rocard, responsable du programme d'exploration du Système solaire au Centre national d'études spatiales, d'avoir bien voulu dévoiler plusieurs pages éclairantes à ce sujet (p. 44), extraites de son ouvrage *Dernières nouvelles de Mars*, à paraître début juin (éditions Flammarion).

EN ATTENDANT, nombre d'astrophysiciens depuis longtemps regimbent devant les sommes colossales dévolues au « spatial habité ». Les missions robotiques, les sondes automatiques, autrement moins coûteuses, rapportent bien plus de connaissances scientifiques, ne cessent-ils de clamer. *La Recherche* a la chance de publier ce mois-ci deux prestigieux auteurs qui défendent plus qu'élégamment ce point de vue, l'astronome royal du Royaume-Uni Martin Rees et l'Américain Donald Goldsmith (p. 47). Nul doute qu'eux et leurs pairs suivent en ce moment avec un intérêt croissant les péripéties des deux sondes Solar Orbiter et Parker, parties au plus près du Soleil (p. 54). Étoile toujours assez mystérieuse, dont les humains entendent bien prévoir les dangereuses colères (p. 60). Bon solstice!

SOPHIA PUBLICATIONS: 8, rue d'Aboukir 75002 Paris. Tél.: 0170981919 • e-mail rédaction: courrier@larecherche.fr • Pour joindre directement par téléphone un membre de la rédaction, composez le 0170 98, suivi des quatre chiffres placés après son nom. Par mail, libellez l'adresse sur le modèle: initiale du prénom suivi du nom@sociapublications.fr (sans accents).

Pour toute question concernant votre abonnement: 0155567056 • Adresse: La Recherche, 4 rue de Mouchy 60438 Noailles Cedex. Tél.: 0155567115. • ABONNEMENTS: Tarif France: 1 an 10 nos + 1 n° double 67 euros. 1 an 10 n° + 1 n° double + 4 hors-séries 89 euros. Tarif international: nous contacter. E-mail: abo.recherche@groupe-gli.com • Suisse: Edigroup. Tél.: 022860 84 01 • Belgique: Edigroup. Tél.: 070233304 • Achat de revues et d'écrivains La Recherche - 8 rue d'Aboukir 75002 Paris. Tél.: 0170981924.

La Recherche est publiée par Sophia Publications • Président-directeur général et directeur de la publication: Claude Perdriel • Directeur général: Philippe Menat • Directeur éditorial: Maurice Szafran • Directeur éditorial adjoint: Guillaume Malaurie • Directeur délégué: Jean-Claude Rossignol • Directrice de la rédaction: Dominique Leglu • Rédacteur en chef: Philippe Pajot • Rédacteur en chef adjoint: Vincent Glavieux • Conception graphique, couverture: Dominique Pasquet • Assistante: Gabrielle Monrose (19 06) • Chefs de rubrique: Hervé Cabibbo (19 30), Gautier Cariou (19 31), Mathias Germain (19 33), Sylvain Guilbaud (19 38), Bérénice Robert (19 34) • Directrice artistique: Maryvonne Marconville (19 28) • Service photo: Claire Balladur (19 41) • Première secrétaire de rédaction: Anaëlle Bruyand (19 35) • Ont collaboré à ce numéro: Grégoire Ader, Antoine Cappelle, Fabien Lehalle • Fabrication: Christophe Perrusson (19 10), Thibault Quéré (19 21) • Activités numériques: Bertrand Clare (19 08) • Communication: Joëlle Hézard 0158650999 • Directeur des ventes et promotion: Valéry-Sébastien Sourieau (19 11) • Vente messageries VIP-diffusion: Frédéric Vinot • Numéro vert 0800 51 49 74 • Responsable gestion abonnements: Isabelle Parez (19 12) • Responsable du marketing direct: Linda Pain (19 14) • Responsable administratif et financier: Nathalie Tréhin (19 16) • Comptabilité: Teddy Merle (19 15) • Diffusion librairies: Pollen DIF'POP. Tél.: 0143620807 Fax: 0172718451 • Régie publicitaire: MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris. Tél.: 0144889770. Fax: 0144889779 • e-mail: pnom@mediaobs.com • Pour joindre directement une personne, composez le 01 44 88, suivi des quatre chiffres placés après son nom. • Directeur général: Corinne Rougé (93 70) • Directeur commercial: Jean-Benoît Robert (97 78) • Directeur du pôle Sciences: Sylvain Mortreuil (97 75) • Partenariats: Karine Grossman (89 08) • Studio/Maquette/Techniques: Cédric Aubry (89 05) • Imprimerie: Elcograf Spa (Vérone - Italie). Dépôt légal à parution. Les titres, les intertitres, les textes de présentation et les légendes sont établis par la rédaction du mensuel. La loi du 11 mars 1957 interdit les copies ou reproductions destinées à une utilisation collective. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur, ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite (article L.122-4 du Code de propriété intellectuelle). Toute copie doit avoir l'accord du Centre français du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris. Tél.: 0144074770. Fax: 0146346719). L'éditeur s'autorise à refuser toute insertion qui semblerait contraire aux intérêts moraux ou matériels de la publication. Commission paritaire: 0924 K 85863. ISSN 0029-5671.



Origine du papier: Allemagne - Taux de fibres recyclées: 0% - Eutrophication: Ptot = 0,016 kg/tonne de papier. Ce magazine est imprimé chez Elcograf Spa (Vérone - Italie), certifié PEFC.



entretien avec

Pierre-Marie Aubert

Peut-on assurer une alimentation durable tout en préservant la biodiversité et le climat? C'est l'enjeu d'une révolution agroécologique fondée sur l'abandon des pesticides et engrais de synthèse, et sur le redéploiement de prairies extensives. Une révolution possible en Europe, estime le chercheur Pierre-Marie Aubert.

“ En dix ans, on peut changer notre modèle agricole ”

(*) L'efficacité de l'usage de l'azote

désigne la part de fertilisant azoté fixé par les plantes divisée par la quantité totale de fertilisation azotée appliquée.

« Pierre-Marie Aubert a publié en 2018 un scénario exposant une transition agroécologique à grande échelle en Europe.

Changement climatique, effondrement de la biodiversité, mais aussi concurrence internationale et concentration de l'industrie sont autant de défis que l'agriculture doit relever pour continuer à assurer notre sécurité alimentaire. Une révolution agroécologique indispensable, qui nécessitera des transformations à la fois dans nos pratiques agricoles et dans nos comportements, mais qui ne représente pas un objectif si inatteignable que cela. Enseignant-chercheur à Sciences Po Paris, à AgroParisTech et à l'université de Paris-Saclay, Pierre-Marie Aubert est bien placé pour expliciter les termes de cette révolution. Sa formation interdisciplinaire, qui mêle les sciences politiques aux sciences biotechniques, lui donne un regard transversal sur les enjeux liés aux transformations du monde agricole. À l'Institut du développement durable et des relations internationales (Iddri), il coordonne l'initiative Politiques publiques pour l'agriculture européenne. La généralisation de l'agroécologie à l'échelle européenne est pour lui aussi souhaitable que possible.

La Recherche Vous expliquez que le système alimentaire européen n'est pas durable.

Pourquoi?

Pierre-Marie Aubert Il y a au moins trois aspects à considérer pour répondre à cette question : environnemental, sanitaire, puis économique. Sur le plan environnemental, on sait que la biodiversité souffre de nos pratiques agricoles. La littérature scientifique nous renseigne sur la perte des populations d'insectes, d'oiseaux, etc. Nous savons que les sols subissent une minéralisation, une perte de matières organiques et une érosion continue. Et puis il y a la partie qui concerne les gaz à effet de serre. Entre 1990 et 2010, les émissions du système agricole ont certes été réduites de 20 %, essentiellement grâce à l'amélioration de l'efficacité de l'usage de l'azote (*) et à la diminution du cheptel ruminant, mais on a constaté une réaugmentation depuis 2012.

Quels sont les enjeux sanitaires?

Le sujet est débattu et controversé. On a d'un côté les questions associées à l'augmentation des maladies chroniques dites « non communicables » ●●●

SES DATES

1983 Il naît à Valence, dans la Drôme.

2003 Il intègre l'École nationale du génie rural, des eaux et des forêts.

2010 Thèse de doctorat à AgroParisTech.

DEPUIS 2011 Il est enseignant-chercheur à AgroParisTech.

2015 Il entre à l'Institut du développement durable et des relations internationales comme chercheur, puis coordinateur de l'initiative Agriculture européenne.

2018 Il publie, avec Xavier Poux, le scénario « Ten Years For Agroecology in Europe ».

(*) **Un métabolite** est une petite molécule qui peut se disperser dans l'environnement.

... (diabète, maladies cardio-vasculaires, surpoids et obésité), qui ont un lien indirect avec une alimentation de plus en plus riche et déséquilibrée; et de l'autre, celle de l'impact des produits phytosanitaires (pesticides) sur la santé des consommateurs, fortement controversée du fait du manque de travaux totalement conclusifs.

Et qu'en est-il sur le plan économique ?

À la suite des États généraux de l'alimentation de 2017, la loi Alimentation de 2018 a cherché à donner plus de capacités de négociation aux agriculteurs français face à leurs acheteurs. Mais elle ignore totalement la position des acteurs français dans le marché européen et, au-delà, des acteurs européens sur le marché mondial.

Les experts de l'ONU sur le climat (Giec) et la biodiversité (IPBES) expliquent qu'il y a trois enjeux pour les années à venir : maintenir la biodiversité, limiter le changement climatique et garantir la sécurité alimentaire. Comment répondre à ces impératifs ?

Pour aborder cette question, il faudrait disposer de trajectoires contrastées des systèmes alimentaires qui identifient clairement leurs impacts sur l'ensemble des enjeux cités. Or de telles analyses sont très rares. Les quelques travaux sur lesquels on peut s'appuyer nous montrent que des choix seront peut-être inévitables. Prenons un exemple pour deux situations données en 2100 : la première, un monde dans lequel on réussit à maintenir le réchauffement climatique sous les 2 °C [par rapport à l'ère

préindustrielle, NDLR] en mobilisant massivement les terres pour produire des énergies dites propres, comme les biocarburants ; la seconde, un monde où le réchauffement est limité à 4 °C, dans lequel les dynamiques socio-économiques et politiques sont les mêmes mais où, en revanche, on ne mobilise pas les terres à des fins énergétiques. L'impact sur la biodiversité de ces deux scénarios est quasiment le même : autour de 15 000 espèces de batraciens, oiseaux, mammifères seraient mises en danger d'extinction. Il est même légèrement supérieur dans le scénario à 2 °C (1) ! Ce sont les déterminants de cette perte de biodiversité qui diffèrent. Dans le scénario à 2 °C, c'est le changement d'usage des terres qui contribue à un impact très fort sur la biodiversité. On transforme notamment les prairies en espaces agricoles, ce qui aggrave la perte des habitats.

La chimie – à travers les pesticides – a permis de maintenir cet équilibre en garantissant la sécurité alimentaire au XIX^e siècle. Pourquoi devrions-nous en sortir ?

Pour trois raisons : l'impact sur la santé des consommateurs, l'impact sur la santé des travailleurs et l'impact sur la biodiversité. Pour cela, il faut se fixer comme objectif le zéro pesticide, même si on sait qu'on ne pourra certainement pas l'atteindre. Les verrouillages sont si forts que, si on ne se donne pour objectif qu'une diminution d'usage, cela ne changera pas grand-chose. C'est ce qu'illustre l'échec du plan Écophyto en France. Issu du Grenelle de l'environnement de 2007, ce plan avait

L'ÉLEVAGE EXTENSIF NE COÛTE PAS PLUS CHER

Il est important de distinguer les animaux dont l'alimentation entre directement en compétition avec la nôtre, parce que nourris avec des céréales et des protéines consommables par l'homme, de ceux qui, au contraire, rendent des services à la société et aux écosystèmes, parce que nourris à l'herbe de manière extensive. En suivant cette logique, il faut réduire notre consommation de produits animaux, et favoriser ceux qui permettent de valoriser ces espaces importants pour la biodiversité que sont les prairies extensives : limiter le poulet pour privilégier le bœuf ou le mouton produits à l'herbe. Contrairement à ce que l'on pourrait croire, cette viande ne coûterait



▲ L'élevage en prairie doit être encouragé.

pas plus cher à la production et à l'achat. C'est ce que soutient un rapport de 2017, qui a montré que les coûts de production du lait en systèmes économes et autonomes (donc à l'herbe) sont très inférieurs à ceux des systèmes intensifs (1). Néanmoins,

repasser à un système largement extensif se heurte à quelques obstacles. Tout d'abord, la priorité donnée à l'élevage intensif a induit des investissements importants, que nombre d'agriculteurs doivent rembourser. Ensuite, produire avec de l'herbe suppose d'avoir accès à des prairies à proximité des étables. Or, en Île-de-France (comme dans d'autres régions), seulement 3,2 % des surfaces sont dédiées à des prairies permanentes, alors qu'il faudrait atteindre au minimum 15 %, et plutôt 25 %, pour restaurer la biodiversité et obtenir un bon état écologique des cours d'eau.

P.-M. A.

(1) tinyurl.com/elevage-econome-intrants



▲ Dans les agroécosystèmes, une part de végétation semi-naturelle assurerait leur fonctionnalité et permettrait aussi de stocker du carbone.

fixé un objectif de réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires (insecticides, herbicides, fongicides) de 25 % en 2018 et de 50 % en 2025, en se fondant essentiellement sur l'information, la formation et la démonstration. En l'absence d'actions structurantes sur les filières, les modalités de mise sur le marché et les systèmes de production, le plan n'est même pas parvenu à amorcer une décrue des usages ; au contraire, les ventes de ces produits ont progressé, en moyennes triennales, de 22 % entre 2009 et 2011 et entre 2016 et 2018 (2). Sans oublier que, d'un point de vue environnemental, personne ne sait dire ce que serait une « juste dose » de pesticides compatible avec le maintien de la biodiversité et les objectifs de rendement fixés.

Et quel est l'impact des pesticides sur la santé ?

Le débat public à ce sujet a trop souvent été parasité par des polémiques comme celle sur le glyphosate. Il faut bien mesurer qu'il y a trois choses qu'on ne sait pas faire : prendre en compte l'effet simultané d'un principe actif, des coformulants et des métabolites (*) ; prendre en compte l'action conjointe de plusieurs pesticides – l'effet cocktail –, alors qu'en France, il y a un peu plus de 300 pesticides autorisés ; enfin, mesurer les effets sur la santé des faibles doses sur de longues durées. Une expertise collective de l'Inserm rappelle ainsi que les études de toxicologie sur lesquelles on s'appuie pour parler ou non de nocivité ratent un certain nombre de choses (3). Par ailleurs, depuis les années 2000, on a mené des expériences d'alimentation des animaux avec des produits agricoles. Avec deux résultats majeurs : quand vous nourrissez des rats avec des aliments issus de l'agriculture biologique et de l'agriculture conventionnelle, en quarante-huit heures, ils savent faire la différence et expriment leur préférence pour l'alimentation issue de l'agriculture biologique (4). Le deuxième résultat porte sur les drosophiles, rats



C'EST L'AUGMENTATION MOYENNE des ventes de produits phytosanitaires en France en 2009-2011 et en 2016-2018, malgré l'adoption du plan Écophyto.

et lapins. Des travaux ont montré que les individus nourris à partir d'aliments issus de l'agriculture biologique présentent de meilleurs taux de fertilité et une immunité renforcée (5). Ce qui m'étonne, c'est que ces publications ne soient pas plus mises en avant, alors que cela me semble constituer un faisceau de preuves suffisant pour nous alerter.

Comment réussir la transition vers le zéro pesticide ?

Dans les pays développés, les rendements sont très proches du potentiel agronomique maximum, c'est-à-dire de la capacité de la terre à produire de la nourriture telle qu'elle a été évaluée par les agronomes. Dans ce cas-là, le passage au zéro pesticide conduit presque inévitablement à une stagnation, voire à des baisses de rendement qui font peur. Mais il y a de nombreux endroits dans le monde où on est très loin de ce potentiel agronomique maximum. On pourrait s'en rapprocher sans passer par la case pesticide, ou de manière très différente de ce qui a été fait chez nous.

Où, par exemple ?

Dans beaucoup de régions d'Afrique, à l'Est, en Russie et en Ukraine, dans les zones équatoriales... Les rendements y sont parfois inférieurs de près de 50 % à ce qui est considéré comme le potentiel agronomique maximum. Pour s'en rapprocher, il faut lever ce que l'on appelle les facteurs limitants, en particulier l'accès aux nutriments nécessaires à la croissance des plantes (en premier lieu, l'azote) et à l'eau, tout en améliorant le potentiel génétique des variétés cultivées. Des systèmes complexes et ...

Il faut se fixer comme objectif le zéro pesticide, même si on sait qu'on ne pourra pas l'atteindre"

... diversifiés, qui recourent aux dynamiques écologiques pour mobiliser ces nutriments et retenir l'eau – via par exemple les associations de cultures, l'introduction de légumineuses, les cultures étagées, ou encore une forte connexion entre systèmes de culture et d'élevage –, donnent déjà des résultats très encourageants en ne faisant qu'un usage minime des intrants de synthèse.

Et sur le plan global, faut-il changer l'offre ou la demande en premier ?

Il est clair que, si la demande n'évolue pas, mais qu'on lance des actions très fortes sur l'offre, on risque de déséquilibrer le marché de manière dramatique... Pour ne regarder que l'Europe, 60 % de la production céréalière part dans l'alimentation animale ! Si on arrête l'utilisation des pesticides du jour au lendemain, cette production céréalière va baisser, du moins dans un premier temps. Mais si, en face, la demande en alimentation animale reste constante – parce que la demande de produits animaux ne faiblit pas –, on déséquilibrera le marché, avec des effets redoutables. Nous avons donc besoin de travailler au moins autant sur l'offre que sur la demande. Mais, entre l'agriculture et le consommateur, il y a un acteur essentiel : les agro-industries.

Quelle est leur responsabilité ?

Elles jouent un rôle déterminant sur l'offre comme sur la demande, par leurs stratégies d'approvisionnement et par leurs stratégies produits. Ce sont à la fois des donneurs d'ordre structurants pour toute la production agricole, mais aussi des prescripteurs indirects de nos comportements alimentaires, du fait des produits qu'elles mettent ou ne mettent pas dans les rayons des supermarchés. On le voit bien

15 À 25 %

DES SURFACES AGRICOLES UTILES au minimum devraient être dévolues à des infrastructures de type agroécologique (prairies, bosquets, zones humides...), selon Pierre-Marie Aubert.

(*) La surface agricole utile est un instrument statistique destiné à évaluer le territoire consacré à la production agricole ; elle comprend les terres arables (grandes cultures, cultures maraîchères...), les surfaces toujours en herbe (prairies permanentes, alpages...) et les cultures pérennes (vignes, vergers...).

en négatif, par exemple, avec les produits à base de protéines végétales (lentille, pois chiche, soja...), largement absents dans la distribution française depuis de nombreuses années – même si les produits à base de soja fleurissent depuis peu dans la plupart des enseignes. Cela explique, en partie au moins, pourquoi leur consommation est si faible en France (moins de 5 g/jour), alors que les régimes « types » préconisent plutôt 50 à 100 g/jour (6).

Quelles sont donc nos perspectives ?

Il faut dissocier la biophysique de la politique. Pour la biophysique, on est assez bien équipé pour dire qu'en Europe, il y a trois impératifs minima. L'un du côté de la demande : on a besoin de diminuer la consommation totale de produits animaux. Et deux du côté de l'offre : il faut réintroduire de la diversité et de la complexité dans les systèmes agricoles, à la fois en production animale et végétale ; et assurer le retour, dans n'importe quel territoire, d'une part minimum de végétation semi-naturelle pour assurer la connectivité, la fonctionnalité des agro-écosystèmes, mais aussi stocker du carbone... On peut se projeter vers un objectif minimum de 15 à 25 % des surfaces agricoles utiles (*) dévolues à des infrastructures de type agroécologique (7). C'est-à-dire des prairies, des bosquets isolés, des zones humides, etc. Sur le volet politique, on a besoin d'allier une logique globale à une logique politique plus proche des réalités. Pour cela, il faut laisser des marges de manœuvre aux collectivités territoriales.

Quels discours, en tant que chercheur, pouvez-vous tenir afin que soient mises en place les politiques nécessaires ?

La question des comportements alimentaires est aujourd'hui un quasi « non-objet » de politique publique. Les élus et représentants de la puissance publique tendent à se retrancher derrière l'idée qu'expliquer aux gens ce qu'ils doivent manger serait attentatoire à leurs libertés. C'est oublier un peu vite qu'il y a de nombreuses manières d'influencer les régimes alimentaires et qu'elles sont mobilisées depuis longtemps par les acteurs privés comme publics ! On peut agir sur le marketing des grands groupes, sur l'information à destination du public, sur la régulation dans l'industrie. Nous devons donc travailler sur l'ensemble de l'environnement alimentaire, par l'information certes, mais surtout en faisant évoluer l'offre de produits grâce aux acteurs industriels. Il n'y a que de cette manière que l'on pourra assurer des débouchés à des productions aujourd'hui mineures mais nécessaires pour faire évoluer les pratiques agricoles des producteurs, et proposer des alternatives attrayantes



▲ En France, la faible consommation de légumineuses et de produits qui en sont dérivés s'explique en grande partie par les choix stratégiques des agro-industries.

LA FONTE DU PERMAFROST, UNE CHANCE ?

Parmi les contre-vérités qui circulent à propos du réchauffement climatique: l'idée selon laquelle la fonte du permafrost, ces sols gelés en permanence (en fait pendant au moins deux ans consécutifs), qui représentent un cinquième de la surface du globe, serait une chance pour l'humanité, car cela libérerait des terres agricoles. « Un tissu de bêtises », selon Pierre-Marie Aubert. « Les personnes qui croient cela oublient combien de milliers et de millions d'hectares vont être perdus du fait de la raréfaction des ressources en eau dans un grand nombre de zones et du fait de la



▲ Le dégel aura des effets néfastes.

submersion de tous les deltas, tempête le chercheur en politiques agricoles et alimentaires. Sans même parler du coût d'investissement pour rendre exploitables les zones libérées des glaces! » V. B.

sur les plans culinaire et gustatif, qui pourront se substituer, au moins partiellement, à des produits à forte empreinte environnementale.

Quels sont les outils pour entrer dans un système plus vertueux ?

Les enjeux de concurrence et de compétition internationale sont cruciaux pour comprendre la situation actuelle et les marges de manœuvre dont nous disposons. Dans le cas des céréales, par exemple, les agriculteurs français font face à une concurrence de plus en plus forte des blés ukrainiens. Or, ils n'ont aucune chance d'être plus compétitifs, compte tenu des différences dans les normes de production, tant sociales qu'environnementales, appliquées aux producteurs. Le changement de système alimentaire suppose donc des évolutions bien au-delà des questions agricoles. L'Union européenne doit dire à l'Ukraine que, sur l'agriculture, les accords de libre-échange ne nous conviennent plus. Elle doit porter une vision ambitieuse de l'agriculture à l'international et refléter cela dans les accords commerciaux qu'elle signe. Prenons encore l'exemple des protéines végétales. On sait que celles qui sont produites au Brésil, en Argentine et, potentiellement, aux États-Unis, ne sont pas compatibles avec ce que l'Europe impose à ses propres agriculteurs: recours aux OGM, quantité et types de

“ L'Europe doit refléter sa vision de l'agriculture dans les accords commerciaux qu'elle signe ”

pesticides utilisés, etc. Alors, soit on décide que ce que l'Europe impose à ses agriculteurs a un fondement qui dépasse le cadre européen et on renégocie la manière dont on échange les produits agricoles, soit... Je ne vois pas de solution...

Avons-nous les cartes en main pour y arriver ?

Potentiellement, oui. Mais il ne faut pas se leurrer, si vous diversifiez un système, y compris dans les zones les plus productives de France, – et à contexte politique constant – les coûts de production augmenteront dans un premier temps... Plus de matériel à amortir, plus de cultures à gérer, plus de temps de tracteur nécessaire, etc. La question est donc de savoir qui prend en charge cette augmentation initiale des coûts de production. Une partie des leviers économiques se situe chez les opérateurs industriels. Il faut rappeler que le nombre d'emplois dans l'agro-industrie en France a quasiment rattrapé le nombre d'emplois dans l'agriculture. Ainsi, dès que vous touchez à l'agriculture française, par ricochet

vous avez à réfléchir à l'agro-industrie. Et vice versa. Cette relation mutuelle est absente du débat. Près de 200 000 emplois sur les 450 000 emplois de l'agro-industrie sont liés à l'élevage. Donc, lorsqu'on explique qu'il faut une transformation de l'élevage, une diminution de la production animale, que fait-on de ces 200 000 emplois? On peut parler pendant cinquante ans du glyphosate, mais je ne pense pas que ce soit le bon débat.

Est-on capable de se projeter pour savoir combien de temps est nécessaire pour changer de modèle agricole ?

Sur une ferme, il ne se passe pas trois ans sans que l'agriculteur ne fasse un choix d'investissement. Mais l'agriculteur tout seul ne fera rien. S'il n'a pas le soutien des filières, des pouvoirs publics et des consommateurs, il n'y parviendra pas. Il faut simultanément poser la question des orientations dans les entreprises et chez les consommateurs. Dans les entreprises, l'échelle de temps est à peu près la même que chez l'agriculteur. Une décennie me paraît donc une durée largement suffisante car, en dix ans, vous avez trois coups de volant possibles. ■

Propos recueillis par Vincent Bordenave

(1) C. Hof *et al.*, *PNAS*, 115, 13294, 2018.

(2) Ministère de l'Agriculture, « Plan Écophyto : note de suivi 2018-2019 », 2020.

(3) tinyurl.com/pesticides-effets-sante

(4) E. Johansson *et al.*, *Int. J. Env. Res. Pub. He.*, 11, 3870, 2014; F. Magkos *et al.*, *Int. J. Food Sci. Nutr.*, 54, 357, 2003.

(5) R. Chhabra *et al.*, *PLOS One*, 8, e52988, 2013.

(6) J.-M. Meynard *et al.*, *Agr. Syst.*, 157, 330, 2017.

(7) X. Le Roux *et al.*, « Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies » (rapport Inra), 2008.

ARCHÉOLOGIE

L'ÉRUPTION DE SANTORIN

La disparition de la civilisation de l'Oxus (vers 1500 avant notre ère) correspond à celle de la civilisation minoenne à la suite de l'éruption du volcan de Santorin en mer Égée (La Recherche n° 558, p. 48), qui aurait changé le climat pendant plusieurs années. Pourrait-il y avoir une corrélation ?

■ Pierre David

Réponse de Julio Bendezu-Sarmiento, archéologue L'hypothèse de la destruction de la civilisation minoenne à cause de l'éruption du volcan de Santorin a été longtemps discutée, mais a été largement abandonnée. Il est évident que les conséquences indirectes de l'éruption ont été dévastatrices pour cette civilisation, mais leur degré reste matière à débat. L'impact climatique global fait aujourd'hui l'objet d'évaluations plus nuancées et mesurées autour de la mer Égée. Il ne semble pas y avoir eu d'impact au-delà. En ce qui concerne l'Asie centrale et les sites de la fin de l'âge du bronze (autour de 1500 avant notre ère), nous n'avons pas trouvé d'indications géologiques ou archéologiques montrant un changement destructeur lié aux projections de matière dans l'atmosphère.

MATHÉMATIQUES

DÉCONFINEMENT PAR ZONES

Je suis dubitative sur le déconfinement par zones en France (article du 24 avril 2020 sur

En quête de la souveraineté numérique

Stéphane Grumbach, leu... La Chine affiche une très grande ambition numérique, avec une vision à long terme et une volonté de mettre fin à la suprématie américaine. Elle mise pour cela sur plusieurs leviers : investir ses capacités technologiques, l'interconnectivité, le contrôle accru de ses données numériques, le développement de technologies et l'exportation vers le public et le privé.



CRÉDIT SOCIAL

J'ai trouvé l'article de Stéphane Grumbach complaisant à l'égard du système de crédit social instauré en Chine. Son principal objectif n'est-il pas la surveillance et le contrôle idéologique de la population, à partir d'un algorithme régi par le gouvernement (La Recherche n° 557, p. 47) ?

■ Gabriel Bénouville

Réponse de Séverine Arsène, politologue et sinologue Les technologies mises au service de la police en Chine contribuent à des violations majeures des droits de l'homme. Human Rights Watch l'a amplement documenté. Cependant, le système de crédit social (SCS) ne fonctionne pas avec « un » algorithme, mais des dizaines de barèmes spécifiques. Les administrations (impôts, environnement) mettent leurs administrés sur des listes noires quand ils enfreignent des règles, ce qui peut leur interdire d'exercer dans un secteur ou de faire des dépenses luxueuses. Ces listes sont rendues publiques sur une plateforme nationale. Les municipalités, elles, mettent en place des systèmes de points, sans sanctions, mais qui donnent des avantages. L'abus du dispositif à l'encontre des dissidents existe : ils ont toujours été accusés d'infractions floues (troubles à l'ordre public, fraude fiscale). Ils pourront être blacklistés sur ces bases. Malgré la propagande, l'efficacité du SCS reste à prouver et son application dans un autre pays serait très difficile, pour une question d'environnement politique et bureaucratique. Mais, à l'heure où une « demande internationale de surveillance se développe », comme l'écrit Stéphane Grumbach, les errements idéologiques de la Chine sont un avertissement pour ne pas tomber dans des réponses sécuritaires aveugles et liberticides.

le site larecherche.fr). Tout d'abord, celui-ci risque de créer des inégalités. De plus, les bassins d'emplois n'ont pas de limites : nous sommes nombreux à vivre jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres de notre lieu de travail. Enfin, n'est-il pas dangereux d'arrêter les gestes barrières dans les « zones vertes » ?

■ Élodie Pineda Ricordeau

Réponse de Miquel Oliu Barton, mathématicien Notre modèle propose de lever progressivement les restrictions sanitaires et de mobilité dans les zones vertes, lorsque cela est jugé pertinent par les autorités sanitaires. Découper la France en petites zones a l'avantage de mieux identifier les foyers infectieux. Cela aide à contenir la propagation du virus et à limiter la durée des mesures de confinement. Si les bassins d'emplois n'ont pas de limites, il est néanmoins possible de prendre en compte les actifs pour limiter les dommages sociaux et économiques. Le gouvernement a choisi une approche similaire à la nôtre, avec des unités territoriales plus larges : les départements. Ils sont marqués en vert ou en rouge selon la maîtrise que l'on y a du virus. Ce découpage nous semble un compromis efficace et réaliste. Il faut maintenant penser à une stratégie à l'échelle de l'Union européenne. Nous croyons que notre méthode peut jouer un rôle important dans cette optique.

Une question à nous poser ?

✉ Écrivez-nous par courriel à courrier@larecherche.fr ou à l'adresse postale suivante : Rédaction de « La Recherche », rubrique Courrier des lecteurs 41 bis avenue Bosquet 75007 Paris

Sauf mention contraire de leur auteur, toute lettre parvenue à la rédaction de La Recherche est susceptible d'être éditée et publiée, en tout ou en partie, dans le journal. Les lettres concernant un auteur extérieur à la rédaction de La Recherche lui sont envoyées. Sans réaction de l'auteur dans un délai raisonnable, nous les considérons comme publiables en tout ou en partie, sans attendre une éventuelle réponse de sa part. Dans la mesure du possible, évitez les fax et les lettres manuscrites.

3 ÉDITO

- 4 **ENTRETIEN AVEC PIERRE-MARIE AUBERT**
« En dix ans, on peut changer notre modèle agricole »

10 COURRIER

ACTUALITÉS

- 12 **Spécial Covid-19** Déconfinement sous surveillance
- 14 Des gènes à l'origine de certains cas graves?
- 16 « Nous remontons aux sources de l'épidémie »
Entretien avec Meriadeg Le Gouil
- 20 **Physique** De nouvelles propriétés découvertes chez les anyons
- 21 **Astrophysique** Une étonnante danse asymétrique
- 22 **Archéométrie** Dater les vestiges de poterie grâce à leurs résidus alimentaires
- 22 **Chimie** Le manganèse comme agent de contraste
- 23 **Matériaux** Le plein d'hydrogène
- 24 **Biologie** Des bactéries alliées des cultures
- 25 **LA CHRONIQUE Transition énergétique** Étendre le prix du carbone européen aux importations d'électricité
Marie Dégremont
- 26 **Entomologie** Les insectes pas tous en déclin
- 26 **Archéologie** Des objets vikings du Moyen Âge mis au jour par la fonte des glaces
- 27 **Paléogénétique** Comprendre Neandertal par ses héritiers
- 28 **START-UP** *Pierre Vandeginste*
- 29 **LA CHRONIQUE Numérique** Multiplions les identités de notre double numérique
Serge Abiteboul

DOSSIER

CONQUÊTE SPATIALE: UNE NOUVELLE ÉPOPEE HUMAINE?

- 36 « Avant Mars, l'espace Terre-Lune sera habité différemment »
Entretien avec Xavier Pasco



ACTUALITÉS - 12



DOSSIER - 34



FONDAMENTAUX - 54

- 41 Les entrepreneurs s'offrent la Lune *Denis Delbecq*
- 44 Prochain arrêt, la planète Rouge *Francis Rocard*
- 47 Avons-nous besoin d'humains dans l'espace? *Donald Goldsmith et Martin Rees*

FONDAMENTAUX

- 54 **ASTROPHYSIQUE** Plongée dans la fournaise du Soleil
Milan Maksimovic, Étienne Pariat, Philippe Louarn, Frédéric Auchère
- 60 Une alerte météo contre les tempêtes solaires
Vahé Ter Minassian
- 66 **LA CHRONIQUE Mathématiques** Plaire et convaincre *Roger Mansuy*
- 67 **SOCIOLOGIE ENVIRONNEMENTALE** À l'ère numérique, redécouvrir notre lien à la nature
Mélusine Martin
- 72 **PORTRAIT** Ludovic Orlando, un regard sans œillères sur la paléogénétique
Jean-François Haït
- 75 **LA CHRONIQUE Neurosciences** Les mécanismes cérébraux derrière les émotions *Mariana Alonso*
- 76 **HISTOIRE DES SCIENCES** Et Greenwich remet toutes les pendules à l'heure
Marie-Christine de La Souchère

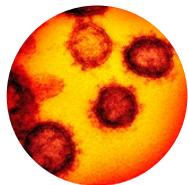
AGENDA - JEUX

- 81 **JEUX** *Kamil Fadel*
- 82 **LA CHRONIQUE Éthique** Loi de programmation pluriannuelle de la recherche et intégrité scientifique
Jean-Gabriel Ganascia

Retrouvez *La Recherche* sur RFI dans l'émission « Autour de la question », le 3 juin à 16 heures



Ce numéro comporte un encart abonnement *La Recherche* sur les exemplaires kiosque France et un message abonnement *L'Histoire* sur les exemplaires abonnés.



Déconfinement sous surveillance

Le retour à une certaine liberté de mouvement n'est pas sans risque. Avec une estimation d'à peine 5 % de sa population infectée par le Covid-19, la France ne pourra pas compter sur une immunité collective pour prévenir une éventuelle seconde vague de l'épidémie.

Depuis le 11 mai dernier, après cinquante-cinq jours de confinement, les Français ont repris progressivement quelques libertés de mouvement. « *Nous aurons trois semaines* », jusqu'au 2 juin, pour « *avoir une vision plus claire de comment les choses évoluent* », a indiqué lors d'une conférence de presse le président de la République. Quel était le profil de l'épidémie au moment du déconfinement ? À partir des données issues des établissements de santé et des certificats de décès, une étude de l'Institut Pasteur et de Sorbonne Université publiée le 13 mai confirme que l'âge est

un facteur de risque important face au virus. Selon leur modélisation, la probabilité moyenne de décès est de 0,7 % chez les personnes infectées par le virus, il passe de 0,001 % chez les moins de 20 ans à 10,1 % chez les plus de 80 ans (1). À tous les âges, les hommes sont plus susceptibles d'être hospitalisés, d'entrer en soins intensifs et de mourir que les femmes (lire p. 15). L'immunité de la population face au virus a aussi été estimée. « *Le 11 mai, près de 2,8 millions de personnes dans le pays ont été infectées, soit 4,4 % de la population*, indique Simon Cauchemez, épidémiologiste et modélisateur à l'Institut Pasteur. *L'immunité de*

groupe seule est donc bien insuffisante pour éviter une deuxième vague ». Il faudrait que plus de 65 % de la population ait été infectée pour assurer une immunité de groupe. Les auteurs insistent donc sur le maintien des mesures barrières afin de limiter le risque de transmission et éviter un rebond de l'épidémie.

« *Nous attendons davantage de données sérologiques de manière à mieux étalonner nos modèles et à affiner nos évaluations* », précise Simon Cauchemez. Mais ces données sont toujours en cours d'acquisition. Le projet EpiCOV, une vaste étude épidémiologique sérologique couplée à des

questionnaires, vise à fournir une cartographie précise du statut immunitaire de la population française. Ce projet commence par une grande enquête nationale auprès d'un échantillon représentatif de plus de 200 000 personnes (France métropolitaine et Outre-mer). Lors de l'enquête, les personnes sont invitées à répondre à un questionnaire (en ligne ou téléphonique) et, en parallèle, pour 100 000 d'entre elles, il leur sera demandé de réaliser à leur domicile un prélèvement de quelques gouttes de sang, qu'elles enverront par la poste pour analyse. La première collecte des données, commencée début mai, doit s'achever le 24 mai, et une deuxième collecte se déroule en juin.

TRACER LES CAS CONTACTS

La levée du confinement repose sur une nouvelle stratégie : le dépistage et le traçage des cas contacts. En France, à la manœuvre : les médecins généralistes, et des milliers d'agents de l'Assurance maladie et des agences régionales de santé. Ils devront identifier toutes les personnes avec lesquelles un malade a eu un échange « d'au moins quinze minutes à moins d'un mètre » dans les quarante-huit heures avant l'apparition des symptômes... « Pour être efficace, il faut être très rapide pour retrouver tous les contacts, insiste Samuel Alizon, spécialiste en modélisation des maladies infectieuses (CNRS, IRD, Mivegac à Montpellier). Cela a été montré par les simulations de l'équipe de Christopher Fraser à l'université d'Oxford (1) ». Le gouvernement a par ailleurs annoncé qu'il présenterait une application StopCovid, début juin, pour aider au traçage des contacts. M. G.

(1) L. Ferretti *et al.*, *Science*, doi:10.1126/science.abb6936, 2020.

Nouvelles modélisations

Un autre projet de ce type, qui s'appuie sur six cohortes de volontaires déjà existantes comme Constances, NutriNet-Santé, Elfe ou Epipage, a également été lancé. Ce projet Sapis-Sero, qui a débuté en avril pour la partie questionnaire, rassemble plus de 200 000 personnes. Les premiers kits pour recueillir les gouttelettes de

sang ont été progressivement envoyés au courant du mois de mai. La recherche d'anticorps contre le SARS-CoV-2 est réalisée à la faculté de médecine de Marseille. Deux méthodes sérologiques sont utilisées afin de garantir le maximum de fiabilité. Par la suite, des questionnaires brefs de suivi seront envoyés régulièrement durant toute la durée de l'épidémie afin d'en suivre l'évolution « en temps réel ».

L'étude de l'Institut Pasteur et de Sorbonne Université confirme l'impact du confinement sur la contagiosité de l'épidémie, représentée par le taux de reproduction de base R_0 . Celle-ci a été réduite de 77 %. Le taux de reproduction est en effet passé de 2,90 à 0,67, ce qui est un élément

LES MASQUES ET LA DISTANCIATION NE RÉDUIRAIENT LA TRANSMISSION QUE DE 75 %

positif (pour stopper la propagation de l'épidémie, il faut que ce taux reste inférieur à 1). Mais comment cela va-t-il évoluer avec la reprise des activités économiques et scolaires? De nouvelles modélisations ont été présentées début mai. Des chercheurs de l'Assistance publique-Hôpitaux de Paris, en partenariat avec la société française Public Health Expertise et l'université Columbia, ont développé un modèle complexe capable de simuler la circulation du virus au sein d'une communauté virtuelle de 500 000 personnes représentatives. Ils ont évalué l'impact de deux mesures de contrôle: le port obligatoire du masque et



▲ Pour freiner la circulation du virus, facilitée par la réouverture des écoles, de nouvelles règles de respect des distances pour les élèves et les enseignants ont été instaurées (ici, dans la Drôme).

la réduction des contacts dans la vie quotidienne. Résultat: même si le port de masques et la distanciation physique permettent de réduire de 75 % le risque de contamination, le nombre de cas graves serait tel que les capacités d'hospitalisation en réanimation seraient débordées dès la fin du mois de juillet (2). Autre modélisation, celle qui a été réalisée par l'équipe de l'épidémiologiste Vittoria Colizza (Inserm), qui tente d'apprécier l'effet de la réouverture des écoles en Île-de-France (3). « L'ouverture des écoles facilitera à nouveau la circulation du virus, rappelle la scientifique en conférence de presse, mais l'épidémie pourrait rester sous contrôle. Cela suppose que 50 % des gens restent chez eux – soit que leur activité professionnelle n'ait pas repris, soit qu'ils pratiquent le télétravail –, que les personnes âgées aient réduit de 75 % leurs contacts, et qu'il y ait une réouverture partielle (pas plus de 50 %) de différentes activités et commerces. »

Autre condition pour ce scénario rassurant: que le dispositif de dépistage, de traçage et

d'isolement des cas et de leurs contacts détecte au moins 50 % des nouvelles infections. « Si 25 % seulement [des nouvelles infections] sont identifiées, nous aurions à affronter une seconde vague plus intense que la première, débutant fin juin avec des capacités de réanimation dépassées jusqu'en août », insiste Vittoria Colizza. La modélisatrice souligne qu'au-delà du nombre de tests disponibles, ce dispositif de traçage des contacts nécessite des ressources humaines massives afin de casser les chaînes de transmission.

« Ces modélisations sont intéressantes, mais il reste beaucoup d'inconnues, comme la matrice des contacts, c'est-à-dire les liens entre les générations, par exemple entre les enfants et leurs grands-parents, ou entre les catégories socioprofessionnelles, souligne Samuel Alizon, spécialiste en modélisation des maladies infectieuses (CNRS, IRD, Mivegec à Montpellier). En France, nous manquons d'éléments pertinents sur ce

type de relations qui aideraient à prédire l'évolution d'une épidémie. En 2018, la mathématicienne Hannah Fry, avec l'aide de la BBC, avait lancé une expérience de terrain à grande échelle pour aider à prédire et à planifier l'impact d'une pandémie en enregistrant à l'aide d'une application téléphonique les contacts entre les volontaires. Ce type d'expérience mériterait d'être développé en France (4) ». Ces travaux ont donc des limites et ont pour objectif principal d'appeler à la prudence car, comme le rappelait Éric Caumes, chef du service des maladies infectieuses et tropicales à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, « l'avenir de l'épidémie est entre les mains de la population ».

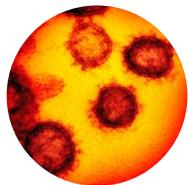
Mathias Germain

(1) H. Salje et al., *Science*, doi:10.1126/science.abc3517, 2020.

(2) N. Hoertel et al., *medRxiv*, 10.1101/2020.04.30.20086264, 2020.

(3) L. Di Domenico et al., *medRxiv*, 10.1101/2020.05.08.20095521, 2020.

(4) P. Klepac et al., *Epidemics*, 24, 49, 2018.



Des gènes à l'origine de certains cas graves ?

Pourquoi des jeunes en pleine santé se retrouvent-ils en réanimation ? Peut-être à cause d'une prédisposition génétique face à l'infection. Une hypothèse explorée par le Covid Human Genetic Effort, consortium international coordonné par le Français Jean-Laurent Casanova et l'Américaine Helen Su.

Depuis mi-mars, en France, un réseau de 151 services de réanimation, dit « réseau sentinelle », tient un registre des caractéristiques des patients hospitalisés développant une forme grave de Covid-19. Résultat : 80 % de ces patients – et 84 % de ceux qui sont décédés – présentent au moins une comorbidité. Avec en tête l'hypertension artérielle, une pathologie cardiaque, un diabète, ou encore l'obésité ou le surpoids. L'âge entre aussi en ligne de compte, indépendamment de l'existence d'une comorbidité : 70 % des patients décédés sans comorbidité avaient plus de 65 ans (1).

Pourtant, il existe quelques patients – de 1 à 5 % – qui ne cochent aucune de ces cases ! Pur hasard ? Peut-être. Mais il existe une autre hypothèse : que ces cas graves chez des personnes jeunes et en bonne santé résultent d'une prédisposition génétique. Cette hypothèse est aujourd'hui explorée par le Covid Human Genetic Effort, consortium international coordonné par le Français Jean-Laurent Casanova et l'Américaine Helen Su (2). Le premier codirige, avec le généticien Laurent Abel, le laboratoire de génétique humaine des maladies infectieuses de l'Inserm, bilocalisé à l'Institut Imagine, à Paris, et

à l'université Rockefeller, à New York. La seconde est responsable du service des maladies immunologiques humaines de l'Institut national des allergies et des maladies infectieuses, à Bethesda, aux États-Unis.

Variations communes

L'idée d'une base génétique des maladies infectieuses remonte au XIX^e siècle : face à la fragilité de certaines familles, durement touchées par le décès d'enfants atteints de fièvres, on parlait de « terrain ». Toutefois, l'hypothèse d'une transmission horizontale (la contagion) prit le dessus avec les travaux de Pasteur, et la découverte que les microbes causent les maladies infectieuses. Il fallut attendre les années 1920 pour que la théorie génétique des maladies infectieuses. Le premier support expérimental : médecin et chercheur à l'Institut Rockefeller, Leslie Webster montre qu'un même microbe, administré à deux souches différentes de souris (autrement dit, des souris au patrimoine génétique différent), rend les unes malades, tandis que chez les autres, l'infection est asymptomatique (3).

« Il y a des formes asymptomatiques et des formes graves pour à peu près tous les micro-organismes », souligne Jean-Laurent Casanova. *Ce qui varie, c'est la proportion de formes graves.* » À l'heure actuelle, les bases moléculaires génétiques de formes graves ont été identifiées pour une vingtaine de maladies infectieuses – virales, bactériennes, fongiques ou parasitaires. Il s'agit de variations dites monogéniques : une ou des mutations sur un unique gène rendent l'infection très grave ou mortelle chez la personne concernée. Dans certains cas, il suffit que l'un des deux exemplaires du gène concerné (celui hérité de la mère ou celui hérité du père) soit muté. Dans d'autres, il faut que les deux exemplaires le soient. Par exemple, en 2015, en étudiant le génome d'une fillette hospitalisée en réanimation pour une grippe très sévère, l'équipe de Jean-Laurent Casanova et Laurent Abel a découvert que les deux allèles d'un gène nommé IRF7 étaient mutés (4). Or, ce gène code une protéine qui régule la production d'interférons, molécules essentielles dans la réponse de l'organisme aux infections.



▲ Jean-Laurent Casanova (à gauche) codirige le laboratoire de génétique humaine des maladies infectieuses de l'Inserm.

UNE HISTOIRE DE SEXE ?

Outre la démonstration de la base génétique sous-tendant ce cas (heureusement) rare, ce type de découverte peut avoir des répercussions thérapeutiques : en l'occurrence, l'administration d'interférons pour pallier leur absence native.

Pour rechercher de telles formes génétiques du Covid-19, le Covid Human Genetic Effort s'appuie sur 38 centres de séquençage dans 22 pays, dont, outre 8 pays européens, les États-Unis et le Canada, la Chine, l'Iran, l'Arabie saoudite, le Brésil... Chaque centre récupère les échantillons sanguins de patients jeunes (moins de 50 ans) et sans comorbidité envoyés par des services de réanimation partenaires. L'ADN de ces patients est alors

LES FORMES GÉNÉTIQUES DE RÉSISTANCE SERONT ELLES AUSSI EXPLORÉES

séquencé. Ainsi, 100 génomes ont d'ores et déjà été séquencés à l'Institut Imagine.

Chaque séquence sera ensuite analysée individuellement par rapport au génome « témoin » de personnes non-malades, mais aussi comparée à chacune des séquences de patients établies par le consortium. Cela afin de faire ressortir d'éventuelles variations communes à plusieurs malades. Point important : l'analyse se fera sans a priori, elle portera sur tous les gènes de tous les chromosomes. C'est de cette analyse qu'émergeront des « gènes candidats » potentiellement impliqués dans les cas graves.

En France, presque trois patients en réanimation sur quatre sont des hommes. Il est possible que cela tienne à des facteurs de comorbidité différents, mais aussi que les hommes soient biologiquement plus susceptibles d'être infectés, ou que leur réponse à l'infection soit moins efficace. « Il y a deux grandes différences entre hommes et femmes face aux infections, rapporte Jean-Charles Guéry, directeur de recherche au Centre de physiopathologie de Toulouse-Purpan. La première est hormonale : l'activation des récepteurs aux œstrogènes conférerait une protection. Différents travaux menés chez la souris convergent en ce sens – dont certains menés avec le virus SARS-CoV de 2003 (1). » La seconde différence est liée au chromosome X. Normalement, l'un des deux chromosomes X des femelles est inactivé, ce qui rétablit une balance par rapport aux mâles, qui n'en possèdent qu'un. « Mais ce mécanisme n'est pas efficace à 100 %, explique Jean-Charles Guéry. Environ un quart des gènes du chromosome X inactivé restent actifs, dont des gènes du système. » Son



▲ Les femmes ne représentent qu'un quart des cas graves de Covid-19 hospitalisés en France.

équipe a récemment montré que c'était le cas du gène TLR7, qui code une protéine impliquée dans la reconnaissance des pathogènes et dans le déclenchement de la réponse immunitaire (2). L'un ou l'autre de ces mécanismes s'applique-t-il au Covid-19 ? Pour l'instant, on l'ignore.

C. K.

(1) R. Channappanavar et al., *J. Immunol.*, 198, 4046, 2017.

(2) M. Souyris et al., *Sci. Immunol.*, 3, eaap8855, 2018.

Par ailleurs, cela permettra aussi de voir si les hommes sont génétiquement plus susceptibles que les femmes de développer une forme grave (lire l'encadré ci-dessus).

Trois exemples

Mais l'ambition du consortium ne s'arrête pas là. Car, de l'autre côté du spectre d'impact des infections, il existe aussi des formes génétiques de résistance : des personnes qui, alors qu'elles sont exposées à un pathogène, ne sont pas infectées (à ne pas confondre avec des personnes infectées, mais asymptomatiques). On connaît trois exemples de ce type de résistance : des mutations du gène DARC, qui confèrent une résistance à l'infection par *Plasmodium vivax*, parasite responsable d'une forme de paludisme ; des mutations

du gène CCR5, qui confèrent une résistance au VIH, responsable du sida ; et des mutations du gène FUT2, qui protègent contre l'infection au norovirus, cause la plus fréquente de gastro-entérite épidémique. La protection n'a lieu que si les deux allèles sont mutés.

« Pour explorer cette piste dans le cas du SARS-CoV-2, nous allons nous intéresser aux membres du foyer des malades graves, explique Jean-Laurent Casanova. Par exemple, le conjoint, les enfants ou les parents ayant passé beaucoup de temps avec cette personne, sans pour autant être infectés. » Afin de distinguer les proches ayant été infectés de ceux ne l'ayant pas été, les scientifiques se référeront à la présence dans leur sang, ou non, d'anticorps spécifiques du SARS-CoV-2. « Si certains

proches n'ont pas développé d'anticorps, alors qu'ils ont été en contact étroit avec le patient pendant plusieurs jours avant son hospitalisation, cela signifie qu'ils sont peut-être résistants à l'infection, détaille Jean-Laurent Casanova. Si tel est le cas, alors nous séquencerons leur génome et nous y chercherons des formes monogéniques de résistance. »

Ce volet de l'étude ne commencera que lorsque les tests et les données sérologiques seront disponibles. En attendant, le séquençage du génome des malades graves se poursuit. Résultat des analyses d'ici quelques mois.

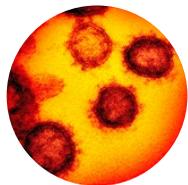
Cécile Klingler

(1) [tinyurl.com/SPF-Bulletin7mai2020](https://doi.org/10.1182/blood-2017-01-8188)

(2) www.covidhge.com

(3) J. L. Casanova, *PNAS*, 112, E7118, 2015.

(4) M.-J. Ciancanelli et al., *Science*, 348, 448, 2015.



« Nous remontons aux sources de l'épidémie »

Comment le virus SARS-CoV-2 est-il passé de la chauve-souris à l'homme ? Fin connaisseur des coronavirus et de la faune sauvage en Asie du Sud, Meriadeg Le Gouil coordonne un projet qui vise à retrouver les réservoirs animaux du virus en Thaïlande et au Laos. Une enquête de longue haleine.

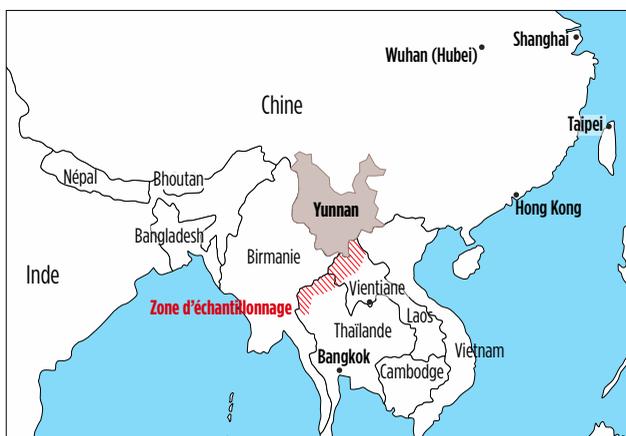
La Recherche Dès la fin janvier, les chauves-souris sont présentées comme réservoir probable du SARS-CoV-2. Pourtant, le scénario du passage à l'homme reste encore très flou. Que manque-t-il ?

Meriadeg Le Gouil L'intermédiaire entre l'homme et la chauve-souris n'est toujours pas connu ! Très vite, en effet, le génome du SARS-CoV-2 a été séquencé par les virologues chinois et comparé à d'autres génomes. L'équipe de Zhengli Shi, à l'Institut de virologie de Wuhan, a ainsi montré qu'un autre coronavirus, le RaTG-13, prélevé en 2013 chez

une chauve-souris de l'espèce *Rhinolophus affinis* dans la province du Yunnan, avait un génome similaire à 96 % (1). D'autres études corroborent cette proximité entre ce virus et le SARS-CoV-2. Mais, s'il est fort probable que le SARS-CoV-2 ait émergé d'une espèce de chauve-souris, comme ce fut le cas lors de l'épidémie de 2003, nous n'avons à ce jour aucune donnée sur les animaux vendus sur les marchés de Wuhan ou du sud de la Chine.

Le virus ne peut-il pas passer directement de la chauve-souris à l'homme ?

Une transmission directe est possible, mais ce scénario est



peu probable : pour qu'un virus fasse un saut d'espèce, il est nécessaire d'avoir des contacts rapprochés et très fréquents. Or, à ma connaissance, ce n'est pas le cas. À moins qu'on ne découvre qu'il y a eu des trafics intenses de ces espèces de chauves-souris ces dernières années.

Plusieurs études ont montré que le pangolin héberge des coronavirus, dont un qui possède un génome assez proche du SARS-CoV-2. Ne serait-il pas l'intermédiaire ?

Nous savions avant cette épidémie que les pangolins hébergeaient différents coronavirus. Il n'est donc pas étonnant qu'on en trouve chez eux. Et,

en effet, des scientifiques ont découvert que l'un de ces virus a des similarités de l'ordre de 91 % avec le génome du SARS-CoV-2 (2). Ce qui intrigue surtout, c'est la séquence génétique qui code la protéine S, la protéine de surface qui permet au virus de se lier aux cellules hôtes, notamment au récepteur ACE2, qui est très proche de celle du virus responsable de l'épidémie. Les auteurs suggèrent que des recombinaisons entre coronavirus du pangolin et de la chauve-souris ont eu lieu. Mais, il est tout aussi probable qu'il y ait tout simplement eu une convergence évolutive entre ces deux virus. Mon expérience de terrain, et notamment lors de mes

SES DATES

2008 Il soutient sa thèse « Coronavirus, CoV-Sras et autres virus de la chirofaune de Thaïlande : détection, caractérisation et écologie ».

2009-2016 Postdoctorat à l'Institut Pasteur, à Paris.

2014 Responsable scientifique du projet ANR Epicorem.

2016 Il poursuit ses recherches sur les coronavirus à l'université de Caen-Normandie et dans le laboratoire de virologie du CHU de Caen, dirigé par Astrid Vabret.

2018 Il est invité par la virologue Zhengli Shi, spécialiste des coronavirus, à présenter ses travaux sur les bêta-coronavirus chez certaines espèces de chauves-souris lors d'une conférence sur les virus émergents organisée à Wuhan.

2020 Il s'apprête à partir enquêter en Asie pour DisCoVER, l'un des 86 projets de recherche soutenus par l'ANR.



▲ (1) Meriadeg Le Gouil (à g.) et Sébastien Puechmaille (de l'université de Montpellier) à l'entrée d'une grotte où gîte une colonie de chauves-souris dans la province de Chachoengsao, en Thaïlande, en novembre 2009. (2) et (3) Collecte de prélèvements non invasifs sur chauves-souris dans une grotte de la province de Kanchanaburi, en Thaïlande, en décembre 2009.

travaux sur l'épidémie de Sras en 2002-2003, m'oriente vers un autre animal présent sur les marchés : la civette masquée, *Paguma larvata*. Ce petit carnivore était consommé en Chine et a été identifié comme étant l'intermédiaire pour le passage du SARS-CoV entre l'homme et les chauves-souris. Mais il faudrait le vérifier sur le terrain.

C'est l'objet du projet DisCoVER, que vous avez proposé à l'Agence nationale de recherche ?

Exactement. Depuis le début de cette épidémie, je souhaite

remonter aux sources de cette nouvelle émergence d'un coronavirus chez l'homme. Dans l'idéal, j'aurais rêvé disposer des prélèvements viraux issus des animaux présents sur les marchés du sud de la Chine dans les quatre ou cinq mois précédents les débuts de l'épidémie, afin de démêler les processus d'évolution génétique des coronavirus à l'origine de l'épidémie. Ce n'est plus possible. Cependant, en allant sur le terrain pour repérer la prévalence et la diversité des coronavirus circulant dans la faune sauvage

en Asie du Sud, nous pouvons obtenir des indices et un faisceau d'arguments solides pour mieux comprendre ce qui s'est produit. Pour cela, nous allons nous rendre au nord de la Thaïlande et du Laos, dans des zones où la faune, la flore et l'occupation humaine sont à peu près similaires à celles du sud de la Chine.

Vous n'envisagez pas d'investigations en Chine ?

La situation épidémique est encore très instable et il est bien trop tôt pour l'envisager dans des conditions sereines. Cela dit, nous avons construit notre projet d'étude sur un principe : la collaboration, et nous discutons avec tous nos collaborateurs asiatiques.

Le principe de collaboration vaut-il pour la Thaïlande et le Laos ?

Oui, ce principe gouverne tout notre programme de recherche ! Des institutions, des universités et des scientifiques de ces pays sont pleinement associés, décisionnaires et acteurs du projet, comme les universités de Mahidol et de Kasetsart à Bangkok, ou le Centre d'infectiologie Lao-Christophe Mérieux à Vientiane. Notre projet ne vient pas de nulle part : il s'appuie sur des collaborations et des réseaux de chercheurs déjà existants. Ainsi, nous l'avons conçu avec la virologue Astrid Vabret, de l'université Caen-Normandie, ●●●

“ NOUS N'AVONS À CE JOUR AUCUNE DONNÉE SUR LES ANIMAUX VENDUS SUR LES MARCHÉS DE WUHAN ”



▲ Pour le SARS-CoV, la civette masquée (à droite, sur un marché) a été l'intermédiaire entre l'homme et la chauve-souris. Elle pourrait avoir joué ce même rôle pour le SARS-CoV-2.

●●● chez qui je travaille ; Éric Leroy, de l'Institut de recherche pour le développement (IRD) à Montpellier, virologue et vétérinaire qui a longtemps étudié les modalités de transmission des filovirus comme Ebola, en Afrique centrale ; Serge Morand, du CNRS, écologue de la santé et parasitologue qui travaille en Thaïlande depuis une dizaine d'années sur la circulation des pathogènes entre les espèces en rapport avec les activités humaines et l'utilisation des sols ; et Éric Deharo, pharmacien qui représente l'IRD au Laos. Chacun a apporté ses compétences et ses réseaux de partenaires. Au Laos et en Thaïlande, nous travaillons aussi avec des scientifiques qui ont l'habitude des thématiques d'écologie de la santé similaires dans leur région. Cela signifie qu'on ne va pas juste faire des prélèvements et revenir en France, dans nos tours d'ivoire européennes. Nous respectons le protocole de Nagoya sur l'accès aux ressources génétiques et le partage juste et équitable des avantages découlant de leur utilisation. Cet état d'esprit est important pour la réussite du projet à moyen terme.

Concrètement, comment se fait l'enquête de terrain ?

Nous allons sélectionner cinq sites dans le nord de la Thaïlande et le nord du Laos, où nous sommes susceptibles de retrouver les espèces de chauves-souris qui nous intéressent, celles qui pourraient héberger des coronavirus cousins du SARS-CoV-2. Sur ces sites, des prélèvements non invasifs seront pratiqués. En effet, nous n'avons pas besoin de les attraper pour déterminer si elles sont porteuses de virus. À partir de prélèvements de guano, nous sommes en mesure de remonter à l'ensemble de la vie de l'animal. Nous en déduisons énormément d'informations, dont la présence de coronavirus. Ainsi, nous n'aurons pas d'impact sur les populations sauvages de chauves-souris. Sur ces sites, nous nous intéresserons ensuite aux autres animaux, comme les carnivores

et les rongeurs, qui peuvent manger les chauves-souris ou être en contact avec leurs excréments. Des prélèvements d'échantillons de leurs fèces seront faits pour découvrir les virus que ces animaux hébergent. Petit à petit, le champ d'investigation est élargi pour arriver aux hommes, aux animaux domestiques ou semi-domestiques qu'ils élèvent, aux animaux sauvages qu'ils chassent. À partir de ces données, nous aurons un aperçu des virus présents et de ceux qui circulent entre les espèces animales. Nous obtiendrons le pourcentage d'animaux infectés avec des coronavirus. À l'aide des techniques de séquençage, nous étudierons finement leur diversité génétique et leurs liens phylogénétiques, et nous découvrirons sans doute des cousins du SARS-CoV-2. Mais le projet ne s'arrête pas à des aspects purement virologiques.

C'est-à-dire ?

Afin d'écrire le scénario de l'émergence de virus chez l'homme, il faut s'inscrire dans le temps et dans l'espace : voir si ces virus que l'on va détecter évoluent, changent, et à quelle vitesse ils changent. Analyser quelles sont les fréquences de passage entre les espèces ou la probabilité de passage entre les espèces. Ensuite, il est nécessaire d'inscrire cette analyse dans l'écologie d'un milieu : voir si on peut faire des liens entre les comportements des animaux, la fréquence de rencontre, leur vie, ce qu'on appelle les traits d'histoire de vie en écologie. Nous devrions ainsi disposer d'une vision globale de la distribution et de la diffusion de ces virus.

Et les hommes ?

Bien sûr, nous allons nous intéresser aux hommes et à leurs activités. Le projet comprend une dimension sociale et écologique. Pour évaluer le potentiel d'émergence chez l'homme des virus que nous allons détecter, nous devons construire un modèle qui intègre les données virologiques, mais aussi des données socioécologiques. Nous voulons montrer à quel point le facteur humain est déterminant dans ces

“ GRÂCE AU SUIVI, NOUS POURRONS CARACTÉRISER LES CHANGEMENTS DANS LES POPULATIONS DE VIRUS ET LA VITESSE DE CES CHANGEMENTS ”

problématiques d'émergence. Il faut prendre en compte les densités de population, leurs mouvements, observer l'utilisation et l'exploitation de la faune sauvage, les interactions sur des marchés de faune sauvage, mais aussi l'exploitation des sols. Les modes de culture sont un paramètre extrêmement important en écologie, dans les études de biodiversité, et également en biologie de la conservation. Par exemple, en termes de diversité et de fonctionnement des espèces, y compris les micro-organismes qui sont hébergés dans cette biodiversité, il ne se passe pas la même chose dans une forêt que dans une monoculture, ni dans une banlieue ou

dans une ville. Et évidemment il faut comprendre le continuum entre la forêt et la ville. À cette complexité s'ajoute une dimension temporelle : on ne peut pas comparer la France, qui a perdu 80 % de sa forêt en quatre ou cinq siècles, avec la Thaïlande, où cela s'est fait en quelques dizaines d'années. Cela n'a pas les mêmes conséquences sur la biodiversité, et notamment sur le fonctionnement et l'évolution des micro-organismes.

Combien de temps dure votre programme ?

Le projet DisCoVER est financé pour dix-huit mois. Le calendrier est serré. Il faut bien comprendre que nous allons faire des allers-retours. Il y a

un temps pour les premières collectes sur les cinq sites sélectionnés par pays. Puis, en fonction des virus découverts, nous allons faire un suivi sur trois des cinq sites par pays. Ce suivi est essentiel pour la dimension temporelle : être capable de caractériser les changements dans les populations de virus et la vitesse de ces changements. C'est un aspect assez nouveau dans les programmes de recherche. Jusqu'ici, il y avait peu de cette culture du *monitoring*, d'un suivi à long terme couplé à des analyses très poussées. Mais c'est la condition si l'on veut être capable de tirer des conclusions les plus précises possible sur l'état d'un système

biologique en mouvement. Les choses changent en permanence, en fonction des saisons, au fil des années, et il est nécessaire de les appréhender sur le long terme. Nous verrons s'il est possible de prolonger notre programme de recherche. Toutefois, pour le moment, l'urgence est d'aller sur place.

Quand partez-vous ?

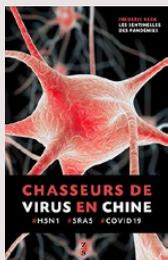
Nous devons partir avec une équipe de trois scientifiques en septembre (un membre du projet est déjà sur place). Mais si nous pouvons y aller plus tôt, nous le ferons.

Propos recueillis par Mathias Germain

(1) P. Zhou et al., *Nature*, 579, 270, 2020.

(2) T. T.-Y. Lam et al., *Nature*, doi: 10.1038/s41586-020-2169-0, 2020.

Les Sentinelles des pandémies Frédéric Keck



Frédéric Keck, *Zones sensibles*, à paraître le 6 juin, 240 p., 20 €.

Les virologues sont les « *chasseurs-cueilleurs* » des temps modernes. La comparaison de l'anthropologue Frédéric Keck, directeur de recherche CNRS au laboratoire d'anthropologie sociale de l'École des hautes études en sciences sociales, paraît étrange à première vue. Elle ne l'est plus après la lecture de son dernier livre, où elle constitue un fil rouge. En effet, à l'image de nos ancêtres de la préhistoire, ces scientifiques se comportent comme de véritables chasseurs avec leur « gibier » : ils suivent les traces des virus et maladies infectieuses, traquent leurs origines, tentent de deviner la manière dont ils évoluent et s'adaptent, mesurent les effets - le plus souvent invisibles - qu'ils ont sur d'autres êtres et sur leur environnement, etc.

Frédéric Keck a concentré ses enquêtes ethnographiques sur Hong Kong, Taïwan et Singapour. Là-bas, l'attention de ces « *chasseurs-cueilleurs des temps modernes* » se porte surtout sur les infections d'origine aviaire. Parce que ces territoires ont été affectés par l'épidémie de syndrome respiratoire aigu sévère (Sras) en 2003. Parce qu'ils ont investi dans les techniques de préparation et de détection précoce des épidémies de grippe aviaire : poulets sentinelles (qui avertissent les éleveurs de la présence de virus dans les élevages), simulations d'abattage

des volailles ou d'évacuation des patients, stockage des vaccins et des antiviraux, etc. Parce qu'ils se situent aux frontières de la Chine, un pays où « *le nombre de volailles domestiques a dramatiquement augmenté au cours des quarante dernières années* », « *dont les conditions de vie produisent de nouvelles pathologies* », et moins enclin - du moins jusqu'à récemment - à collaborer avec le reste du monde.

Dans cette traque, les ornithologues et les observateurs d'oiseaux amateurs - des « *chasseurs* » à leur manière, eux qui se mettent dans la peau des volatiles qu'ils guettent pour mieux les observer -, mais aussi les vétérinaires, sont également des acteurs critiques. Le livre met bien en évidence leur rôle clé. En offrant un décryptage détaillé des rouages de leur alliance avec les scientifiques, Frédéric Keck - qui vient de se voir attribuer une aide ANR Flash pour son projet, baptisé RegWet, d'« *étude ethnographique sur la perception des risques zoonotiques après la crise de Covid-19* » - montre en quoi cette union remet en question les pratiques de santé publique actuelles. Surtout, il invite - exhorte - à renouer une relation plus solidaire avec la nature et les animaux qui l'habitent.

Vincent Glavieux

Technologie
quantique
**LUMIÈRE
COMPRIMÉE**

Deux équipes ont montré la réduction du bruit quantique affectant la mesure de signaux lumineux, quelle que soit la fréquence. Les systèmes de lumière « comprimée » existaient déjà, mais ne fonctionnaient qu'à haute fréquence.

Y. Zhao et al., *PRL*, 124, 171101, 2020 ; L. McCuller et al., *PRL*, 124, 171102, 2020.

**1000
ANNÉES-
LUMIÈRE**

CE SERAIT LA DISTANCE qui nous sépare du trou noir le plus proche. Des astronomes pensent qu'un tel astre invisible de quatre fois la masse du Soleil est responsable des orbites particulières des deux étoiles du système HR 6819.

T. Rivinius et al., *A&A*, 637, L3, 2020.

Physique
HÉLIUM

« PIONIQUE »

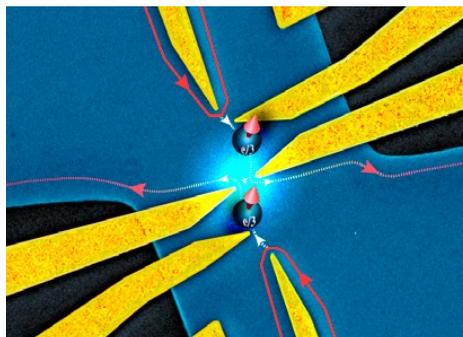
En bombardant de l'hélium avec des pions, particules composées de deux quarks, on a obtenu des atomes où un des électrons de l'hélium était remplacé par un pion. L'observation de la transition entre deux états a confirmé l'existence de cet atome exotique qui se désintègre en quelques nanosecondes, durée relativement longue pour ce type de système.

M. Hori et al., *Nature*, 581, 37, 2020.

Physique

De nouvelles propriétés découvertes chez les anyons

Une expérience met en évidence le comportement hybride des anyons, des quasiparticules qui n'existent que dans les systèmes à deux dimensions.



▲ Vue au microscope électronique de l'expérience, où est symbolisé le trajet suivi par les anyons.

Dans le monde des particules élémentaires, il existe deux catégories : les grégaires (les bosons) et les individualistes (les fermions). Une expérience confirme aujourd'hui qu'il existe une autre catégorie d'objets, les anyons, au comportement hybride (1). La dichotomie entre fermions et bosons vient du fait que deux particules quantiques identiques sont indiscernables : échanger l'une et l'autre équivaut au même système. Pour satisfaire cette symétrie lors d'un tel échange, la phase de la fonction d'onde (l'objet mathématique qui décrit les particules quantiques) ne peut prendre que deux valeurs : 0 (pour les bosons) ou π (pour les fermions). Mais cette contrainte sur la phase est valable à trois dimensions.

Corrélations négatives

À deux dimensions, les anyons peuvent exister. Attention, il ne s'agit pas de particules élémentaires mais de « quasiparticules » : « Lorsqu'un ensemble d'électrons interagissent fortement, leurs mouvements collectifs complexes peuvent être décrits par le mouvement d'objets plus simples, appelés quasiparticules. C'est un peu comme décrire la houle sur l'océan par des vagues, plutôt que par l'addition du mouvement de toutes les molécules d'eau », image Gwendal Fève, physicien au laboratoire Pierre-Aigrain (ENS Paris). De tels anyons peuvent apparaître lorsqu'un gaz

d'électrons se trouve confiné dans deux dimensions, à basse température, et sous fort champ magnétique. Il se produit alors un phénomène appelé « effet Hall quantique fractionnaire ». « Fractionnaire » car les électrons sont regroupés dans le même niveau d'énergie du système, dont seule une fraction est remplie. Les anyons qui émergent alors possèdent des propriétés plus exotiques que les électrons qui les composent : leur charge électrique est une fraction de la charge des électrons, tout comme leur phase d'échange est une fraction de celle des électrons, ce qui les place entre les bosons et les fermions.

Si la charge des anyons a été mesurée dans les années 1990, leur comportement hybride s'est révélé plus délicat à mettre en évidence. Gwendal Fève et ses collègues ont réalisé une expérience proposée en 2016 (2). Placée dans un fort champ magnétique (14 teslas), une structure de matériaux semiconducteurs piège les électrons à deux dimensions. Grâce à des électrodes, les chercheurs génèrent, de façon probabiliste, deux courants d'anyons et les guident l'un vers l'autre. Après leur rencontre, deux sorties s'offrent aux anyons, à l'issue desquelles l'équipe mesure de façon croisée les fluctuations des courants électriques. Si les particules se comportaient comme des électrons individuels – des fermions, donc –, elles s'esquiveraient chacune par un chemin différent et les deux courants électriques fluctueraient à la hausse. Mais les chercheurs ont remarqué des corrélations négatives : lorsque le courant est plus élevé que la moyenne dans une voie, il est simultanément plus faible dans l'autre. Le signe que les particules ont tendance à sortir du même côté, comme les bosons, mais sans que cela soit systématique. « Les résultats sont en très bon accord avec nos prédictions pour les anyons », commente Bernd Rosenow, un des coauteurs de l'article de 2016. C'est à ce jour la signature la plus claire du caractère grégaire – mais pas trop – des anyons.

Sylvain Guilbaud

(1) H. Bartolomei et al., *Science*, 368, 173, 2020.

(2) B. Rosenow et al., *Phys. Rev. Lett.*, 116, 156802, 2016.

Astrophysique

UNE ÉTONNANTE DANSE ASYMÉTRIQUE

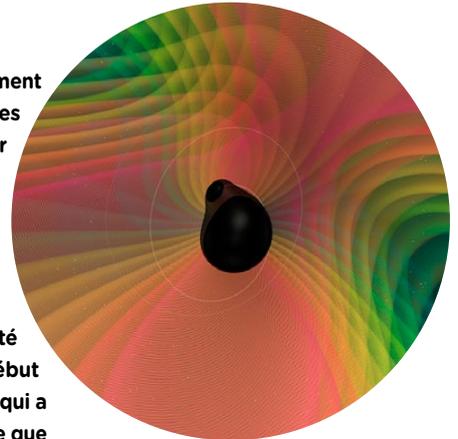
Les interféromètres Ligo (États-Unis) et Virgo (Italie) ont vu passer une onde gravitationnelle inhabituelle (1). Les deux trous noirs dont la fusion a engendré cette onde - baptisée GW190412 - étaient en effet de masses très différentes : 30 masses solaires pour l'un et 8 pour l'autre. Une telle danse asymétrique module les ondes gravitationnelles émises lors de la coalescence. Cette modulation se manifeste par la production d'harmoniques particuliers dans les fréquences du signal. Une découverte qui « *confirme les prédictions de la relativité générale pour les binaires de masses différentes* », analyse Éric Gourgoulhon, directeur de recherche CNRS à l'observatoire de Paris.

En outre, elle permet de déterminer séparément l'inclinaison du plan de rotation du système formé par les deux trous noirs et sa distance, deux quantités habituellement liées. Ainsi, la distance la plus probable est de 2,3 milliards d'années-lumière, ce qui signifie que la fusion s'est produite dans

une galaxie fort lointaine. Autre renseignement inféré de cette asymétrie : le plus massif des trous noirs devait avoir une forte rotation sur lui-même. Son spin - mesure de sa rotation intrinsèque - vaut $0,43 [+0,16 -0,26]$ (un trou noir qui ne tourne pas a un spin nul et le spin maximal autorisé par la relativité générale est de 1).

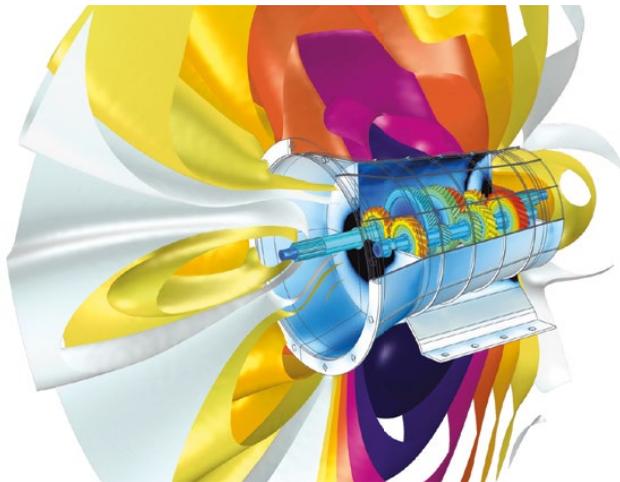
Notons que le passage de GW190412 a été repéré douze jours seulement après le début de la troisième campagne d'observations, qui a commencé le 1^{er} avril 2019 et n'a été publiée que maintenant. En moins d'un an de cette phase d'observation à haute sensibilité, 56 signaux potentiels d'ondes gravitationnelles ont été détectés. Même si cette campagne a été interrompue le 27 mars 2020 pour cause de pandémie, on peut s'attendre à des annonces dans les mois à venir, à mesure que les données enregistrées seront traitées et analysées. **Philippe Pajot**

(1) Collaborations Ligo et Virgo, arXiv:2004.08342, 2020.



▲ Simulation numérique d'une fusion de trous noirs avec des masses asymétriques, à l'origine de l'onde gravitationnelle GW190412.

Des simulations de tests de bruit et vibrations que vous pouvez voir et entendre !



Visualisation du niveau de pression acoustique à l'extérieur de la boîte de vitesse et des contraintes de von Mises induites par les vibrations dans son carter.

L'approche la plus efficace pour réduire le rayonnement sonore d'une boîte de vitesses consiste à effectuer une analyse vibro-acoustique pour savoir comment en améliorer la conception. Les essais de bruit, vibrations (NVH) sont une partie importante du processus de conception et peuvent être simulés avec un logiciel multiphysique.

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des composants et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche. Découvrez comment vous pouvez l'appliquer pour la modélisation des vibrations et du bruit des boîtes de vitesses.

comsol.blog/NVH-simulation

 COMSOL

Géophysique

AZOTE MANTELLIQUE

L'azote provenant de magmas formés dans le manteau terrestre n'a pas la même composition isotopique que celui de l'atmosphère. Ce dernier ne vient donc pas d'un dégazage du manteau. Des mesures isotopiques précises de l'azote pourraient aider à prévoir le réveil des volcans, estime une équipe de géophysiciens.

J. Labidi *et al.*, *Nature*, 580, 367, 2020.

« Les mois perdus pour la recherche scientifique auront des effets disproportionnés s'ils ne sont pas compensés »

Des chercheurs, des associations de jeunes chercheurs et des sociétés savantes

demandent au chef de l'État, dans une tribune parue le 28 avril dans *Le Monde*, de lancer au plus vite un plan d'urgence pour la recherche scientifique.

Zoologie

FEMELLES ALLIGATORS

D'ici à 2100, 98 % des bébés alligators pourraient être des femelles, selon une équipe américaine.

En cause: le réchauffement climatique, qui augmente la température des nids.

Or une température élevée (supérieure à 33,5 °C) accroît le ratio de femelles parmi les larves.

S. L. Bock *et al.*, *Proc. R. Soc. B*, doi:10.1098/rspb.2020.0210, 2020.

Archéométrie

Dater les vestiges de poterie grâce à leurs résidus alimentaires

Des pots issus de sites archéologiques ont été datés avec précision grâce à l'analyse de la teneur en carbone 14 des acides gras retenus dans leurs pores.

Depuis plus d'un siècle, les vestiges de poterie sont utilisés pour dater les sites archéologiques où ils sont découverts. Hélas, il est difficile de déterminer l'âge de ces artefacts sur des sites antérieurs à l'Antiquité car leurs formes sont moins distinctives et les indices contextuels,



« Ce bol datant de 6000 ans, découvert sur le site de Sweet Track, en Angleterre, a pu être daté par la nouvelle technique.

tels que la monnaie ou les textes, sont plus rares, voire inexistantes. Une autre option consiste à utiliser la datation au carbone 14 d'ossements ou d'autres restes organiques trouvés à proximité, mais l'idéal serait de dater les objets directement. C'est ce que permet une technique développée par Emmanuelle Casanova, de l'université de Bristol, et ses collègues (1).

La méthode consiste à chercher des résidus de nourriture présents dans ces pots, en particulier des acides gras provenant de viandes ou de lait, par exemple. Ces acides gras sont d'abord isolés et purifiés par la technique de chromatographie en phase gazeuse. Ensuite, leur teneur en carbone 14 est analysée par spectrométrie de masse par accélérateur, qui détecte et quantifie les éléments, même en très faibles concentrations.

Afin de vérifier la fiabilité de cette méthode de datation, les auteurs de l'étude l'ont appliquée à des objets dont ils connaissaient déjà l'âge par le biais d'autres approches, et dont certains remontent à quelque 8000 ans. Ils ont à chaque fois obtenu des résultats d'une précision surprenante, de l'ordre de seulement quelques dizaines d'années dans certains cas, et similaires aux âges prédéterminés.

Pour Ian Bailiff, professeur d'archéologie à l'université de Durham, au Royaume-Uni, « cette technique est cruciale, car elle va permettre de dater non seulement les différents vestiges de poterie, mais aussi l'époque précise de leur utilisation, avec une fiabilité accrue ».

William Rowe-Pirra

(1) E. Casanova *et al.*, *Nature*, 580, 506, 2020.

Chimie

Le manganèse comme agent de contraste

Un produit de contraste constitué de manganèse enfermé dans un ligand synthétique se montre performant en termes d'efficacité et d'innocuité.

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) permet d'obtenir des images de l'intérieur du corps; elle donne ainsi accès à des informations diagnostiques qui, autrement, resteraient inaccessibles. Élément clé de ce protocole: le produit de contraste, qui autorise la

visualisation nette d'un organe ou d'une tumeur. Depuis plusieurs décennies, on a recours aux complexes de gadolinium, considérés comme l'un des médicaments de diagnostic les plus sûrs. Mais des études ont pointé leur possible nocivité, en particulier chez les insuffisants rénaux chroniques (1). La

recherche de substituts est donc devenue un objectif majeur. Des chimistes du centre de biophysique moléculaire (université d'Orléans) et de l'institut pluridisciplinaire Hubert-Curien (université de Strasbourg) viennent d'en créer un à base de manganèse, baptisé MnL₁ (2).

Pour parvenir à ce résultat, ils ont dû résoudre une double équation. D'un côté, faire en sorte que le manganèse ne puisse pas se répandre dans le milieu où il est utilisé. En effet, l'IRM nécessitant une grande quantité d'agent de contraste, une telle fuite pourrait se révéler toxique. De l'autre, imaginer un moyen de lier au complexe de manganèse une molécule d'eau, pour une meilleure efficacité.

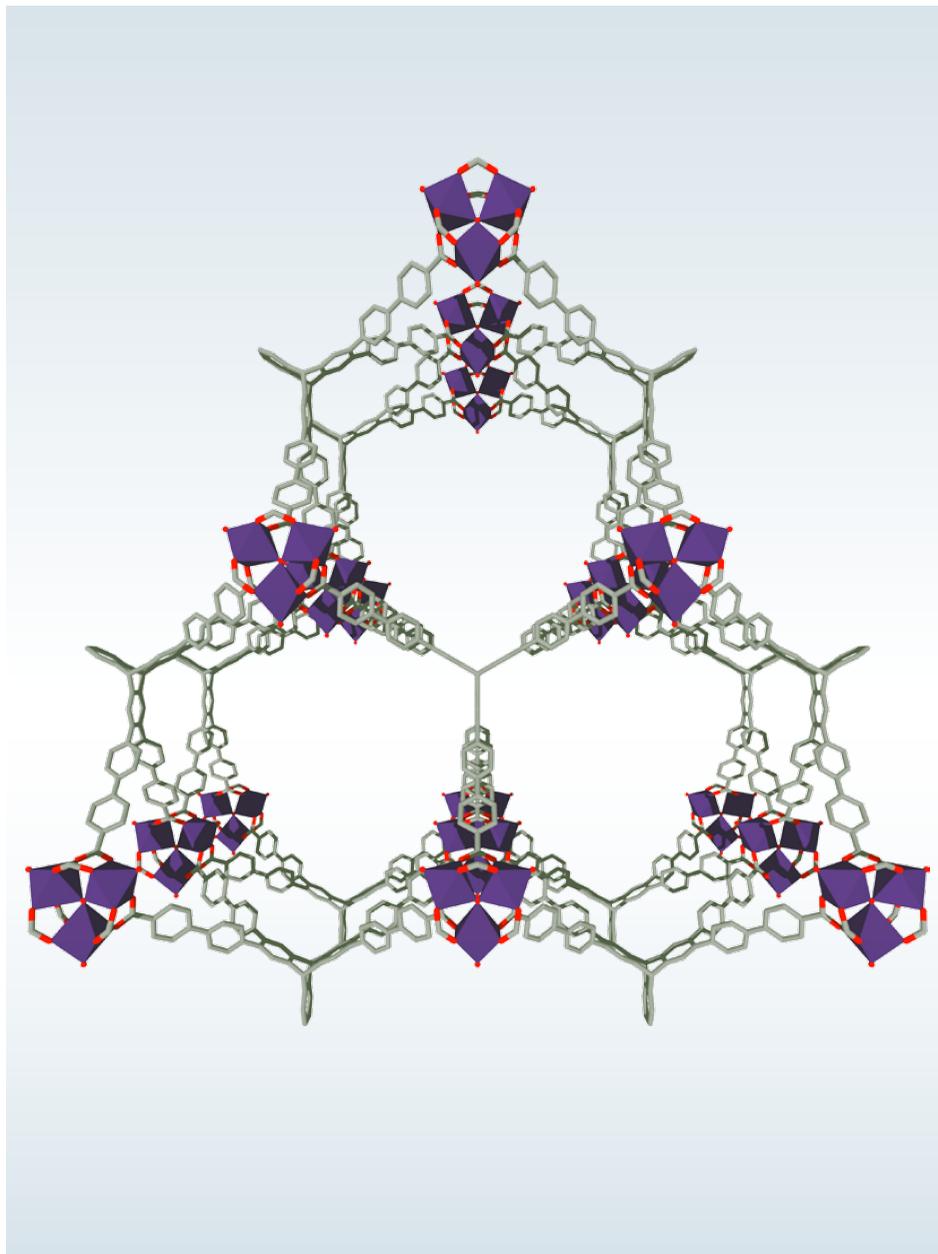
Le choix des bispidines

La solution, les chimistes l'ont trouvée chez les bispidines. Ce groupe de ligands – des molécules capables de se lier, de manière réversible, à une autre, et de jouer pour celle-ci un rôle de stabilisation structurale, par exemple – est connu pour sa grande affinité avec les ions métalliques mais, curieusement, il n'avait pas encore été testé avec le manganèse. Bonne pioche : la famille des bispidines comporte un membre que l'on peut synthétiser pour qu'il emprisonne parfaitement le manganèse, tout en accueillant en son sein la molécule d'eau indispensable à l'efficacité.

Les tests ont confirmé la très bonne tenue de MnL_1 : il reste intact 140 jours environ, contre quelques dizaines d'heures pour le meilleur agent de contraste existant à base de manganèse, et son efficacité est supérieure de 33 %. De plus, des expériences in vivo sur des souris ont montré qu'il était éliminé très rapidement par les reins. **Vincent Glavieux**

(1) T. Grobner, *Nephrol. Dial. Transplant.*, 21, 1104, 2006.

(2) E. Toth et al., *Angew. Chem. Int. Ed.*, doi:10.1002/anie.202003685, 2020.



Matériaux

Le plein d'hydrogène

Faire rouler les voitures à l'hydrogène est un vieux rêve qui se heurte à la maîtrise de son stockage. En effet, pour tenir sous un capot tout en limitant les risques d'explosion, l'hydrogène doit être comprimé dans la limite de 100 fois la pression atmosphérique. Pour augmenter la quantité d'hydrogène stockée avec un volume constant tout en respectant cette limite, une solution est d'utiliser des matériaux très poreux. Une équipe américaine a justement mis au point un nouveau matériau ultra-poreux - le NU-1501-Al - consistant en des ions aluminium formant une structure triangulaire. La capacité énergétique de ce matériau dépasse de trois fois l'objectif fixé par le département américain de l'Énergie pour les piles à hydrogène.

Gautier Cariou

Z. Chen et al., *Science*, 368, 297, 2020.

Génétique

UN GÈNE DE TAILLE

Pourquoi la population péruvienne est-elle l'une des plus petites au monde?

Une étude menée sur plus de 3 000 personnes vivant à Lima, au Pérou, a mis en évidence la présence d'un variant génétique qui en serait responsable.

Les personnes possédant deux versions de ce variant sont, en moyenne, plus petites de 4,4 cm.

S. Asgari et al., *Nature*, doi:10.1038/s41586-020-2302-0, 2020.

Climat

CHALEUR TORRIDE

Au cours des 50 prochaines années, 1 à 3 milliards de personnes pourraient vivre dans des conditions climatiques proches de celles du Sahara actuellement, avec une température moyenne annuelle de 29 °C – contre 13 °C en moyenne depuis 6 000 ans pour la majorité de la population.

C. Xu et al., *PNAS*, doi:10.1073/pnas.1910114117, 2020.

Écologie

FOURMIS INGÉNIEURES

Une étude menée dans la plaine de la Crau, dans les Bouches-du-Rhône, montre que la fourmi moissonneuse accélère la résilience végétale sur les prairies dégradées. Amélioration de la fertilité des sols, redistribution et stockage des graines et augmentation de la biomasse végétale à proximité des nids témoignent de leur rôle d'ingénieures écologiques.

T. De Almeida et al., *Biological Conservation*, doi:10.1016/j.biocon.2020.108547, 2020.

Biologie

Des bactéries alliées des cultures

En adaptant une nouvelle technologie à l'analyse des interactions entre bactéries bénéfiques et plantes, une équipe américaine vient de donner un coup de pouce à la compréhension de ces mécanismes, mais aussi à l'agriculture biologique.



▲ L'action d'une bactérie bénéfique (*Herbaspirillum*, à dr.) a été testée sur une plante sauvage, la sétaires verte.

L'augmentation des rendements agricoles, ces dernières décennies, doit beaucoup aux engrais minéraux azotés. Mais les impacts environnementaux et climatiques de ces intrants ne sont plus à prouver. Réduire leur utilisation, tout en maintenant une productivité élevée, est un défi majeur de l'agriculture (lire p. 4). Une solution? Coopérer avec des bactéries du sol capables de fixer l'azote atmosphérique. Inoculer ces micro-organismes dans les cultures (blé, maïs, légumes...) pourrait fournir environ 10 % de l'azote nécessaire à leur croissance, et encore plus dans le cas de bactéries super-accumulatrices!

L'existence de ces « bactéries favorisant la croissance des plantes » (BFPC) est connue depuis plusieurs décennies, mais celles-ci peinent à prendre place dans l'arsenal agricole. En cause, une barrière à l'usage agricole commune à tous les agents biologiques: leur efficacité est variable selon les parcelles, micro-organismes et cultures considérés; et leur application est moins facile que celle des engrais synthétiques, disponibles en granulés parfaitement dosés et calibrés pour un épandage mécanique.

Pour répondre à ces défis et promouvoir l'utilisation des BFPC, beaucoup reste à faire. À

commencer par identifier précisément les modifications qu'elles provoquent chez les plantes qu'elles colonisent. En effet, « les impacts des bactéries bénéfiques décrits dans la littérature sont généralement moyennés à l'échelle d'une plante, d'un système racinaire entier, et donc souvent de faible amplitude », détaille Claire Prigent-Combaret, directrice de recherche CNRS à la tête de l'équipe rhizosphère de l'UMR d'écologie microbienne de Lyon. Or, notamment

lorsque les bactéries sont dites « endophytes », c'est-à-dire qu'elles pénètrent à l'intérieur du végétal pour y faire leur cycle de vie, la colonisation des racines par les BFPC n'est pas uniforme. Pour rendre compte des effets réels de l'inoculation, il faut donc analyser les changements métaboliques in situ.

L'équipe de Gary Stacey, de l'université du Missouri, s'est attelée à cette tâche (1). Elle a pour cela fait appel à une technologie de pointe, l'ionisation par électropulvérisation en ablation au laser-spectrométrie de masse. Celle-ci permet de prélever un fragment racinaire au niveau exact de la colonie bactérienne, localisée grâce à une protéine fluorescente. Vaporisé par le laser, l'échantillon est ionisé dans la foulée, et analysé par un spectromètre de masse associé. Reste à relier les molécules identifiées à leurs voies métaboliques, des chaînes de réactions chimiques essentielles pour la vie de la plante et décrites dans la littérature scientifique.

Les chercheurs ont ainsi confirmé que l'inoculation des BFPC dans les plantes avait un effet drastique, bien que local, sur la quantité d'un certain nombre de ces métabolites. Ceux-ci sont notamment impliqués dans la fixation de l'azote, ce qu'on met en relation avec le fait que les plantes ainsi traitées avaient mieux poussé que les plantes contrôle. Les chercheurs ont donc fait la preuve de l'intérêt de leur méthode, qui va « permettre de mieux comprendre les interactions positives entre bactéries et plantes », selon Claire Prigent-Combaret.

Aline Aurias
(1) B. J. Agtuca et al., *Mol. Plant Microbe Interact.*, 33, 272, 2020.



Étendre le prix du carbone européen aux importations d'électricité

En 2019, l'Union européenne (UE) s'est distinguée par une baisse record de 12 % des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) issues du secteur de l'électricité par rapport à l'année précédente. La même année, l'usage du charbon pour produire de l'électricité a diminué de 24 %. Cette performance résulte en partie de la hausse du prix du CO₂ sur le marché européen, passé de 6 euros en 2017 à 25 euros en moyenne en 2019. La tendance pourrait s'amplifier, puisque des pays comme la Grèce ou la Hongrie ont prévu de sortir du charbon, portant à une quinzaine le nombre d'États membres ayant prévu de le faire, selon un rapport des centres d'expertise Agora Energiewende et Ember (1).

TOUTEFOIS, si le contenu carbone de l'électricité produite sur le sol européen baisse, le tableau n'est pas si vert. Les importations d'électricité issue de pays frontaliers de l'Union européenne, ne tarifant pas ou peu les émissions de CO₂, augmentent à mesure que le prix du carbone sur le marché européen s'accroît. Ainsi, ces importations sont passées de 3 TWh en 2017 à 21 TWh en 2019. Cette électricité provient essentiellement de Russie (pour 38 %), d'Ukraine (pour 22 %) et des Balkans occidentaux (dont l'Albanie, la Bosnie-Herzégovine, le Kosovo, la Macédoine du Nord, le Monténégro ou la Serbie) (pour 19 %).

Dans une autre publication, les experts d'Ember calculent que 26 MtCO₂ ont été émises pour produire cette électricité importée, soit plus que les émissions annuelles de toutes les centrales à charbon italiennes (2). Si cette électricité avait été

produite en Europe, elle aurait émis environ 11 MtCO₂ de moins, car la production des pays importateurs est moins carbonée. De plus, si ces importations, valorisées à près de 1,6 milliard d'euros, avaient été soumises au marché carbone de l'UE, elles auraient procuré 630 millions d'euros au contribuable européen, une somme qui aurait pu être utilisée pour accompagner la transition énergétique.

Cette situation offre malheureusement des perspectives bien sombres. Les États européens soutiennent le développement des interconnexions électriques avec les pays limitrophes, dont la capacité devrait croître de 31 %. Les Balkans occidentaux,

efforts de lutte contre le réchauffement climatique. Investir dans de nouveaux systèmes énergétiques et être vertueux sur notre propre sol, tout en rejetant la responsabilité de nos émissions hors de nos frontières, serait un aveuglement contre-productif et coûteux. Si nous n'accompagnons pas la transition des pays frontaliers de l'UE vers une tarification du carbone, nous ne ferons que les inciter à accroître leurs capacités de production à base de charbon.

PAR AILLEURS, les exportations venant de ces « paradis du charbon » réduisent d'autant l'indépendance énergétique de l'UE, notamment par rapport à la Russie. Notons ici que cette dernière assure l'approvisionnement de pays comme la Grèce, qui paie cette électricité au prix fort.

Si nous ne voulons pas réduire en cendres nos ambitions climatiques, il est essentiel d'appliquer aux importations d'électricité un prix du carbone, par exemple avec un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières. Le Pacte vert (Green Deal) en discussion au niveau européen serait l'occasion d'introduire un tel dispositif (3). Voilà un bon moyen de peser sur la scène internationale, d'agir en cohérence avec nos ambitions et de contribuer à reconstruire l'économie européenne. ■

(1) Agora Energiewende et Sandbag, « The European Power Sector in 2019 », tinyurl.com/euro-power-sector-2019, mars 2020.

(2) Sandbag, « The Path of Least Resistance », tinyurl.com/path-least-resist, 2020.

(3) tinyurl.com/pacte-vert-pour-europe

Marie Dégremont est chercheuse associée au Centre de sociologie des organisations à l'Institut d'études politiques de Paris.

“
**Ne pas rejeter
la responsabilité
de nos émissions
hors de
nos frontières”**

par exemple, représentent 15 % de cette hausse. D'autres pays comme l'Égypte, la Tunisie ou Israël, qui n'ont pas mis en place de prix du carbone, devraient être connectés au réseau européen d'ici à 2025. Nos voisins ont prévu d'accroître de 53 %, soit 57 GW, leur capacité de production d'électricité à partir de charbon.

La transition vers une économie bas carbone suppose un recours accru à l'électricité, par exemple pour les transports, l'industrie ou le chauffage des bâtiments. Les « fuites de carbone » observées ces dernières années risquent d'anéantir nos

Entomologie

LES INSECTES PAS TOUS EN DÉCLIN



▲ Contrairement à leurs homologues terrestres, les insectes d'eau douce prospèrent (ici, une punaise d'eau).

Un recul global des populations d'insectes et d'araignées terrestres, de 9 % par décennie, soit 25 % en seulement 30 ans ; mais une augmentation d'environ 11 % par décennie des insectes et araignées d'eau douce : c'est la conclusion de la plus grosse méta-analyse réalisée à ce jour concernant ces invertébrés (1). Ses auteurs, le Néerlandais Roel van Klink et ses collègues allemands et russes, ont retenu les données de 166 études menées dans 1676 sites et 41 pays (principalement en Amérique du Nord, en Europe et en Russie). Toutes portaient sur une période d'au moins dix ans, et de plus de quinze ans pour la moitié d'entre elles ; et 50 % ont débuté après 1986.

Comment expliquer cette évolution divergente ? L'accroissement des populations d'eau douce pourrait refléter une amélioration de la qualité des eaux. Mais cette tendance ne saurait masquer le déclin des populations terrestres, en partie corrélé à l'urbanisation. D'une part car les milieux d'eau douce ne représentent que 2,4 % de la surface terrestre. D'autre part car, dans certaines régions, le déclin des populations terrestres s'accroît sur les périodes récentes. C'est globalement le cas en Europe, depuis 2005. Et dans certains lieux, le déclin des insectes terrestres est bien supérieur à 9 % par décennie.

Cécile Klingler

(1) R. van Klink et al., *Science*, 368, 417, 2020.

Archéologie

Des objets vikings du Moyen Âge mis au jour par la fonte des glaces

En fondant, les glaces du col de Lendbreen, en Norvège, ont révélé un trésor caché depuis des siècles : des artefacts vikings en parfait état de conservation.

Perché dans les hauteurs du massif du Jotunheimen, en Norvège, le col de Lendbreen a longtemps été prisonnier des glaces. Mais il aurait autrefois été une artère majeure pour les échanges commerciaux de la région, en particulier durant l'ère viking. En effet, la fonte des glaces a récemment permis la découverte par James Barrett, de l'université de Cambridge, et ses collègues, de plus d'un millier d'artefacts anciens en état surprenant de conservation, lesquels témoignent de l'importance de ce passage (1). Depuis la mise au jour du premier objet en 2011, le retrait progressif des glaces n'a cessé d'en révéler de nouveaux. Parmi les plus récentes



▲ Une raquette pour cheval découverte au col de Lendbreen en 2019.

trouvailles : des mitaines, des chaussures en cuir, des flèches à l'empennage intact, mais aussi des structures telles que des cairns en pierre et des restes de petits abris. La datation au carbone 14 d'une soixantaine de ces objets révèle que ce chemin a été emprunté pendant près d'un millénaire :

depuis l'âge de fer nordique, aux alentours du III^e siècle de notre ère, jusqu'à son abandon au XIV^e siècle. Toutefois, la plupart des objets datés remontent aux environs de l'an mil, au cœur de l'ère viking, lorsque le commerce et les déplacements dans la région étaient à leur apogée.

« La conservation spectaculaire de ces artefacts nous livre des informations uniques sur l'usage que nos ancêtres faisaient de tels cols », explique Unn Pedersen, archéologue à l'université d'Oslo.

En effet, la nature des objets découverts permet de déterminer qui empruntait ce passage. La présence de vestiges de fourrage et de produits laitiers laisse entendre que des fermiers franchissaient le col. Des fourrures et des ramures de rennes attestent de l'importance du col pour les marchands. Enfin, des raquettes à neige pour chevaux et du crottin montrent que ces animaux étaient utilisés lors de ces voyages.

« Hélas, ces découvertes, si extraordinaires soient-elles, sont aussi assez tristes, déplore Unn Pedersen, puisqu'elles résultent de la fonte des glaces engendrée par le réchauffement climatique... »

William Rowe-Pirra

(1) L. Pilø et al., *Antiquity*, 94, 437, 2020.

Paléogénétique

Comprendre Neandertal par ses héritiers

Grâce aux génomes de plus de 27 000 Islandais, des paléogénéticiens étudient des espèces humaines disparues à travers leur héritage génétique.

Faute d'ADN ancien abondant, la paléogénétique s'attaque à celui de nos contemporains. Une étude menée par l'université d'Aarhus, au Danemark, a extirpé des génomes de plus de 27 000 Islandais leur héritage archaïque (1). Elle a ainsi mis au jour la génétique de populations humaines disparues, un prisme bien plus puissant que l'étude d'une poignée d'individus archaïques.

En comparant ces données à celles de populations subsahariennes actuelles, considérées comme proches d'*Homo sapiens* (originaire d'Afrique) avant sa rencontre avec Neandertal (originaire d'Europe), les chercheurs ont identifié l'ADN non *sapiens*, dit archaïque. Entre 56 000 et 112 000 séquences semblent ainsi héritées d'espèces humaines disparues, soit 38 % à 48 % du génome moderne analysé. Si 84,5 % de ces séquences proviennent de Neandertal, la part héritée de l'homme de Denisova, autre hominine disparu, surprend : 3,3 %, au lieu des 2 % attendus chez des Européens. La différence s'explique-



▲ De 38 % à 48 % du génome analysé provient d'espèces disparues.

rait soit par le brassage entre les Denisoviens et les Néandertaliens, avant leur métissage avec les aïeux *sapiens* des Islandais, soit par une rencontre entre Denisoviens et ces ancêtres. « Cette dernière hypothèse implique que le territoire de Denisova a pu s'étendre à l'ouest de l'Altai, c'est très intéressant », relève Lluís Quintana-Murci, titulaire de la chaire de génomique humaine et évolution au Collège de France.

Enfin, 12 % des séquences archaïques ne correspondent à aucun génome connu. « Certaines sont de faux positifs : des séquences classées à tort comme archaïques. Je suppose qu'au moins 4 % tombent dans cette

catégorie, précise Laurits Skov, bio-informaticien à l'université d'Aarhus et premier auteur de l'étude. Les séquences restantes pourraient bien être d'origine archaïque. De plus en plus de génomes anciens sont séquencés, ce serait très intéressant si l'un d'eux expliquait ces fragments inconnus ! » On a donc peut-être la trace génétique d'une ou plusieurs espèces humaines européennes disparues et inconnues.

Et les chercheurs ont eu d'autres surprises. D'après leurs tests, seuls trois traits modernes semblent liés à des séquences d'origine néandertalienne : un variant qui réduit le risque de cancer de la prostate, un autre

qui confère une taille légèrement plus petite, et un dernier qui produit une coagulation sanguine un peu plus rapide. « Ces variants ont des effets très mineurs sur la santé et l'apparence humaine », reconnaît Laurits Skov.

Une résolution plus fine

En revanche, d'autres traits supposés hérités de Neandertal, comme les taches de rousseur ou la vulnérabilité à la schizophrénie, n'ont pas résisté à l'analyse. Des séquences non archaïques à proximité expliquent ces traits. « Notre étude intègre dix fois plus d'individus et des génomes entiers, quand les précédentes ne portaient que sur quelques millions de paires de bases, précise Laurits Skov. Nous avons également eu la chance de travailler avec les experts mondiaux des études d'association à l'échelle du génome. »

« Grâce à la quantité dantesque de génomes complets dont ils disposent, ils ouvrent une fenêtre sur ce qu'était Neandertal ou d'autres hominines disparus », conclut Lluís Quintana-Murci. En appliquant cette méthode à d'autres populations modernes, qui sait quelles histoires humaines pourraient être révélées. **Agnès Vernet**

(1) L. Skov et al., *Nature*, doi:10.1038/s41586-020-2225-9, 2020.

Planétologie

LES SIX COUCHES DE L'HEXAGONE



Le spectaculaire hexagone polaire de la planète Saturne possède au moins six couches superposées de brumes distinctes. D'épaisseur comprise entre 7 et 18 km, leur existence résulte probablement de la dynamique des jets dans l'hexagone.

A. Sánchez-Lavega et al., *Nat. Commun.*, 11, 2281, 2020.

« C'est le déclin de la biodiversité qui augmente les risques de transmission des pathogènes et l'émergence des maladies associées »

Un collectif de dix-sept scientifiques signataires d'une tribune parue dans *Le Monde*, le 7 mai 2020.

En bref

Dépistage
**QUESTIONNAIRE
EN LIGNE**

La jeune pousse parisienne Nabla, fondée en 2018 par des anciens du Centre de recherche sur l'intelligence artificielle de Facebook, sous la houlette de Yann LeCun, son Chief AI Scientist, a pour objectif de développer des outils IA pour la médecine personnalisée. Elle s'est tout naturellement mobilisée contre le Covid-19 et a développé un questionnaire en ligne. Le site c19.info permet à chacun d'évaluer sa symptomatologie et, le cas échéant, incite le patient à (télé)consulter un médecin.

■ www.nabla.com

Prévention
**DISTANCIATION
SUR LES
CHANTIERS**

La start-up parisienne CAD.42 propose des solutions de suivi de chantier en temps réel (optimisation, analyse des risques...) reposant sur des logiciels et des objets connectés. Dotés de capteurs, ces derniers sont disposés sur les équipements coûteux ou générateurs de risques (grues, engins...), ainsi que dans les vestes connectées destinées au personnel. En période de pandémie, elle propose des « solutions Covid-19 » pour faciliter et vérifier la mise en œuvre des règles de distanciation physique.

■ www.cad42.com

Diagnostic

BFORCURE développe un robot pour traquer le SARS-CoV-2 sur le terrain

Grâce à une puce microfluidique, une machine portable quantifie rapidement la présence du virus chez un patient, sur une surface ou dans l'air.

La qPCR (pour « réaction en chaîne par polymérase quantitative ») permet de quantifier avec précision la présence, dans un échantillon, d'un génome particulier. Fondée en 2018 à Montreuil, BforCure a mis au point un dispositif robotisé réalisant cette opération en quelques minutes. Au cœur de la machine, des échantillons de 20 microlitres sont introduits dans une puce microfluidique de 1 cm². L'une de ses faces, en aluminium, est exposée à un flux d'eau dont la température oscille rapidement entre 65 et 95 °C; ces cycles provoquent alternativement l'hybridation et la déshybridation des brins d'ADN. Par l'autre face, transparente, la lumière issue de sondes fluorescentes est mesurée pour quantifier en temps réel la duplication des brins d'ADN. « La première application, pour la Direction générale de l'armement (DGA), était la détection sur le terrain d'armes biologiques, raconte Christophe Pannetier, le directeur scientifique de la start-up. Nous avons donc mis au point

un dispositif portable, de la taille d'une imprimante. Face à la pandémie, la DGA a financé le développement d'une machine destinée à la quantification du SARS-CoV-2, chez un patient, sur une surface ou dans l'air. Elle permet de lancer une campagne de tests n'importe où, par exemple dans un Ehpad. » La production doit démarrer cet été. Pierre Vandeginste

■ www.bforcure.com



▲ Dans le dispositif de BforCure, les échantillons sont introduits dans une puce de 1 cm².

Criblage moléculaire

MABSILICO invente des anticorps contre le coronavirus par simulation informatique

En manipulant des représentations tridimensionnelles d'anticorps et d'antigènes, cette équipe cherche numériquement des parades contre la pandémie actuelle.

Anne Poupon est bio-mathématicienne, directrice de recherche CNRS et responsable, au centre Inrae de Tours, de l'équipe Biologie et bio-

informatique des systèmes de signalisation, qui étudie in silico la relation antigène-anticorps. Elle a cofondé en 2017 la jeune pousse Mabsilico, qui élabore des outils de simulation numérique, dopés à l'apprentissage automatique, permettant de classer, sélectionner et modifier des anticorps, et de tester leur affinité avec un antigène. « Lorsque

nous avons réalisé la gravité de la pandémie de Covid-19, se souvient la chercheuse, nous sommes dit que nous pouvions faire quelque chose. » On sait que le virus SARS-CoV-2 s'introduit dans l'organisme en s'accrochant tout d'abord à la protéine ACE2 présente à la surface des cellules épithéliales des voies respiratoires. Cet amarrage résulte d'une

- Créée en septembre 2017
- Effectif: 8
- Levée de fonds: en cours



forte affinité pour l'ACE2 de la glycoprotéine appelée Spike (spicule), qui constitue les protubérances de la couronne du coronavirus. Certains anticorps produits par le système immunitaire se fixent sur cette protéine Spike et lui interdisent ainsi l'accès aux cellules épithéliales. L'objectif de Mabs-Silico est de concevoir in silico de tels anticorps.

Deux pistes différentes

« Nous suivons deux pistes, explique Anne Poupon. La première consiste à travailler à partir d'anticorps inhibant le SARS-CoV, responsable de l'épidémie de 2003. Nous en avons choisi dans la littérature scientifique plus d'une centaine. Nos outils nous permettent tout d'abord de sélectionner ceux qui ont la plus forte affinité avec le spicule du nouveau virus. Puis, toujours par simulation numérique, nous modifions ces anticorps pour les adapter à la conformation du SARS-CoV-2. Il s'agit d'introduire quelques mutations, de remplacer cinq ou six acides aminés. »

« Notre seconde approche, poursuit la biomathématicienne, consiste à travailler à partir d'anticorps présents chez des patients ayant contracté le Covid-19 et guéri. Après avoir séquencé environ un million d'anticorps issus du plasma de ces patients, nos outils permettent de détecter ceux qui sont dirigés contre le SARS-CoV-2 et de sélectionner les meilleurs. » Les candidats sélectionnés in silico devaient être testés in vitro à partir de la mi-mai, puis in vivo au cours de l'été. P.V.

■ www.mabsilico.com

Multiplions les identités de notre double numérique

Alice Doe, 42 avenue de la Gare, à Romorantin, est devenue un jour un numéro de sécu, un 06, une adresse mél. Elle y a perdu la matérialité d'une adresse et gagné un identifiant numérique, ou plutôt une flopée, qu'elle conserve précieusement sur des bouts de papiers ou, plus raisonnablement, dans un coffre-fort électronique. Quand Alice transmet des informations confidentielles, le chiffrement lui garantit que des oreilles indiscrettes ne peuvent pas y avoir accès. Quand elle veut prouver qu'elle est bien elle, une signature électronique lui permet de le faire. L'informatique a développé une unique solution pour ces deux cas : la cryptographie (à clé publique). La solution technique existe donc. Pourtant, prouver son identité, garantir qu'on est bien celui ou celle qu'on prétend être, reste difficile, pénible – passons sur la légèreté de sites pornographiques qui se contentent d'une déclaration de l'utilisateur affirmant qu'il a l'âge approprié pour entrer. On nous demande de certifier notre « identité numérique » pour consommer sur des sites de vente du Web, pour interagir avec une administration de plus en plus dématérialisée – les impôts, la Sécurité sociale, Pôle emploi...

Des solutions se déploient. L'Union européenne a publié l'Electronic Identification and Trust Services. Le *trust* (la confiance) est indispensable dans les deux sens. En France, l'identification est proposée par FranceConnect, et différentes administrations ou entreprises qui répondent à un cahier des charges du gouvernement. Les Estoniens, eux, disposent d'une puce dans leur carte d'identité (obligatoire) qui leur permet de s'identifier de façon électronique.

RESTE UNE QUESTION : une identité unique est-elle souhaitable pour se connecter à toutes ces plateformes numériques ? Les géants du Web adoreraient fournir de facto une identité unique. Alice pourrait être, pour le monde entier, Alice.Doe@Facebook.com – en fait, Alice.Doe.59 parce que 58 personnes

auraient déjà pris le nom. Or le fait qu'une entreprise privée devienne ainsi la garante d'un bien aussi commun qu'essentiel qu'une identité pose question. Une personne peut vouloir utiliser des pseudonymes, des identités différentes. Nous ne parlons pas ici d'anonymat ; mais du moyen de cultiver, de manière parfaitement responsable, diverses facettes de sa personnalité, de s'exprimer librement sur les réseaux sociaux sans trop s'exposer (être harcelé). Le numérique permet cette liberté. Surtout, une identité unique n'est pas souhaitable, car elle accentuerait la vulnérabilité de la confidentialité de nos données personnelles. Le règlement général sur la protection des données (RGPD) protège ces dernières mais, malgré cela, nos données numériques continuent à s'entasser un peu partout.



La dispersion de nos données nous protège un peu

Notre adresse IP, les contenus que nous postons, nos commentaires, nos *like*, les personnes avec lesquelles nous interagissons, ce que d'autres publient sur nous, construisent, dans le cyberspace, notre double numérique. Cette autre identité numérique pourrait avoir des incidences sérieuses dans le monde bien réel, par exemple pour une recherche d'emploi. Nous sommes (un peu) protégés par la dispersion de nos données sur diverses plateformes, sous des identités différentes. Avec des identités diverses, nous compliquons la tâche des entreprises qui cherchent à tout savoir de nous. Alors, même si une identité unique nous simplifierait la vie, cultivons la dispersion ! ■

Serge Abiteboul est chercheur en informatique à Inria et à l'ENS Paris, blogueur à binaire.blog.lemonde.fr et membre de l'Académie des sciences. ● Cette chronique est proposée en alternance avec celle de Gérard Berry, du Collège de France.

Édito

Rhône et Auvergne : construire l'avenir ensemble !

SUR LA TRAJECTOIRE RHÔNE-AUVERGNE, L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET LA RECHERCHE SONT PARTICULIÈREMENT ACTIFS. MAILLÉS PAR DES INFRASTRUCTURES DE RENOM DONT L'EXCELLENTE RÉPUTATION À LARGEMENT DÉPASSÉ LEURS FRONTIÈRES, CES TERRITOIRES PRÉPARENT LEUR AVENIR. UN FUTUR QU'ILS ENVISAGENT « EN GRAND ». ET POUR CAUSE...

Il y a bien sûr le site académique d'excellence à vocation mondiale qu'est l'Université de Lyon avec ses 172 laboratoires... Labellisée IDEX en 2017, elle compte 140 000 étudiants (dont 20 000 étrangers) et plus de 6 800 chercheurs et enseignants-chercheurs. Dans son continuum, il y a l'Université Jean-Monnet de Saint-Étienne, véritable catalyseur dans le domaine

des SHS, mais également des sciences et techniques : avec notamment le Pôle du Design, reconnu au niveau international, et le Pôle Lumière et Surface, unique triptyque français regroupant : 1 eur, 1 labex et 1 equipex, soit : la Formation, la Recherche fédérée et le transfert vers le monde de l'optique et de la photonique. Sans oublier non plus, sur le même bassin, l'Université Clermont

Auvergne, Labellisée I-Site Cap 20-25, avec ses 35 000 étudiants, ses quelque 1 281 chercheurs et enseignants-chercheurs et ses 35 laboratoires de recherche en partenariats avec de nombreux établissements et organismes (CNRS, Inserm, INRAe, AgroParistech, VetAgroSup, Sigma Clermont, Chu Clermont-Ferrand, et le Centre Jean Perrin et Ferdi). Et si la formation et la recherche sont les locomotives de ces territoires, ils doivent aussi leur excellente réputation et leur rayonnement aux liens étroits qu'ils ont tissés avec le tissu économique local. Sur l'axe Rhône-Auvergne, les PME innovantes et à forte valeur ajoutée, les grands groupes industriels, les clusters d'excellence et les pôles de compétitivité ne manquent pas ! Qu'il s'agisse de Lyon, Saint-Étienne ou Clermont-Ferrand. Qu'il s'agisse du Rhône ou de l'Auvergne, l'ambition reste la même : créer l'alchimie entre les volets formation, innovation et entreprise, et dessiner l'avenir ! ■

Dossier réalisé par **DUOMEDIAS**.

Gilles Baron 06 82 84 11 02 - gbaron@duomedias.fr / Rédaction : Victoire Lissajoux - Maquette : Sylvie Bisson

CORTEX

CORTEX : explorer le domaine fascinant des neurosciences !

CRÉÉ EN 2011, LE LABEX CORTEX SE VEUT UN CATALYSEUR DE LA RECHERCHE EN NEUROSCIENCES À LYON, AU SEIN D'UN ÉCOSYSTÈME LOCAL EXCEPTIONNEL REGROUPANT PRÈS DE 650 PERSONNES IMPLIQUÉES DANS CETTE DISCIPLINE, AU SEIN DE 4 INSTITUTS ET 2 HÔPITAUX. RENCONTRE AVEC JEAN-LOUIS BESSEREAU, SON DIRECTEUR.

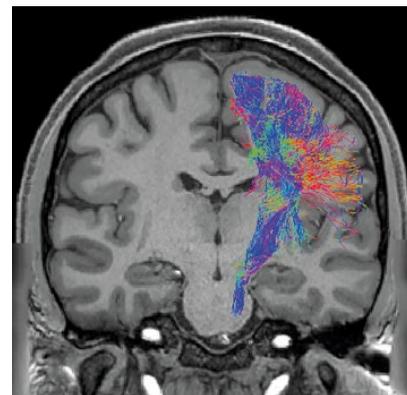
Pouvez-vous revenir sur le rôle et l'ambition de CORTEX ?

Les 22 équipes du LabEx explorent le fonctionnement du cerveau à différentes échelles, depuis le développement du système nerveux et la mise en

place des réseaux neuronaux jusqu'aux aspects intégrés du traitement des signaux et de l'analyse des fonctions cognitives chez l'enfant et l'adulte. L'objectif est à la fois de produire une recherche fondamentale de très haut niveau, mais aussi de faciliter les interactions avec les neurologues, neuroradiologues et psychiatres pour faire émerger des stratégies diagnostiques et thérapeutiques innovantes.

Quels sont les objets de recherche qui font votre excellente réputation ?

Nos recherches couvrent un spectre très large des neurosciences, avec des projets particulièrement importants comme nos études du neuro-développement et de l'autisme, l'analyse et la modélisation du traitement de l'information dans le cortex, ou encore l'exploration des capacités cognitives du nourrisson (projet BabyLab). Nos travaux ont ainsi débouché sur le programme de neuro-éducation, ATOLE, qui vise à améliorer les capacités attentionnelles des enfants en classe, ainsi qu'à la création de start-up



comme Sibius, à l'origine d'une application sur tablette utile au diagnostic précoce de l'autisme. Nous utilisons également des données de séquençage de génomes humains afin de comprendre les rapports entre génétique et dysfonctionnements du système nerveux. Enfin il nous paraît essentiel de partager notre recherche avec le grand public, notamment au travers de notre site Cortex Mag. ■

CLERMONT AUVERGNE

I-SITE CAP 20-25 « Concevoir des modes de vie et de production durables »

AUTOUR DU PROJET D'EXCELLENCE I-SITE CAP 20-25*, UNE AMBITION : FAIRE ÉMERGER UNE GRANDE UNIVERSITÉ PLURIDISCIPLINAIRE DE RAYONNEMENT EUROPÉEN ET INTERNATIONAL À L'OUEST DE LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES : L'UNIVERSITÉ CLERMONT AUVERGNE DE DEMAIN SE DESSINE**.



3 questions à Bérangère Farges, directrice-adjointe du projet I-Site CAP 20-25, en charge de la stratégie scientifique et des partenariats

Pouvez-vous expliquer ce que sont les « Challenges » de l'I-Site CAP 20-25 ?

Les « Challenges » du projet CAP 20-25 sont les domaines d'excellence scientifique du site, définis selon les forces scientifiques, économiques et environnementales du territoire auvergnat. Nous parlons ici de l'agriculture (avec la présence de l'INRAE et de la coopérative Limagrain), de l'industrie (avec de grands groupes comme Michelin et un tissu riche de PME-TPE), de la santé (avec le CHU de Clermont-Ferrand et plusieurs clusters de santé), et enfin de l'environnement, en lien avec le patrimoine naturel volcanique de la Chaîne des Puys.

Chaque Challenge associe dans ses travaux sciences humaines et sociales, sciences fondamentales et sciences pour l'ingénieur, car la conception de nouveaux modes de vie et de production ne peut être pensée que de façon globale et mise en œuvre collectivement.

En quoi le projet I-Site CAP 20-25 va-t-il participer à faire rayonner le territoire auvergnat en termes de recherches et d'innovations ?

Les projets I-Site sont particulièrement attendus dans leur dimension territoriale (c'est le « T » dans « I-Site »). Nous l'avons intégré dans notre stratégie partenariale en entamant un processus de conventionnement pluriannuel avec les collectivités du territoire qui se sont donc engagées à soutenir la démarche scientifique du projet CAP 20-25. Les dispositifs qui en résultent sont uniques puisqu'ils convertissent des territoires en laboratoires d'expérimentation

grande nature. À l'intérieur sont agrégées toutes les compétences autour de thématiques liées aux atouts du territoire d'implantation, pôles de compétitivité inclus !

Cette concentration des expertises est très attractive pour les chercheurs et industriels y compris au-delà des frontières nationales.

Quelles sont les grandes infrastructures qui dynamisent le projet ?

Six plateformes technologiques et d'innovation issues de partenariats public-privé viennent en appui à la recherche scientifique dans les domaines majeurs que sont les agroécosystèmes et agrotechnologies, les véhicules autonomes, la santé-mobilité, les matériaux du futur. Deux autres verront le jour d'ici un an.

Nous avons également développé le concept de « City Lab », qui consiste à faire d'un quartier ou d'une ville un laboratoire d'expérimentation d'un mode de vie : Vichy devient ainsi le City Lab de la mobilité (au sens de lutte contre la sédentarité), en intégrant toutes les dimensions nécessaires à un changement de paradigme : psychosociale avec des interventions de professionnels de santé auprès de populations cibles ; environnementale avec des aménagements dans la ville pour encourager les mobilités actives, et économiques avec l'accueil de startups orientées mobilité. La boucle est bouclée ! ■

** Membres du consortium du projet I-Site CAP 20-25 : Université Clermont Auvergne, Sigma-Clermont, AgroParisTech, VetAgro Sup, INRAE, Inserm, CNRS, CHU Clermont-Ferrand, Centre Jean Perrin, Fondation pour les Études et les Recherches sur le Développement International.*

***Au 1^{er} janvier 2021 l'Université Clermont Auvergne deviendra un établissement expérimental au sens de l'ordonnance n° 2018-1131 du 12 décembre 2018 relative à l'expérimentation de nouvelles formes de rapprochement, de regroupement ou de fusion des établissements d'enseignement supérieur et de recherche.*



© Service communication - Université Clermont Auvergne

Saint-Etienne / Lyon

Manutech : leader mondial de l'ingénierie des surfaces ?

SUR LE TERRITOIRE SAINT-ETIENNE - LYON, SE TROUVE UN ÉCOSYSTÈME UNIQUE EN FRANCE AUTOUR DE L'INGÉNIERIE DES SURFACES AVEC ICI UN LABEX, UN ÉQUIPEX, ET DÉSORMAIS UNE ÉCOLE UNIVERSITAIRE DE RECHERCHE*. RENCONTRES...



Campus Manufacture - Université Jean Monnet Saint Etienne

Florence Garrelie,
*directrice du Laboratoire
Hubert Curien (UMR CNRS 5516)
et responsable EUR Manutech-
SLEIGHT*

« Notre stratégie s'appuie sur le triptyque : formation, recherche et innovation. De fait, après l'obtention d'un LabEx et d'un EquipEx, entrer dans la course à l'EUR était une évidence pour intégrer l'articulation Formation-Recherche. L'EUR Manutech-Sleight (6,3 M€ de dotation) s'intéresse plus particulièrement à l'ingénierie lumière-surfaces utilisant en particulier les lasers ultrabrefs, et fait converger plusieurs champs disciplinaires que sont l'optique-photonique, les sciences des matériaux, la mécanique, l'imagerie, l'Intelligence Artificielle, et la bio-ingénierie. Nos formations d'excellence en Master à l'Université Jean Monnet - Saint Etienne sont tout à fait uniques avec une forte dimension internationale (3 Masters Erasmus Mundus dans ces domaines) et comptent parmi nos grands atouts. Nous ne sommes encore qu'au début de l'histoire qui promet d'être riche en innovations, porteuse

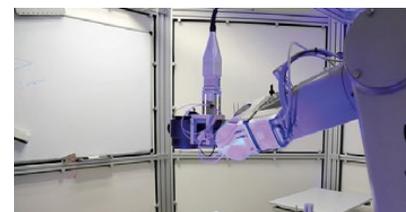
d'excellence et contribuant au rayonnement scientifique international ! ■

Yves Jourlin, *responsable
du Labex Manutech-SISE*

« Axé sur les fonctionnalités de surface en particulier en tribologie, en optique ou en chimie, le LabEx qui a été renouvelé en 2019, a connu de beaux succès dans sa première phase (une centaine de retombées scientifiques, une cinquantaine de thèses financées,...). Nos activités rejoignent celles de l'EUR puisque l'idée commune est d'interagir avec une surface pour la modifier, d'abord, et l'exploiter ensuite. Fort de ces réussites précédentes, le LabEx vise désormais à créer de nouveaux partenariats afin d'explorer plus largement les aspects multifonctionnels incluant la chimie et la physico-chimie des surfaces. Le LabEx a été l'occasion de mieux structurer la recherche sur le territoire et de favoriser de nouvelles synergies entre les laboratoires, sans oublier de créer du lien entre la recherche et le transfert industriel à travers, notamment, l'entreprise HEF et le GIE Manutech USD. ■

Bertrand Nicolet, *directeur
exécutif de Manutech-USD*

« Le GIE Manutech-USD a été créé entre partenaires académiques et industriels pour opérer les équipements d'excellence de l'EquipEx. Cette organisation crée un lien privilégié entre la recherche et les entreprises afin d'accélérer le transfert des capacités uniques des lasers femtosecondes vers l'industrie. Nos plateformes de texturation et de caractérisation explorent les propriétés de fonctionnalisation de la surface (tribologie, anti-adhésion, croissance cellulaire, etc.) et s'intègrent dans un modèle économique viable. Grâce à l'écosystème mis en place nous améliorerons le continuum entre Recherche et Innovation pour créer de nouveaux dialogues en un seul et même lieu. Fonctionnaliser les surfaces des matériaux avec un laser ultrabref pour leur conférer des propriétés inédites est un défi passionnant qui trouve des champs d'applications à l'infini dans l'aéronautique, l'énergie, la santé, l'agroalimentaire... Le laser femtoseconde est une technologie qui fascine tant le grand public que les événements professionnels internationaux auxquels le GIE participe (LASER World of PHOTONICS, à Munich, SPIE Photonics West à San-Francisco). ■



Équipement de texturation de surface par laser femtoseconde avec bras robotisé - Manutech-USD

* Programmes Equipex, labex et EUR financés par l'ANR. Les partenaires sont UdL, UJM-SE, INSA Lyon, IOGS, Mines St Etienne, UCBL, ECL, ENISE, CNRS, INSERM, CETIM, WEARE, HEF, Keranova.

manutech-sleight@univ-st-etienne.fr
contact@manutech-usd.fr
aurélie.guillarme@universite-lyon.fr

L'ÉCOLE URBAINE DE LYON

L'École Urbaine de Lyon ou comment penser l'anthropocène

COMMENT LE SYSTÈME SOCIAL ET SPATIAL URBAIN INTERAGIT-IL AVEC LA DYNAMIQUE DU SYSTÈME TERRE ? C'EST À CETTE QUESTION QUE SE PROPOSE DE RÉPONDRE L'ÉCOLE URBAINE DE LYON. LES EXPLICATIONS DU PROFESSEUR MICHEL LUSSAULT, SON DIRECTEUR.

L'EUL inscrit son expertise dans un domaine nouveau de connaissance : l'urbain anthropocène. Pouvez-vous nous en dire plus ?

Avec ce projet (prévu sur huit ans), nous partons de l'hypothèse que l'urbanisation généralisée du monde, observée depuis les années 1950, constitue le vecteur de l'accélération de l'entrée dans l'anthropocène, selon la notion posée par Stoermer et Crutzen. Pour nous, ce terme a l'immense mérite de montrer les effets de l'activité humaine sur les systèmes biophysiques comme l'atmosphère, les écosystèmes... L'EUL s'impose ainsi comme le pôle de concentration d'une recherche de très haut niveau sur le changement global, doté d'une plateforme de discussion autour de cet être humain qui devient une force agissant irréversiblement sur l'entièreté de la planète.

Quels sont ces changements globaux que vous évoquez et comment mieux les appréhender ?

Nous parlons ici du dérèglement climatique, de la crise de la biodiversité et de l'extinction des espèces, de l'épuisement des ressources, du bouleversement du métabolisme de grand systèmes biotiques... Comment le changement global est-il venu redéfinir le système urbain et a-t-il créé une crise de l'habitabilité que nous connaissons sur la planète Terre ? Autour de cette question, sont réunis des chercheurs en sciences expérimentales, en sciences de la vie, en anthropologie, en droit, en sociologie urbaine, en géographie... L'idée est de coupler les sciences fondamentales avec les humanités, la santé, les ingénieries, la culture, l'entrepreneuriat. À travers la convergence de ces disciplines, nous avons pu constituer un collège de « l'intelligence des mondes urbains ».

Parlons des objectifs de votre recherche, précisément...

Nos travaux ont pour vocation d'observer le développement des villes et d'en analyser les évolutions au fil des années



© Adrien Pinon

afin d'imaginer de nouvelles stratégies de développement du territoire pour le futur, de nouvelles manières d'habiter le monde. Ainsi, notre programme de recherche doctorale vise à comprendre comment les sociétés humaines peuvent répondre à ce défi anthropocène mais aussi à contribuer au débat public et politique. Pour cela, nous avons mis en place de nombreux canaux de diffusion comme notre chaîne Youtube sur laquelle nous publions des vidéos dans lesquelles des experts s'expriment sur leur vision de

l'anthropocène. Nous avons également créé un blog de recherche qui incite à des réflexions sur la dimension urbaine de l'anthropocène, Anthropocene 2050. Nous organisons aussi, chaque année, un événement phare, point d'orgue de notre activité formation/recherche/débat public : « à l'École de l'Anthropocène » qui est une initiative inédite invitant des publics variés à apporter leur contribution à un débat passionnant. Notre but est véritablement de stimuler la pensée collective ! ■

Suivez l'EUL...

Site <https://ecoleurbainedelyon.universite-lyon.fr/>

 @EcoleUrbaine

 @ecoleurbainedelyon

 Ecole Urbaine de Lyon

 Ecole Urbaine de Lyon

Blog « Anthropocène 2050 » : medium.com/anthropocene2050

CONQUÊTE SPATIALE

Une nouvelle épopée humaine ?

C'

est en 2024 que des humains devraient fouler à nouveau le régolithe lunaire, la fine couche de poussière qui couvre notre satellite naturel. Ce retour sur la Lune, plus d'un demi-siècle après les missions Apollo, est voulu par les États-Unis. Car le vol habité est constitutif d'**une posture politique de l'administration américaine**, cherchant à asseoir sa

puissance dans le pays et à travers le globe, notamment vis-à-vis de la Chine. Les autres nations, l'Europe, ainsi que des sociétés privées s'inscrivent dans le sillage de ces projets. Les acteurs privés, en particulier, bénéficient de la manne que représentent des programmes spatiaux richement dotés. En quelques années, de nouvelles entreprises sont devenues des partenaires incontournables de la Nasa : le 27 mai, une fusée de SpaceX doit emmener des astronautes vers la Station spatiale internationale. Ce sera la première mission américaine habitée depuis l'arrêt des navettes spatiales, en 2011.

Et **trois opérateurs privés** – Blue Origin et Dynetics, en plus de SpaceX – viennent de se voir attribuer près d'un milliard de dollars par la Nasa pour la première phase d'études de conception d'un atterrisseur lunaire habité. S'ils profitent ainsi de cette dynamique, ils en sont en même temps un moteur, investissant parfois à fonds perdu. Pour le spationaute Jean-François Clervoy, très enthousiaste, c'est « *une bonne chose que des milliardaires se lancent dans le domaine spatial avec leur argent, cela montre que l'espace peut être une passion entraînante; c'est aussi une reconnaissance de la noblesse que représentent les activités spatiales: ils continuent, sans se décourager, même si les risques sont très élevés, jusqu'à réussir des missions très difficiles* ». Cela permet aussi aux agences spatiales de dépenser globalement moins d'argent public pour un même retour scientifique et exploratoire.

Autre conquête en ligne de mire : Mars. L'échéance est plus lointaine. L'an 2050 ? Difficile à prévoir, tant les aléas sont grands. Dans un ouvrage qu'il vient de publier, le planétologue Francis Rocard fait le point sur ce que l'on sait de l'histoire de la planète Rouge, de l'eau qui s'y trouvait et s'y trouve encore. Il présente les **différentes missions possibles vers Mars et sur Mars**, des plus simples aux plus complexes. Impossible pour certains, l'entreprise lui paraît réalisable, même si le financement pourrait avoir du plomb dans l'aile en raison de la crise due à la pandémie actuelle.

Mais l'entreprise est-elle désirable ? C'est la question que posent beaucoup de scientifiques, représentés dans nos pages par l'astronome et écrivain Donald Goldsmith, et son collègue Martin Rees, astronome royal britannique. Pour eux, les motivations sous-jacentes à l'envoi d'hommes et de femmes dans l'espace ne tiennent pas, au regard des **avantages de l'exploration robotique**. L'espace, ultime frontière des humains ou des robots ? La question est posée. ■

PAGE 36

Entretien avec
Xavier Pasco,
politologue

PAGE 41

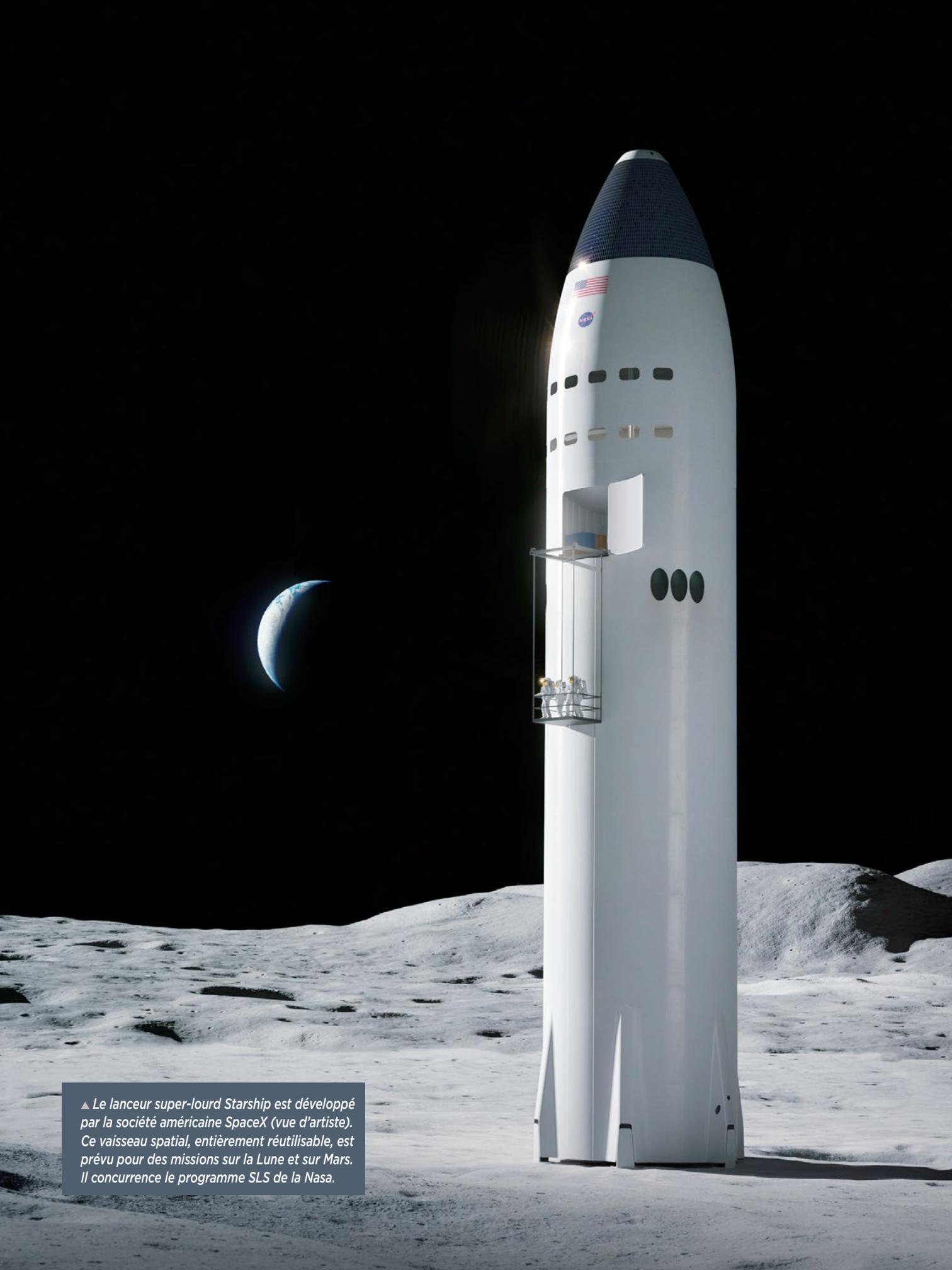
Les entrepreneurs
s'offrent la Lune

PAGE 44

Prochain arrêt,
la planète Rouge

PAGE 47

Avons-nous besoin
d'humains
dans l'espace ?



▲ Le lanceur super-lourd Starship est développé par la société américaine SpaceX (vue d'artiste). Ce vaisseau spatial, entièrement réutilisable, est prévu pour des missions sur la Lune et sur Mars. Il concurrence le programme SLS de la Nasa.

1

Entretien avec **Xavier Pasco**

Fondation pour la recherche stratégique

« Avant Mars, l'espace Terre-Lune sera habité différemment »

Orbite basse, station spatiale, Lune, puis Mars: le vol habité n'a jamais eu autant le vent en poupe. Et les acteurs privés commencent à devenir incontournables. Spécialiste de l'espace, Xavier Pasco dresse un portrait géostratégique de la situation actuelle, dont les orientations résultent en grande partie de la politique américaine.

La Recherche En France et plus généralement en Europe, le vol habité n'a jamais été une grande ambition politique, alors que l'exploration spatiale est poussée par l'Agence spatiale européenne (ESA).

Pourquoi cette différence ?

Xavier Pasco Il y a toujours eu débat entre les scientifiques qui n'ont jamais vraiment été des supporters du vol habité et les raisons politiques pour lesquelles il fallait mettre des gens dans l'espace. En Europe, pour ce qui concerne le programme des vols habités, la seule participation est actuellement en soutien sur le module de service Orion d'Artemis, programme de la Nasa dont l'objectif est d'amener un équipage sur le sol lunaire d'ici 2024. En Europe, le vol habité n'a jamais été très porteur. Le projet de véhicule Hermes, conçu pour s'amarrer à la Station

spatiale internationale (ISS), a été abandonné en 1992. L'Europe a certes un corps d'astronautes, mais pas de vision indépendante qui expliquerait pourquoi elle doit avoir un programme autonome. Le programme habité ne s'y conçoit actuellement qu'en soutien ou en complément d'autres programmes habités. Certes, se dire que, si l'on doit faire ce genre de choses, ce ne sera que collectivement est une position raisonnable. La contrepartie est que les

Européens n'ont jamais produit de vision politique sur le vol habité.

Est-ce différent aux États-Unis ?

Oui. D'abord parce qu'il y a l'héritage de tous les programmes d'exploration des premières années de la conquête spatiale, de Mercury à Apollo, en passant par Gemini. Ensuite, parce qu'il y a un va-et-vient politique permanent sur le programme habité, qui s'est accentué dès lors que l'on a envisagé l'arrêt du programme de la navette spatiale dans les années 1990. Après ces années-là, sur le vol habité et plus généralement sur l'espace, deux voies politiques ont été suivies. L'une consistait à dire que l'espace est avant tout une technologie. De cette manière, les États-Unis pouvaient faire la différence, et même agréger d'autres pays, bien au-delà du vol habité. C'était plutôt la vision du président Bill Clinton et des autres présidents démocrates. D'un autre

Contexte

La Chine inaugure un nouveau lanceur et projette sa station spatiale. De son côté, l'administration américaine s'engage dans un grand programme de retour de l'homme sur la Lune, avec l'ambition d'aller, avant 2050, jusqu'à la planète Mars. La crise consécutive à la pandémie de Covid-19 retardera sans doute ces projets, mais les enjeux politiques et financiers sont tels qu'ils devraient néanmoins perdurer.



XAVIER PASCO

1964 Il naît à Nantes.
1994 Doctorat en sciences politiques à l'université Paris I Panthéon-Sorbonne.
1994 Il entre à la Fondation pour la recherche stratégique (FRS).
DEPUIS OCTOBRE 2016, il est directeur de la FRS.

cristallisent le débat d'aujourd'hui sur le retour vers la Lune et l'envoi d'humains vers Mars.

Comment ces programmes répondent-ils aux problèmes américains ?

Lors de ce discours, le président met l'accent sur le retour de l'âge d'or pour que les Américains repartent sur la Lune. Le programme de politique spatiale américaine alors annoncé inclut de terminer la Station spatiale internationale d'ici 2010, d'explorer la Lune et Mars avec des missions robotisées et habitées – bref, de renouer avec le succès du programme Apollo en redéfinissant des objectifs ambitieux d'explorations du Système solaire. Le programme Constellation, par le développement d'un lanceur, avait par ailleurs le mérite de réutiliser les boosters de la navette, dont l'arrêt était programmé, ce qui donnait des gages aux États dans lesquels cette industrie spatiale était prospère.

L'arrivée de Barack Obama a-t-elle changé cette orientation ?

Oui, mais aussi la crise financière de 2008. Durant sa campagne électorale, en plein dans la crise, il se distingue en critiquant le coût des vols habités. Lorsqu'il prend ses fonctions, début 2009, il demande un audit complet sur le vol habité. La commission Augustine rend ●●●

côté, les Républicains, qui ont une vision plus traditionnelle des rapports de force et de la symbolique de puissance, ont toujours identifié le programme habité comme constitutif d'une posture politique.

C'est ce clivage qui a façonné le programme habité américain ?

Pas seulement, car les présidents américains, quel que soit leur bord, n'ont jamais considéré le spatial comme une priorité. Leurs orientations dans ce domaine ont toujours été des réponses ponctuelles à une crise précise. Lorsque George W. Bush a succédé à Bill Clinton, en 2001, c'était le premier président américain à n'avoir jamais visité un centre de la Nasa durant sa campagne électorale. Il se trouve qu'à cette époque, l'agence spatiale américaine est sur la sellette avec d'importantes remises en question : elle connaît des problèmes internes, des problèmes de management. Le point culminant sera l'accident de la navette Columbia en 2003, détruite lors de sa rentrée dans l'atmosphère, entraînant la mort des sept astronautes à bord. Il vient clore le cycle de la navette spatiale qui, déjà, était programmé

pour s'arrêter. Peu après, toujours en 2003, le succès du vol du premier taïkonaute va obliger l'exécutif à réagir. Les conseillers du président lui expliquent que ce succès chinois est en train d'affecter l'image des États-Unis ; la Chine menace de devenir la prochaine puissance spatiale et en engrangerait les bénéfices. D'autant que l'accident de Columbia mettait l'accent sur le fait que la Nasa était mal gérée. Cela va conduire George W. Bush à annoncer, lors d'un discours le 14 janvier 2004, les programmes Ares et Constellation. Ce sont eux qui

ARTEMIS, UNE ÉTAPE LUNAIRE

Le programme Artemis vise le retour des humains sur la Lune comme prélude au vol habité vers Mars. Il comprend plusieurs segments qui sont développés en parallèle.

- **Les systèmes d'exploration au sol : le réseau de structures au sol pour les lancements.**
- **Le lanceur SLS (pour Space Launch System) : un lanceur de grande capacité nécessaire pour l'envoi vers la Lune.**
- **Le module Orion : un module habité qui sera placé sur le lanceur.**
- **La plateforme en orbite lunaire (Lunar Gateway) : une station orbitale qui servira d'étape vers la Lune et au-delà.**
- **Les atterrisseurs lunaires (Modern Human Lunar Landers), engins qui feront la navette entre la station orbitale et le sol lunaire.**
- **Les combinaisons spatiales de nouvelle génération (Artemis Generation Spacesuits) : des combinaisons spatiales qui permettront une meilleure mobilité et flexibilité sur la Lune.**

●●● un rapport mettant en avant le fait qu'il faudrait à la Nasa un budget supplémentaire annuel de 3 milliards de dollars pour Constellation. Le président tient ses promesses de campagne et annule le programme, mais, en même temps, pour ne pas soulever de critiques du camp républicain, il annonce que, sur la base du rapport Augustine, on doit préparer une nouvelle technologie pour aller sur Mars. C'est là qu'apparaissent les prémices du programme SLS, un lanceur superlourd qui doit servir à préparer les missions martiennes, ainsi que le véhicule spatial Orion, destiné à transporter un équipage au-delà de l'orbite terrestre basse. Par ailleurs, Barack Obama va favoriser l'émergence du New Space, de type SpaceX et Orbital. L'arrivée de

ces acteurs privés relance un tissu industriel qui compense l'arrêt de Constellation. Il donne ainsi le sentiment qu'il est très pro-industrie. C'est un bon coup politique : il évite les attaques républicaines et son électorat estime qu'il a tenu ses promesses en mettant un terme à une vision lunaire jugée dispendieuse, tout en faisant du social puisqu'il aide à créer des emplois.

Pourtant, la suite ne sera pas si simple...

En effet, la Nasa va connaître une nouvelle crise de gouvernance et les critiques vont pleuvoir. En parallèle, les acteurs privés prennent de l'ampleur. Une société comme SpaceX apporte une capacité et une vision qui transforment le secteur spatial dans son ensemble. Mais, ensuite,

Donald Trump va poursuivre cette idée d'aller sur la Lune et sur Mars avec Artemis, dont un élément clé est une base en orbite autour de la Lune, le Lunar Gateway. Les budgets alloués sont énormes : sur l'année 2020, le seul budget du centre spatial de Houston, au Texas, est de 5 milliards de dollars, sur les 20 milliards de la Nasa. La partie du programme Artemis comprenant l'atterrisseur humain sur la Lune aura besoin de 3,3 milliards de dollars en 2021. C'est en tout cas la première fois, depuis Apollo, qu'il y a un budget identifié pour un atterrisseur habité. Maintenant, avec la crise économique mondiale, particulièrement forte aux États-Unis, les choses pourraient être à nouveau retardées.

Quid de la Chine ?

Les Chinois ont de grandes ambitions. Pour l'orbite basse, ils souhaitent terminer leur propre station spatiale en 2022. Le succès de l'essai de leur lanceur Longue Marche-5B, le 6 mai dernier, et le retour d'un module habitable montrent qu'ils ont désormais des capacités proches de celles des États-Unis et de la Russie. Ces dernières années, ils ont accompli des premières. Par exemple en faisant atterrir un engin, Chang'e 4, sur la face cachée de la Lune. Et leur programme d'exploration lunaire comprend des retours d'échantillons et des vols habités. La Chine est dans une logique où il est important pour elle d'être considérée comme les autres, voire comme un partenaire majeur ou un leader de coopération. Or la difficulté, c'est que les États-Unis – le Congrès américain en premier lieu – ne souhaitent pas que la Chine coopère aux grands programmes internationaux, et cette défiance n'a fait que s'accroître ces derniers mois. C'est sans doute le plus grand problème que les Américains ont à gérer : ils ne pourront pas toujours ignorer les Chinois comme ils le font. Le pays est incontournable dans les vols habités de la décennie

« L'attention portée à la Chine dans l'espace transpose nos craintes terrestres »

“ La feuille de route ambitieuse de la Chine visant à maîtriser la gamme complète des technologies spatiales devient matière à un discours américain sur une potentielle menace chinoise sur l'espace, perçu traditionnellement comme la « Nouvelle frontière ». Les capacités technologiques chinoises et les budgets qui y sont consacrés sont pour autant encore loin des standards américains. Et le projet d'une base lunaire chinoise habitée n'est pas aujourd'hui officiellement confirmé. Pour autant, on constate un phénomène instructif de rétroaction. Présenter internationalement la Chine comme la puissance spatiale de demain renforce l'intérêt d'un pouvoir politique chinois soucieux de son image. Cette approche pose d'ailleurs aussi problème à la Russie, qui est confrontée à un déficit de projet politique spatial, mais reste soucieuse de préserver son héritage soviétique de grande puissance, au moins dans l'espace. Force est de constater que l'attention portée à la Chine dans l'espace est aussi une transposition des craintes terrestres. C'est ainsi que l'on oublie un peu vite les réussites spatiales japonaises dans le domaine des



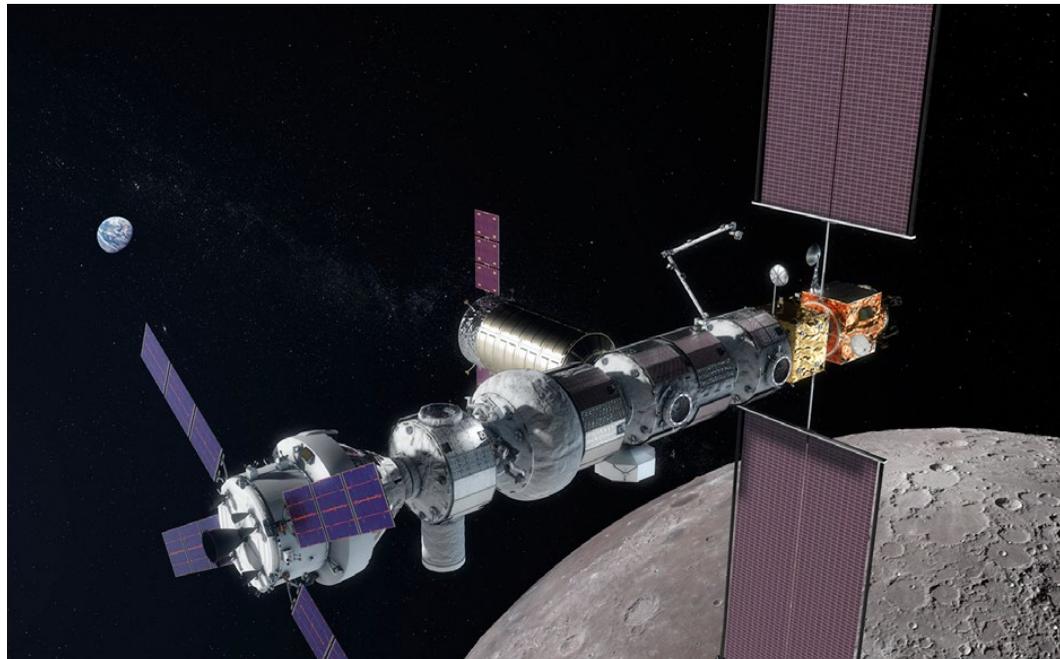
ISABELLE SOURBÈS-VERGER, géographe, directeur de recherche CNRS, Centre Alexandre Koyré.

retours d'échantillons d'astéroïdes. De même, les missions indiennes lunaires ou martiennes sont traitées à moindre bruit, alors qu'elles se singularisent par des approches originales avec un souci réel d'économie, selon le principe du *jugaad*, l'innovation frugale. En effet, si le Premier ministre Narendra Modi est sensible aux mérites des vols habités à des fins de politique intérieure et internationale au point d'avoir décidé d'un programme habité, l'ADN du spatial indien reste fortement marqué par son orientation initiale d'outil incontournable d'aide au développement national. C'est d'ailleurs ce registre qui reste mobilisé pour justifier des programmes d'exploration et de vols habités présentés comme la preuve du chemin parcouru et de la réussite de l'Inde en tant que future puissance du XXI^e siècle.”

qui vient. À un moment, il faudra que la jonction se fasse, un peu comme Apollo-Soyouz à son époque [en 1975, NDLR] avec l'Union soviétique.

Le problème n'est-il pas que les programmes des vols habités et d'exploration du Système solaire sont trop américains ?

Assurément. Les autres pays sont ainsi entièrement dépendants des États-Unis sur le plan technique et la programmation. Un jour, ils disent qu'ils mettent en route le projet de base en orbite autour de la Lune – le Lunar Gateway – et, le lendemain, ils reviennent sur leurs plans parce que cela ne colle plus avec leur politique intérieure... L'ESA en souffre beaucoup : un changement de calendrier ou un changement programmatique majeur a des conséquences budgétaires énormes pour les partenaires, qu'ils soient européens ou non. La faiblesse de l'ESA, comme je le soulignais en introduction, c'est qu'elle n'a pas de culture sur le vol habité. L'indépendance en matière d'accès à l'espace pour le vol habité n'y a jamais mobilisé. L'objectif a plutôt été d'être autonome pour le lancement de satellites, considéré, à juste titre sans doute, comme beaucoup plus stratégique. Bien sûr, si la relance de l'exploration humaine se confirme, la question peut se reposer à l'heure où nous sommes en train de repenser la politique de nos lanceurs. On peut imaginer qu'à un moment donné, un choix politique, ou même un choix d'attente, serait de préparer un lanceur pour le vol habité. Ce serait un signe symbolique fort. Une manière de dire que l'Europe peut avoir son propre discours au sujet de la Lune, comme toutes les grandes puissances – les États-Unis en premier lieu, mais aussi la Chine et la Russie. Mais ce serait vraiment nouveau, en particulier dans un contexte de pandémie qui met évidemment ce type de projet à l'arrière-plan.



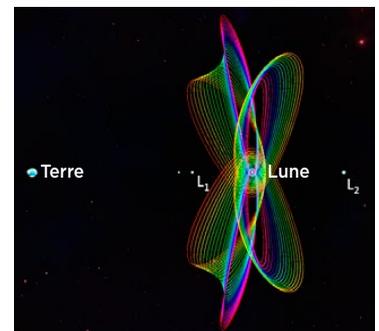
Le programme américain agirait donc comme un incitateur pour les autres nations et les acteurs privés ?

En effet, quoi que l'on pense de la démarche américaine de se recentrer sur la Lune, cela a remis dans son sillage tout un tas d'acteurs, notamment provenant du privé. Trois sociétés – SpaceX, Blue Origin et Dynetics – viennent d'ailleurs de se voir attribuer par la Nasa d'importants contrats pour les atterrisseurs lunaires (lire p. 41). Tout cela intéresse les acteurs privés, parce qu'il y a de l'argent en abondance pour le moment. Cela donne une sorte de cohérence d'ensemble, et les autres pays embrayent dans ce sillage.

Les militaires ont-ils leur mot à dire sur ces programmes ?

Les militaires américains sont omniprésents – mais n'ont pas d'argumentaire pour envoyer des humains en orbite. L'administration Trump vient de créer l'Agence de développement spatial (SDA, pour Space Development Agency), qui regroupe

▲ Le Lunar Gateway (ci-dessus, vue d'artiste) est un projet de station orbitale autour de la Lune. L'engin suivra une orbite de halo (ci-contre), qui présente l'avantage de passer à la fois très près et très loin de notre satellite naturel.



plusieurs laboratoires militaires à travers les États-Unis. La mise en place de cette agence se fait sous la supervision de Michael Griffin, l'actuel patron de la recherche et du développement du Pentagone, qui a travaillé à l'Initiative de défense stratégique – la « guerre des étoiles » – de Ronald Reagan, puis a ensuite été administrateur général de la Nasa. Cet homme croit beaucoup à l'automatisation de l'espace. Il rêve à des ensembles orbitaux capables de faire démarrer une véritable industrie de l'espace, avec des infrastructures de télécommunications en orbite, des satellites de recharge, des capacités de réapprovisionnement en carburant, de réparation, voire, à plus long terme, de fabrication de satellites *in situ*. Le tout serait géré à coups d'utilisation intensive d'intelligence artificielle et de processus industriels low cost. Si l'homme dans l'espace n'est pas la première ●●●

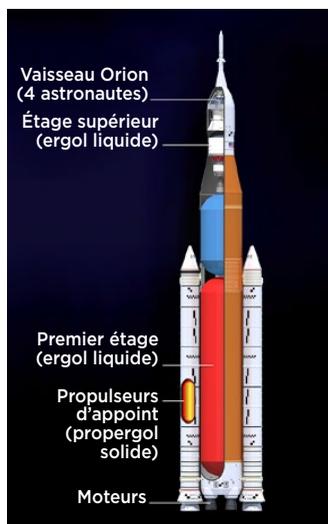
“ Sur ces programmes, les militaires américains sont omniprésents ”

●●● préoccupation du Pentagone, les militaires considèrent le contexte des programmes habités comme un plus pour leur vision des choses.

Quelle est cette vision ?

Le plus petit dénominateur commun entre la nouvelle approche adoptée pour la Lune et les militaires, c'est cette manière d'occuper l'espace par le déploiement d'infrastructures. Pour les militaires, la multiplication des infrastructures et celle du nombre d'acteurs dans l'espace signifient avant tout un surcroît de capacités qu'ils pourront utiliser pour collecter et transmettre des données. De gros budgets militaires sont donc consacrés à l'aval : fusion et gestion des données, hybridation entre différents types de données. Dans cette perspective, les images obtenues à l'aide des satellites ne seront que l'une des composantes d'informations de plus haut niveau qui intégreront, par exemple, des analyses simultanées des signaux radioélectriques, des déplacements de véhicules sur les zones observées, voire des flux d'informations plus générales provenant des réseaux sociaux par exemple, là

► **Les différents composants du lanceur spatial superlourd SLS (pour Space Launch System) de la Nasa, qui doit réaliser des missions habitées vers la Lune. Premier vol prévu pour 2021.**



encore au même moment et concernant les mêmes zones. Et la semi-permanence offerte par des satellites de plus en plus nombreux, quels que soient leurs propriétaires, doit générer un flux constant de données qui justifierait cette intégration dans les grandes architectures de systèmes d'information où le spatial devra cohabiter avec la 5G.

Comment imaginez-vous ce futur spatial à l'échelle mondiale ?

Concernant le secteur habité, selon moi, ce qui se profile, ce n'est pas l'objectif Lune, mais plutôt l'espace Terre-Lune qui sera habité

différemment. À plus long terme, la question sera de savoir comment on va occuper l'espace dans les trois prochaines décennies, au-delà de la Lune. La station Lunar Gateway a été pensée avec cette préoccupation en ligne de mire : il s'agit d'un point relais logistique d'où les gens pourront aller sur la Lune, sur Mars, et rentrer. C'est comme si, inconsciemment, on augmentait le volume de la sphère terrestre – on « rehausse » la surface terrestre. Certes, la physique spatiale reste la même et les contraintes de la gravitation sont toujours là, mais on commence à imaginer que l'on va pouvoir réparer des choses, fabriquer des pièces en orbite avec l'impression 3D... L'idée est de mieux s'approprier l'espace dans les limites de la physique.

Et pour la Lune ?

La surface de la Lune elle-même semble sujette à cette ambition, avec l'évocation toute récente aux États-Unis de nouveaux accords internationaux pour réglementer une activité minière qui, pourtant, relève aujourd'hui de la science-fiction. Est-ce une bonne ou une mauvaise chose ? Je ne sais pas. Mais, du point de vue des Américains, il y a cette idée que la croissance rapide du nombre d'objets en orbite autour de la Terre va autoriser de plus en plus de liberté, comme le promettent par exemple la propulsion électrique et l'autonomie toujours croissante des systèmes orbitaux de grande ampleur. Bien sûr, rien n'est gravé dans le marbre. Tout cela fait encore débat outre-Atlantique et soulève parfois un certain scepticisme, notamment à l'approche des élections présidentielles. Mais, pour certains, l'espace doit redevenir cette nouvelle frontière qu'il faut être les premiers à mettre en valeur pour en tirer bénéfice. Et l'effort en ce sens, soutenu depuis des années, ne semble pas les démentir. ■

Propos recueillis par Philippe Pajot



JEAN-FRANÇOIS CLERVOY, spationaute de l'Agence spatiale européenne. Il a effectué trois missions à bord de la navette spatiale américaine.

« L'espace, vecteur de normalisation ? »

“ Au départ, dans la Station spatiale internationale (ISS), il y avait une volonté bienveillante des partenaires de tout normaliser, et les Américains ont proposé un logiciel pour l'interface homme-machine. Russes et Européens ont alors investi dans des licences coûteuses, mais, en cours de route, les Américains ont changé la règle du jeu. On a donc des écrans de contrôle légèrement différents d'un module à l'autre. Par ailleurs, si les Canadiens et les Japonais ont converti leur industrie spatiale au système métrique (l'Europe et la Russie l'utilisaient déjà), les Américains ont abandonné. Du coup, il y a deux systèmes d'unités et deux trousseaux à outils. Toutefois, la température est partout en degrés Celsius, c'est déjà cela. Les Russes sont sans conteste la nation la plus « métrique » – même en aéronautique, ils utilisent ce système d'unités. Les alimentations électriques aussi sont différentes : courant alternatif côté américain et continu côté russe. Idem pour les méthodes d'assainissement de l'eau potable : ions d'argent d'un côté et chlore de l'autre ! Avec l'arrivée des acteurs privés et les coopérations qui s'amplifient, on peut espérer à terme une meilleure normalisation des standards de fonctionnement des futurs vaisseaux spatiaux, mais rien n'est sûr... ”

Les entrepreneurs s'offrent la Lune

Les acteurs privés de l'exploration spatiale – notamment SpaceX, Blue Origin et Dynetics – engrangent une bonne partie des contrats de retour sur la Lune, en particulier ceux qui concernent les atterrisseurs lunaires transportant des humains. Sont-ils visionnaires ou pragmatiques ?

SpaceX, Blue Origin, Dynetics : ces trois entreprises se partageront un gâteau d'environ 900 millions de dollars attribué par la Nasa pour la première phase d'études de conception d'un atterrisseur lunaire habité (HLS) d'ici à février prochain, dans le cadre de son programme Artemis de retour sur la Lune (1). Ensuite, l'agence américaine décidera avec qui elle poursuit l'aventure qui doit conduire des astronautes américains à fouler à nouveau le sol lunaire, en 2024.

Les trois lauréats de ce concours d'idées richement doté symbolisent la révolution en cours dans le spatial américain, et la relégation au second plan d'industriels qui ont accompagné la Nasa depuis des décennies : Lockheed Martin et Northrop Grumman – constructeur des modules lunaires d'Apollo – ont conclu un partenariat avec Blue Origin pour participer à cet appel d'offres. « *Ce qui se passe est assez incroyable ; le choix de ces trois lauréats montre à quel point la Nasa tente de changer de paradigme et de casser les habitudes de ses partenaires historiques, souligne*

Christophe Bonnal, de la direction des lanceurs du Cnes, l'agence spatiale française. *Par exemple, Blue Origin n'a jamais rien lancé dans l'espace, si ce n'est son engin suborbital New Shepard, et on les retrouve lauréats d'un appel d'offres pour un module habité qui doit déposer des humains sur la Lune.* » Créé en 2000, Blue Origin était perçu comme une lubie de son fondateur, le multimilliardaire Jeff Bezos, qui consacre depuis un milliard de dollars par an à son bébé. Et il a de quoi faire, puisque sa fortune personnelle représente environ 6 ou 7 ans de budget annuel de la Nasa (et 40 ans de budget du Cnes!). Le résultat est là : la firme de Jeff Bezos recevra plus de la moitié de l'enveloppe attribuée par la Nasa.

Le second lauréat était plus attendu : SpaceX n'a été créé qu'en 2002, mais a depuis enchaîné les réussites. La firme d'Elon Musk a notamment

900

MILLIONS DE DOLLARS ont été alloués par la Nasa pour la première phase d'études de conception d'un atterrisseur lunaire habité.

révolutionné l'industrie du lancement des satellites, en opposant la première concurrence américaine sérieuse aux lanceurs européens Ariane. Sa capsule Dragon a ravitaillé en fret la Station spatiale internationale (ISS) à vingt reprises depuis 2012. Le successeur Dragon 2 se décline entre une version cargo et une autre habitée, le Crew Dragon, qui doit emmener deux astronautes américains, le 27 mai, vers la Station spatiale internationale ! Une première mission américaine habitée vers l'ISS depuis l'arrêt des vols des navettes spatiales en juillet 2011, qui permettra enfin à la Nasa de retrouver son indépendance vis-à-vis des Soyouz russes, jusqu'ici seuls capables d'assurer les rotations d'astronautes à bord de l'ISS.

Boeing a raté le coche

Troisième lauréat de la compétition pour l'alunissage habité, Dynetics est un quasi-inconnu. Et pourtant l'entreprise souffle cette année ses 46 bougies... Dynetics s'est longtemps spécialisé dans la conception de capteurs et de technologies pour les missiles, avant de mettre un pied dans les technologies automobiles et la cybersécurité. Son ●●●

Contexte

Le 27 mai, si tout se passe comme prévu, une fusée d'une société privée - SpaceX - aura emmené des astronautes vers la Station spatiale internationale. Ce sera la première mission américaine habitée depuis l'arrêt des vols des navettes spatiales, en 2011.

●●● intérêt pour le domaine spatial remonte à une dizaine d'années seulement. Un intérêt et des compétences acquises qui ne sont pas passés inaperçus, puisque Dynetics contribue au programme du lanceur SLS de la Nasa.

Le grand perdant de cette évolution du secteur spatial américain est paradoxalement le plus gros de tous, l'un des partenaires historiques de la Nasa: Boeing, qui accumule les déboires, n'a pas été retenu pour aller déposer des Américains sur la Lune. Il doit se contenter de construire le SLS pour le compte de la Nasa, tandis que le compartiment habité de ce lanceur, Orion, a été confié à Lockheed Martin.

« Ce qui me revient aux oreilles, c'est que la proposition d'atterrisseur lunaire de Boeing était vraiment mauvaise; ils ont raté le coche, raconte Xavier Pasco, directeur de la Fondation pour la recherche stratégique, qui suit plus particulièrement le secteur spatial américain. De plus, ils ont des problèmes avec leur Starliner. » Ce dernier, concurrent du Crew Dragon de SpaceX, a échoué lors de son premier vol à vide, en décembre dernier, vers l'ISS, qu'il n'est jamais parvenu à

rejoindre. Et la Nasa a découvert depuis un défaut dans le logiciel de bord, semant une fois encore le doute sur la capacité de Boeing à vérifier ses codes informatiques. C'est en effet un problème similaire qui a conduit les autorités aéronautiques à clouer au sol tous les Boeing 737 Max depuis mars 2019. « L'enquête post-échec a identifié 61 anomalies, dont plusieurs auraient pu avoir des conséquences catastrophiques s'il y avait eu des astronautes

La Nasa passe de plus en plus de contrats de services avec les acteurs privés

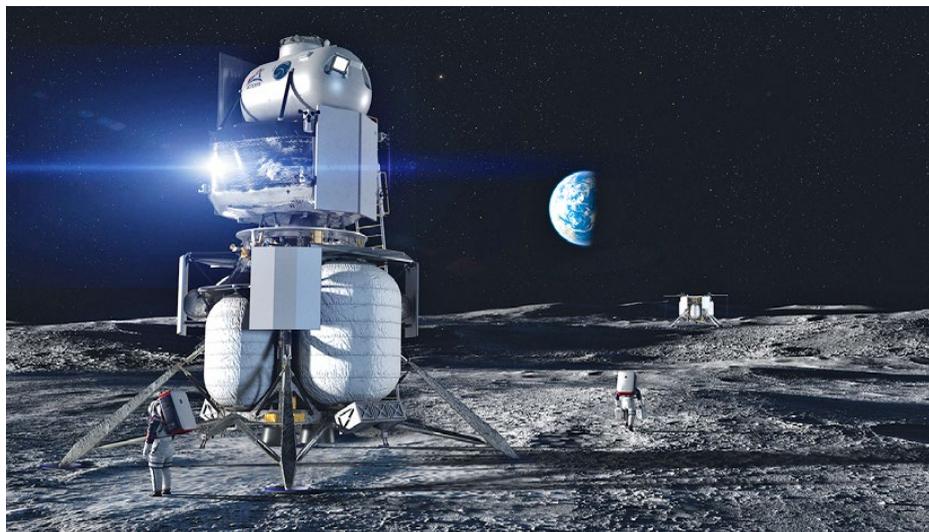
à bord », relève Christophe Bonnal. Boeing sera-t-il le Kodak de l'industrie spatiale, un colosse condamné à l'effondrement pour n'avoir pas évolué à temps ? « Probablement pas. Des entreprises comme Boeing, Northrop Grumman ou Lockheed Martin ont trop de liens stratégiques avec le Pentagone pour disparaître », répond Xavier Pasco.

Derrière les succès des uns et les malheurs des autres se profile une profonde transformation de la

Nasa et de sa collaboration avec le secteur privé. « Pendant des décennies, la Nasa passait commande au privé pour qu'il construise les engins dont elle avait besoin, explique Francis Rocard, responsable des programmes d'exploration du Système solaire au Cnes. C'était d'ailleurs comme cela partout, excepté en URSS. C'est ce type de contrat que l'on retrouve encore avec Boeing, pour la construction du lanceur SLS. Ce qui est nouveau, c'est que la Nasa passe de plus en plus de contrats de services: elle paie SpaceX pour le transport de fret, et bientôt d'astronautes, vers la station spatiale internationale. »

De la même manière, l'agence américaine a lancé le CLPS, un programme pour financer la création de services commerciaux de transport de matériel sur la Lune, doté de 2,6 milliards de dollars sur dix ans. « Toute start-up qui démontrera sa capacité à livrer une charge utile sur la Lune sera préfinancée par la Nasa, poursuit Francis Rocard. C'est un peu un "Amazon lunaire" qui viendra compléter le service de livraison de SpaceX vers l'ISS. » Treize entreprises ont d'ores et déjà été présélectionnées par la Nasa, dont Astrobotic Technology, qui a passé 28 contrats pour un prix d'appel de 1 million de dollars le kg livré sur la Lune, à partir de 2021. La Nasa ne paiera pas systématiquement pour la totalité de la charge utile – souvent une moitié –, car d'autres organismes publics ou privés pourront aussi déposer des instruments sur le sol lunaire.

« Cette évolution de l'industrie spatiale américaine est liée, entre autres, aux interrogations récurrentes sur le devenir de la Nasa, estime Xavier Pasco. À son arrivée à la Maison Blanche, en 2008, Barack Obama a tout remis à plat et annulé le programme de retour sur la Lune voulu par George W. Bush. La Nasa avait de grands projets, mais dont les objectifs

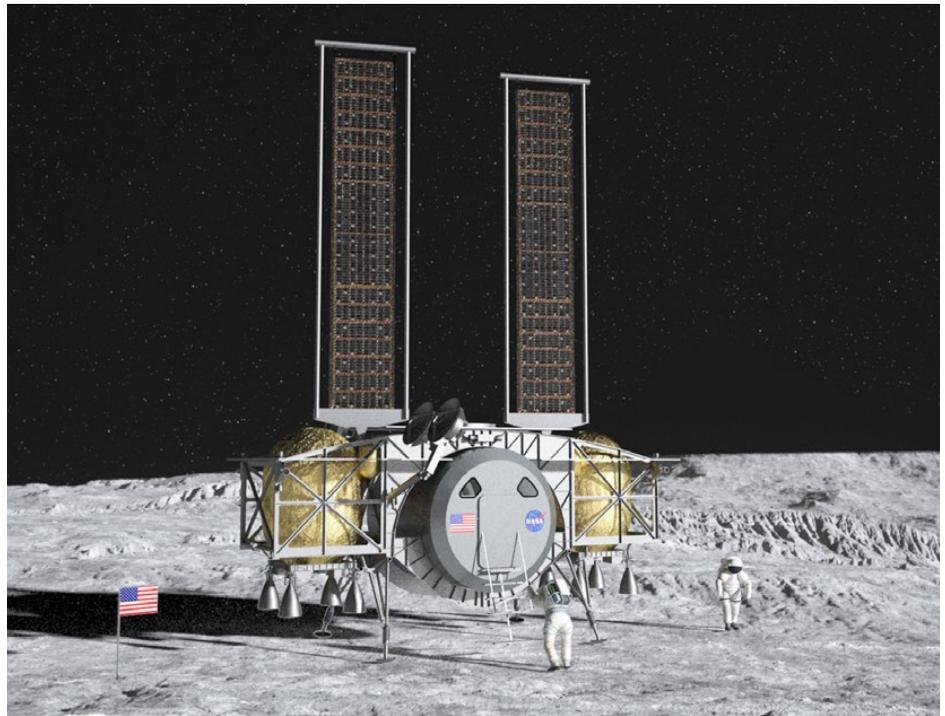


▲ L'Integrated Lander Vehicle (ILV), un atterrisseur à trois étages, est développé par Blue Origin, conjointement avec les sociétés Lockheed Martin, Northrop Grumman et Draper (vue d'artiste).

n'étaient pas clairs. Et cela a coïncidé avec l'arrivée de nouveaux acteurs industriels qui vendaient à la fois un service, mais aussi une vision. Quand Elon Musk explique qu'il va construire un Starship pour déposer une centaine de personnes sur Mars, et un million en un siècle, cela peut faire sourire. Mais cela permet aux gens de se projeter dans l'avenir, à un moment où la Nasa était coincée entre un programme mal fagoté et de nouveaux acteurs visionnaires. » L'arrivée de Donald Trump, en 2016, rebat une nouvelle fois les cartes. Il n'est pas fan d'Elon Musk et voit un ennemi en Jeff Bezos, notamment parce que ce dernier est propriétaire du *Washington Post*, un média très critique vis-à-vis de l'hôte de la Maison Blanche. Résolu à faire le contraire d'Obama, Donald Trump ordonne donc à la Nasa de retourner sur la Lune. « Cela redonne un objectif à la Nasa; Musk et Bezos se sont remis dans le sillage en expliquant qu'ils pouvaient à la fois apporter leur capacité technologique, mais aussi leurs idées, souligne Xavier Pasco. C'est ainsi qu'a été lancé l'appel d'offres, qui a débouché sur les trois contrats d'études d'un atterrisseur lunaire habité. »

Mieux et moins cher

Les mutations en cours dans le domaine des capsules de fret ou habitées vont-elles toucher à leur tour les lanceurs super-lourds, seuls capables d'emporter des humains au-delà de la banlieue terrestre ? Ce n'est pas gagné, estime Francis Rocard : « Il est fort probable que le SLS, qui est conçu à l'ancienne – avec un sous-traitant qui exécute une commande de la Nasa – soit le lanceur d'exploration habitée des vingt ou trente prochaines années. » Souffrira-t-il de la concurrence du Starship, qu'Elon Musk veut envoyer sur la Lune et sur Mars ? « Il faudrait que la Nasa le cofinance, car SpaceX ne pourra pas payer



▲ L'atterrisseur lunaire habité (HLS) conçu par la société Dynetics comprend un seul élément fournissant les capacités de montée et de descente (vue d'artiste).

▼ Le 27 mai 2020, Bob Behken (à gauche) et Doug Hurley devraient rejoindre l'ISS à bord du véhicule spatial Crew Dragon.



seul un tel développement, poursuit Francis Rocard. C'est un SLS et son étage habité Orion qui emmèneront les premiers Américains vers la Lune. » C'est d'autant plus probable que la Nasa est pressée. « Les États-Unis veulent y retourner très vite, estime Christophe Bonnal. Imaginez que les Chinois y parviennent avant, même s'ils n'en sont pas encore là. C'est pour cela que l'objectif de 2024 a été fixé. Une fois ce retour effectué, les Américains pourront prendre leur temps. » Pour Xavier Pasco, la suprématie

du SLS et de son module passager Orion risque d'être éphémère : « Ce programme connaît déjà de nombreux retards et surcoûts. C'est un lanceur qui affiche un rapport coût-performance très défavorable, par rapport au savoir-faire démontré de SpaceX et supposé de Blue Origin et son futur lanceur lourd New Armstrong. Bien sûr, des lanceurs de la catégorie du SLS n'existent pas encore, mais la force des nouveaux acteurs, c'est de construire mieux et pour moins cher. »

Le quatrième prototype du futur Starship de SpaceX a franchi une série de tests, dont un allumage au banc d'essai d'un moteur Raptor réussi le 5 mai dernier, alimenté en méthane et oxygène liquides (2). Le Starship devrait être entièrement réutilisable. « Cet essai il y a quelques jours est une belle réussite, commente Christophe Bonnal. La Lune est certes encore loin, mais elle se rapproche tous les jours. » ■

Denis Delbecq

(1) Nasa, tinyurl.com/Companies-Artemis-Moon, avril 2020.

(2) Spaceflight Now, tinyurl.com/SpaceX-Raptor-Starship, mai 2020.

3

Bonnes feuilles du livre **Dernières nouvelles de Mars**

Prochain arrêt, la planète Rouge

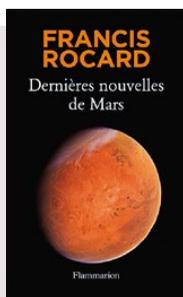
Responsable du programme d'exploration du Système solaire au Centre national d'études spatiales, le planétologue Francis Rocard vient de publier un ouvrage synthétique consacré aux découvertes récentes sur Mars. Dans l'extrait que nous présentons, il revient sur l'étude de la Nasa concernant l'exploration de la planète Rouge, et sur le financement et les justifications des missions humaines.

“ L'envoi de l'homme sur Mars est l'objectif central des États-Unis pour l'exploration habitée du Système solaire. Cet objectif est très consensuel depuis plusieurs décennies, tant à la Nasa qu'à la Maison Blanche et au Congrès. [...] Cette entreprise est si démesurée que seuls les États-Unis l'intègrent. Ils en ont à la fois les capacités technologiques et financières. [...] Depuis près de trente ans, la Nasa réalise des

études successives de Design Reference Mission visant à définir un concept de référence pour la mission et à orienter la recherche et les développements à court terme. La dernière et la plus complète date de 2009, avec la Mars Design Reference Architecture 5.0 (DRA 5.0) reposant à l'époque sur le lanceur lourd Ares V (abandonné aujourd'hui, mais remplacé par le SLS) et sur la propulsion nucléaire thermique pour le transport. Par ailleurs, cinq ans plus tard, le Congrès a demandé au National

Research Council [NRC] de revisiter cette étude et en particulier d'aborder la question de son financement, qui nécessite d'échelonner dans le temps les différentes étapes. Les sommes requises pour Apollo ont en effet abouti à augmenter le budget de la Nasa d'un facteur 25 en cinq ans, ce qui représente un effort sans précédent dans le domaine spatial, pour atteindre près de 5 % du budget fédéral en 1965 ! Cette année-là, le budget de l'agence équivalait à un montant de 45 milliards actuels, soit plus du double de ce qu'il est aujourd'hui.

Les auteurs du rapport estiment impensable [...] une augmentation similaire dans les décennies à venir. Il est donc nécessaire d'étaler les dépenses dans la durée, d'où le titre du rapport du NRC, « Pathways to Exploration ». Il consacre une vingtaine de pages à discuter les justifications de cette extraordinaire entreprise qui va engloutir des milliards de dollars et orienter le programme spatial américain sur plusieurs décennies. Il s'agit de proposer au politique des réponses



Francis Rocard,
Flammarion, 160 p.,
12 €, à paraître
le 3 juin 2020.

Dernières nouvelles de Mars

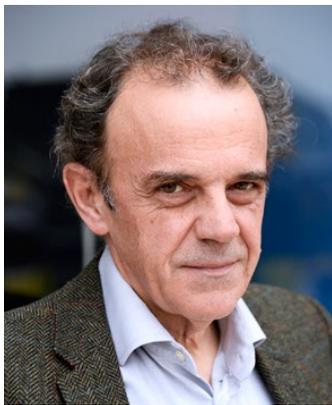
Passionné par la planète Rouge, l'auteur fait le point sur ce que l'on sait de son histoire, et de l'eau qui s'y trouvait et s'y trouve encore. Pour lui, l'idée que l'homme ira l'explorer directement est acquise. Il présente de manière claire les différentes missions possibles vers Mars et sur Mars, des plus simples aux plus complexes. D'où une idée de progression, avec une étape lunaire qui paraît indispensable – une station spatiale en orbite autour de la Lune. Impossible pour certains, l'entreprise lui paraît plausible, même si le financement et le calendrier pourraient déraiser en raison de la crise consécutive à la pandémie actuelle. L'impossible est en préparation, raconte-t-il.

Ph. P.

à la question « Pourquoi aller sur Mars? », sachant que la réponse doit être pertinente aujourd'hui comme dans un demi-siècle! Pour cela, le Conseil s'est efforcé de clarifier l'argumentaire des vols habités dans l'espace lointain.

En quelque sorte, ces « éléments de langage » sont à destination de la Maison Blanche et de la Nasa, qui devront justifier les dépenses considérables auprès de l'opinion publique. Pas moins de sept arguments sont abordés qui vont de la R&D, la sécurité nationale, la stature internationale, la science, l'éducation et l'inspiration jusqu'à la survie de l'humanité ou même une « destinée humaine partagée ».

En aucun cas, les dépenses de R&D et leurs éventuelles retombées économiques (*spin-off*) ne sauraient justifier les formidables dépenses du programme. La sécurité nationale, souvent mise en avant pour justifier l'action politique américaine, est jugée peu crédible, tant aujourd'hui que demain. La dimension internationale est indéniable, mais ne justifie guère, à elle seule, un tel projet. L'inspiration et les vocations scientifiques que ce programme suscitera



1957 Naissance à Paris
1986 Doctorat en astrophysique.
1989 Il entre au Cnes.
1996 Il coordonne le programme d'exploration martienne.

auprès des plus jeunes sont certaines, à l'instar du programme Apollo, qui a suscité aux États-Unis un engouement des étudiants pour les sciences dures – l'expression *rocket science* reflétant le savoir-faire des ingénieurs du spatial –, quantifié par un fort accroissement du nombre de thèses soutenues dans les années 1960-1970. Mais les missions automatiques à vocation scientifique sont considérées comme plus attractives pour les jeunes et... d'un meilleur rapport qualité-prix. Sur la valeur relative des missions automatiques par rapport aux vols habités, l'homme a des capacités de réaction à l'inattendu bien plus efficaces que le robot – et dans un temps très court –, c'est indéniable, mais ce ne sera probablement plus le cas dans un avenir plus ou moins proche. Cet argument ira en s'amenuisant, au fur

et à mesure des perfectionnements technologiques et de l'autonomie des robots explorateurs, pourvus à terme d'intelligence artificielle.

“ Quid de la survie de l'humanité comme argument pour justifier

l'envoi de l'homme sur Mars? Il faut préciser d'emblée que la planète Rouge et son environnement hostile ne seront probablement jamais, contrairement à ce que certains affirment, le nouvel eldorado que les Terriens coloniseront quand notre planète sera devenue un lieu invivable du fait de l'exploitation irresponsable des ressources, de la pollution galopante et du réchauffement climatique. En effet, le fait de rendre Mars habitable, ou « terraformation », est très certainement irréalisable, si l'on en juge par les études et les descriptions qui en ont été faites. Les coûts avoisineraient plusieurs milliers de milliards de dollars, pour une durée du processus d'augmentation de la pression et de la température s'échelonnant sur plusieurs siècles! S'il est permis de s'interroger sur la crédibilité du responsable de la Maison Blanche qui déciderait ●●●

▼ *La Nasa, dont l'objectif est d'envoyer des hommes sur Mars, fait appel aux projets d'acteurs privés (ici, le Mars Base Camp de l'entreprise américaine Lockheed Martin).*



UNE PETITE STATION SPATIALE EN ORBITE

Des hommes fouleront-ils le sol martien ? Probablement oui, car c'est le but affiché dès l'origine. L'objectif est conditionné par le développement du MAV [*Mars Ascent Vehicle, une petite fusée qui doit faire la navette entre le sol et l'orbite, NDLR*] et son corollaire, la production d'ergols à partir des ressources martiennes. Or tout reste à faire dans ce domaine. Aucune quantification de l'eau dans le premier mètre du sous-sol n'a été faite. Aucune démonstration de son extraction n'a encore été tentée. Les options sont sur la table, mais des choix majeurs vont devoir



▲ Un MAV devra faire la navette entre le sol et l'orbite (image d'artiste).

être effectués : le type de site hydraté (argileux, sulfatés, glaciers enterrés...), la technique d'extraction... La version la plus simple pour poser le pied sur Mars consistera à mettre en orbite une petite station spatiale et à effectuer de courts séjours depuis l'orbite ne nécessitant aucune installation préalable à l'arrivée des équipages (comme pour Apollo). Ce type de mission

signifie que les hommes ne retourneront pas forcément sur le même site, mais pourront explorer une région différente à chaque aller-retour depuis l'orbite. Il faudra néanmoins refaire le plein d'ergols pour le MAV, supposé réutilisable, et pour chaque mission ajouter l'étage de descente qui aura été abandonné à la surface. On voit que la réutilisabilité du MAV est une contrainte forte dans le dimensionnement d'ensemble. La version minimale consistera à effectuer un unique séjour de quelques jours à la surface.

E. R.

●●● une telle entreprise, la faisabilité pratique de la terraformation n'est en rien prouvée. Bref, le risque est élevé que ces budgets faramineux soient dépensés en pure perte. En somme, aucun de ces arguments ne justifie à lui seul l'entreprise, en raison de son coût jugé excessif.

Finalement, la motivation durable est de savoir jusqu'où l'homme pourra aller dans le cosmos ; c'est le concept de la nouvelle frontière qui affirme que l'homme est né pour explorer et découvrir son univers. En revanche, ce qu'il pourra accomplir une fois arrivé à destination est encore inconnu. Un aveu explicite qu'à ce jour le rôle de l'homme dans l'exploration n'est pas concrètement défini, hormis sa survie qui justifiera à elle seule une grande partie de son activité sur place. Même si on peut douter que cet argument minimal suffise à convaincre le politique et surtout l'opinion publique, les sages ont l'honnêteté de dire qu'aucun autre argument plausible aujourd'hui ne le sera encore au milieu du siècle. Il est même rappelé que le niveau d'intérêt du

public pour l'exploration est faible au regard d'autres domaines comme les questions économiques, la santé, l'éducation et... les découvertes scientifiques.

« Enfin, il y a une justification qui n'est pas abordée dans le rapport.

C'est l'héritage d'Apollo, qui a abouti à un fait unique au monde : les États-Unis consacrent la moitié de leur budget spatial (civil) aux vols habités. Depuis cinquante ans, cet héritage a été entretenu par l'intense lobbying des grands industriels concernés (Boeing, Lockheed Martin...) auprès des politiques, surtout dans les États où ces industriels sont implantés, afin de poursuivre à tout prix les programmes habités et d'éviter toute remise en question qui serait catastrophique en termes d'emploi. Cela s'est traduit, entre 1981 et 2011, par le programme de la navette spatiale, qui a tout de même coûté 170 milliards de dollars, pour un véhicule qui s'est avéré dangereux (14 morts) et très cher (près de 1,5 milliard) à chaque utilisation.

Puis ce fut la Station spatiale internationale, dont les premières études datent de près de quarante ans. Son exploitation doit se poursuivre jusqu'en 2024 ou 2028, pour un coût annuel de 3 à 4 milliards, et un total cumulé de 150 milliards. Avec le niveau d'investissement dans ce secteur et le nombre d'emplois concernés, on comprend que la pression intérieure incite à poursuivre ce type de programme. Et comme la Lune a été explorée, c'est naturellement Mars qui est aujourd'hui l'objectif à atteindre.

[...] Il faut rappeler que les États-Unis sont les leaders incontestés (et de loin) du domaine, qu'en tant que pionniers ils doivent faire des choix sans pouvoir se référer à d'autres et que ces choix sont lourds de conséquences. Enfin, il existe au Congrès une crainte que le pays perde son leadership, notamment avec la montée en puissance de la Chine dans tous les domaines économiques. Voilà qui les oblige à aller toujours de l'avant dans l'exploration, sous peine d'être dépassés dans vingt ou trente ans... ■

Avons-nous besoin d'humains dans l'espace ?

Donald Goldsmith, Berkeley, et Martin Rees, université de Cambridge

À l'heure où les tenants de l'exploration humaine envisagent d'envoyer des astronautes vers Mars, deux éminents astronomes s'interrogent sur les motivations sous-jacentes. Pour eux, les missions automatisées sont et resteront la solution la plus efficace en termes de coût et de retour scientifique.

Quel avenir se profile pour les humains dans l'espace ? En 2019, le cinquantième anniversaire des premiers hommes sur la Lune a coïncidé avec une foule de projets publics et privés visant à envoyer des astronautes bien au-delà des orbites qui ont marqué les limites de l'exploration spatiale depuis 1972. La Chine, qui a fait atterrir pour la première fois un vaisseau spatial sur la face cachée de la Lune en 2019, prévoit d'y faire intervenir des astronautes. L'Inde, qui a lancé une fusée sur la Lune en 2019, rêve d'en faire autant. La Russie, qui ne forme plus de cosmonautes, fournit toujours les fusées et les sites de lancement vers la Station spatiale internationale.

L'administration de Donald Trump propose de créer une base lunaire qui servirait d'étape dans la conquête de Mars. Les milliardaires Elon Musk et Jeff Bezos investissent des sommes colossales dans des missions spatiales humaines – Elon

Musk a déjà créé une entreprise de fusées utilisée par la Nasa, baptisée SpaceX (lire p. 42).

Quels bénéfices retirerons-nous de ces efforts ? Enfants des années 1950, nous fûmes ravis par les premiers satellites autour de la Terre en 1957, par les premiers astronautes sortis dans l'espace pour la première fois en 1965, puis par ce qui fut l'apogée des vols spatiaux habités : les six explorations lunaires par la Nasa de 1969 à 1972. La science ne fut pas seule à se nourrir de ces exploits : l'esprit humain s'envola jusqu'à l'extase du 29 juillet 1969, quand Neil Armstrong laissa sur la Lune la première empreinte humaine. Au cours des années 1960,



ASTRONOMES

Donald Goldsmith (1) est astronome et écrivain à Berkeley, en Californie. Martin Rees (2), astronome royal du Royaume-Uni, a été président de la Royal Society et Master du Trinity College à l'université de Cambridge.

nous sommes devenus des astronomes passionnés par l'exploration du cosmos – une retombée de plus de l'entreprise pharaonique qui lança des humains dans l'espace.

Des êtres fragiles

Mais les cinq dernières décennies nous ont appris sans ambiguïté le meilleur moyen d'explorer l'Univers. Les êtres humains qui tentent de s'aventurer dans l'espace sont fragiles : ils ont besoin d'un apport continu d'oxygène, d'eau, de nourriture, d'abris ; ils doivent endurer de longues périodes d'impesanteur ; leurs capacités physiques ne changent pas d'une génération à l'autre ; et leur perte, quand elle survient, jette un voile mortuaire sur la joie que nous avons anticipée de faire corps avec leur aventure. Les engins spatiaux automatisés, en revanche, n'ont besoin que d'électricité ; ils coûtent infiniment moins cher ; nous savons les faire évoluer, contrairement aux humains ; et s'ils échouent, leur perte, bien que grave pour les ●●●

Contexte

Le débat existe depuis les débuts

de la conquête spatiale : l'homme a-t-il sa place dans l'espace ? Le vol habité est-il utile ? Scientifiques, industriels et politiques s'opposent le plus souvent. Alors que nous connaissons sur Terre des crises qui bouleversent nos sociétés, ces questions sont de plus en plus d'actualité.

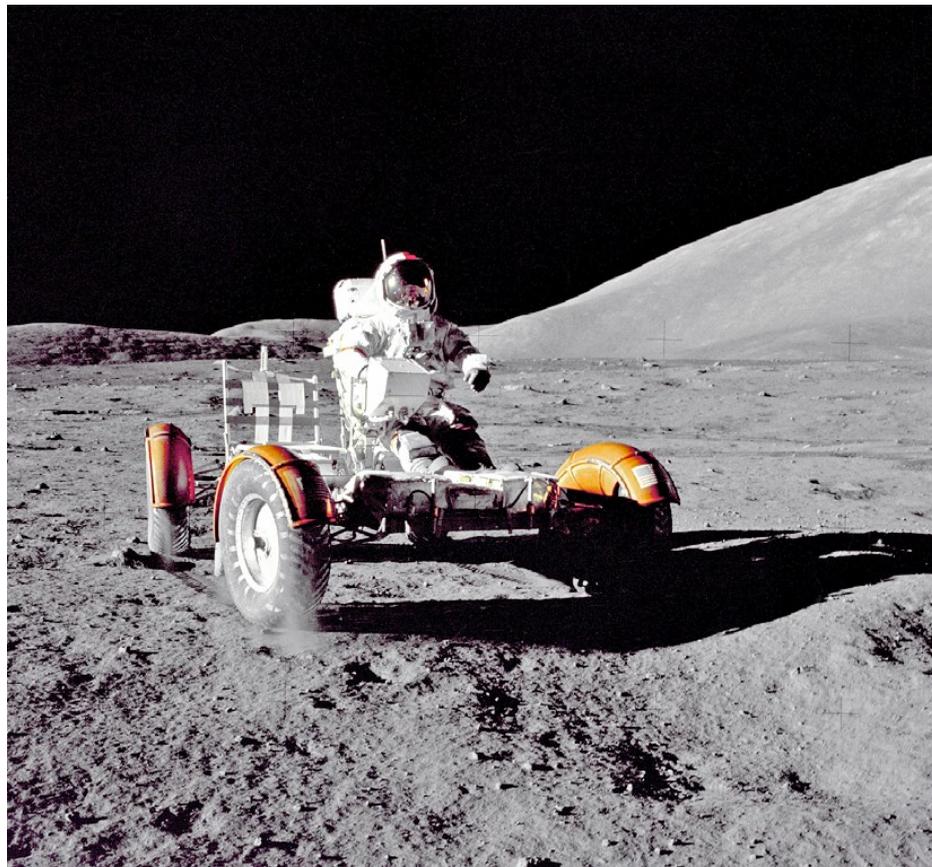
●●● scientifiques qui espéraient récolter leurs données, ne coûte jamais que de l'argent.

Depuis le premier atterrissage sur la Lune, nous avons envoyé plusieurs centaines de sondes partout dans le Système solaire : de Mercure, la planète la plus proche du Soleil, jusqu'à Arrokoth, un planétésimal en orbite loin au-delà de Pluton (1). Des vaisseaux ont atterri sur Mercure, Vénus et Mars, ont passé des années en orbite autour de Jupiter et de Saturne, ont sondé Uranus et Neptune; l'un d'entre eux, la sonde japonaise Hayabusa-2, passera près de la Terre à la fin de l'année pour y lâcher une capsule contenant des matériaux glanés sur l'astéroïde Ryugu, l'un des plus vieux membres du Système solaire. De multiples missions lunaires ont cartographié la face cachée de la Lune, détecté des anomalies gravitationnelles sur sa face toujours visible, et découvert d'énormes quantités d'eau gelée dans le sol de ses pôles.

Le potentiel des robots

Restreints aux orbites terrestres basses (2), les astronautes ont surtout apporté l'expérience des exigences et des risques de la vie dans l'espace. Les cinq missions de réparation du télescope Hubble, également en orbite basse à la distance maximale que la défunte navette spatiale pouvait atteindre, furent de loin la plus grande réussite des humains dans l'espace. Les astronomes ont été les premiers à applaudir ces exploits, mais ils ont aussi pris la mesure de ce fait ironique : en orbite basse, le rayonnement émis et réfléchi par la Terre diminue considérablement la capacité de Hubble à observer clairement et loin dans l'espace.

Le télescope James Webb, qui doit supplanter le vieil Hubble en 2021 – s'il n'y a pas de nouveau retard dû à la crise actuelle –, sera lancé plus loin que la Lune, jusqu'au point de Lagrange L2 du système Terre-Soleil,



▲ La Nasa a mené six explorations lunaires habitées de 1969 à 1972. Ici, Apollo 17, en 1972.

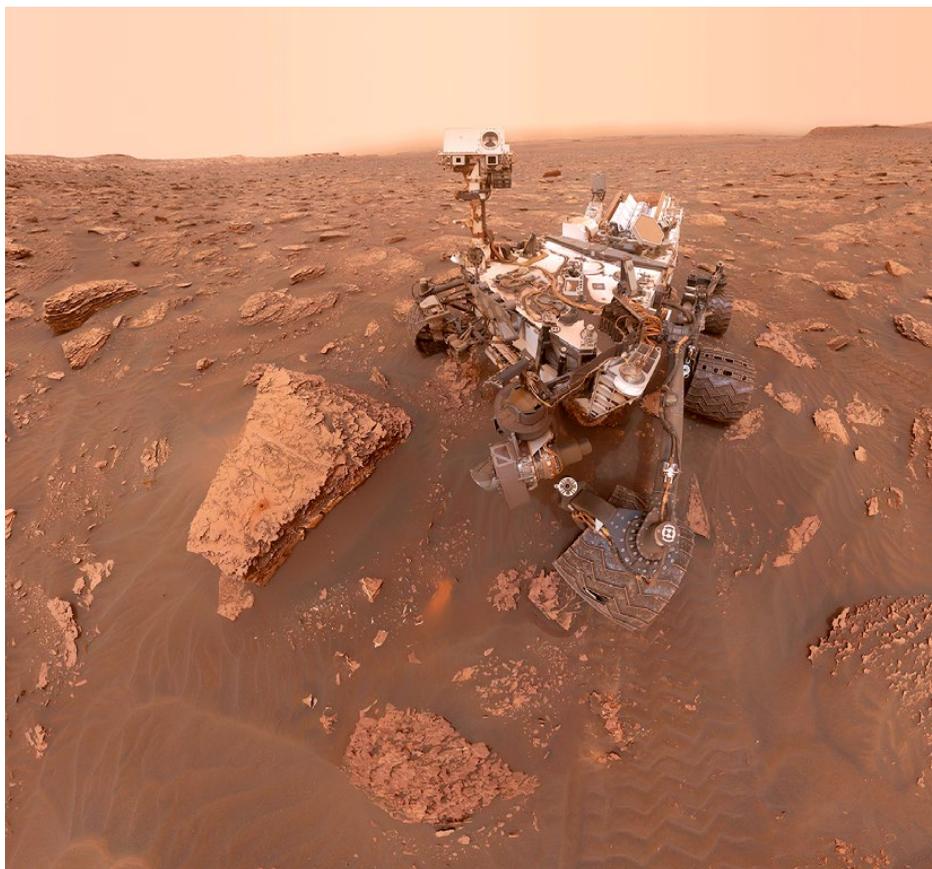
(2) **L'orbite terrestre basse** est une zone de l'orbite terrestre allant jusqu'à 2 000 kilomètres d'altitude, située entre l'atmosphère et la ceinture de Van Allen. On y retrouve des satellites de télédétection, des satellites de télécommunications ainsi que quelques stations spatiales, dont la Station spatiale internationale.

à 1,5 million de kilomètres de la Terre. Placés en L2, les satellites peuvent facilement maintenir une orbite stable au lieu de dériver comme ils le font à proximité de la Terre. Les astronomes y ont déjà lancé des engins spatiaux destinés à observer le cosmos en infrarouge, en ultraviolet et dans le domaine des rayons X, tout en étant protégés des interférences de notre planète.

Pourra-t-on compter sur des astronautes pour réparer des instruments situés au point L2? Une telle expédition serait au moins aussi complexe qu'un atterrissage sur la Lune, et sans doute plus coûteuse que la création et le lancement d'un nouvel observatoire plus performant. Les missions de réparation de Hubble ont en effet été bien plus onéreuses que de le remplacer par une version améliorée. Riccardo Giacconi, Prix Nobel de physique

2002, alors qu'il était directeur du Space Telescope Science Institute, disait en effet que la Nasa aurait pu envoyer sept copies de Hubble pour le prix effectif de toutes ces opérations de maintenance... Mais ces missions ont enflammé nos esprits, alors que mettre le télescope au rebut aurait été une profonde déception – l'opinion publique, qui aurait méprisé la deuxième solution alors qu'elle célébrait la première, peut jouer un rôle crucial dans les décisions de nos gouvernements.

Le contraste entre les missions spatiales robotisées et habitées ne fait que croître à mesure que s'améliorent nos capacités de miniaturisation, de réalité virtuelle et d'intelligence artificielle. Aujourd'hui, un géologue entraîné pourrait travailler sur la Lune aussi bien qu'un rover sur Mars, mais pas pour longtemps. Les futurs engins automatisés qui



▲ Le rover Curiosity, ici en 2018, est l'outil clé de la mission Mars Science Laboratory de la Nasa.

exploreront le cosmos seront équipés de nombreux outils pour sonder la nature des roches et des minéraux, d'une mémoire énorme et grandissante chaque année, et de la capacité de communiquer avec la Terre. Ils arpenteront la surface lunaire ou martienne pendant des décennies, en long, en large et en travers, en analysant continuellement la topographie, l'activité sismique et les strates géologiques. Des robots

seront aussi capables de réparer les engins spatiaux au point L2 ; d'autres pourront construire des structures complexes dans l'espace, par exemple un réseau de télescopes radio sur la face cachée et « silencieuse » de la Lune (2).

Si nous prenons le temps de peser le pour et le contre de l'envoi d'humains dans l'espace, nous nous rendons compte que la question n'est donc pas de savoir avec quelle facilité

les astronautes pourront réparer des instruments lointains, ou en combien de temps nous pourrions atterrir sur la Lune et y construire une base lunaire, ou pourquoi nous devrions poursuivre le projet d'envoyer des astronautes sur Mars et tenter d'y créer un habitat, mais plutôt : pourquoi voudrions-nous entreprendre ce genre de chose puisque des robots pourront faire leur travail plus vite, mieux et pour bien moins cher ? Pourquoi avons-nous besoin d'humains dans l'espace ?

La véritable force motrice des voyages humains dans l'espace est notre glorification en tant qu'êtres humains. Vaincre leurs multiples défis d'un vol longue durée dans l'espace nous inspire et nous ravit. Mais pour nombre de scientifiques, et une part du public, cet argument ne justifie pas le coût et le danger d'une telle mission. Pour d'autres, les dépenses et les dangers ajoutent au contraire du piment à l'entreprise. Nous sommes tous ou presque sensibles aux actions héroïques, et beaucoup verraient dans l'atterrissage d'humains sur Mars une réussite suprême de notre espèce.

Notons que plusieurs autres motivations se cachent derrière le soutien des expéditions habitées, parmi lesquelles le désir de surpasser nos rivaux ; la croyance que l'espace est le refuge ultime face à notre Terre détériorée ; et un empressement à exploiter les matières premières du Système solaire. Chacune d'elles mérite notre attention, quoique ●●●

L'EXPLORATION SPATIALE SOUMISE À UN TRAITÉ

En 1967, le Traité sur l'espace extra-atmosphérique a été signé sous l'égide des Nations unies. L'idée était de poser les fondements juridiques de l'exploration spatiale à l'époque de la course à la Lune. Les plus de cent signataires incluent les nations susceptibles d'effectuer des missions spatiales

au cours des décennies à venir, à l'exception possible de l'Iran. Les clauses principales interdisent les armes de destruction massive dans l'espace, stipulent que les corps célestes ne doivent être utilisés qu'à des fins pacifiques et ne peuvent en aucune façon être sujets à appropriation nationale, et que

toutes les parties doivent se soumettre à la législation internationale. Les avocats de l'espace, qui ont un grand avenir devant eux, pourront aisément contester le terme d'« appropriation nationale » et il y a fort à parier que ce traité ne régulera les actions d'aucun État ni entité privée. D. G. et M. R.

●●● chacune, à notre avis, soit un argument en faveur d'expéditions non pas humaines mais de plus en plus finement robotisées.

Sur la fierté nationale, l'argument de la guerre froide, selon lequel les Russes pouvaient prendre le dessus en établissant une base lunaire, n'a jamais eu de sens, puisque toute nation cherchant à utiliser l'espace pour lancer des missiles tenterait de le faire à proximité de la Terre, pas à 400 000 kilomètres de distance. Un effluve de cet argument persiste dans la fierté – peut-être même le sentiment de propriété – qu'une nation peut ressentir à envoyer la première des humains vers d'autres mondes, comme lorsque le président Trump exalte l'idée de planter « *le beau drapeau américain* » sur Mars. Bien que ce sentiment diffère considérablement de la simple fierté à l'égard des accomplissements humains, bon nombre d'Américains, par exemple, ne voient pas

d'inconvénient à éprouver l'une comme l'autre de ces émotions.

Peu de temps avant sa mort, en 2018, l'astrophysicien Stephen Hawking déclara : « *Se disperser dans l'espace est peut-être la seule chose qui puisse nous sauver de nous-mêmes. Je suis convaincu que les humains doivent quitter la Terre.* » Le milliardaire Jeff Bezos envisage pour ce faire de gigantesques colonies spatiales permettant la survie de millions de personnes. Celles et ceux qui rêvent de colonies spatiales ou d'habitats humains sur Mars les voient souvent comme l'opportunité de fonder une société meilleure, mais aussi de modifier les humains eux-mêmes pour les adapter à la faible gravité sur Mars ou à la force gravitationnelle artificielle produite par la rotation d'une énorme roue qui constituerait l'habitat spatial. Le génie génétique dans ces « environnements post-humains » pourrait également tenter de réduire les maladies

et prolonger la vie humaine. De tels projets séduisent ceux qui jugent l'avenir sur Terre sans espoir.

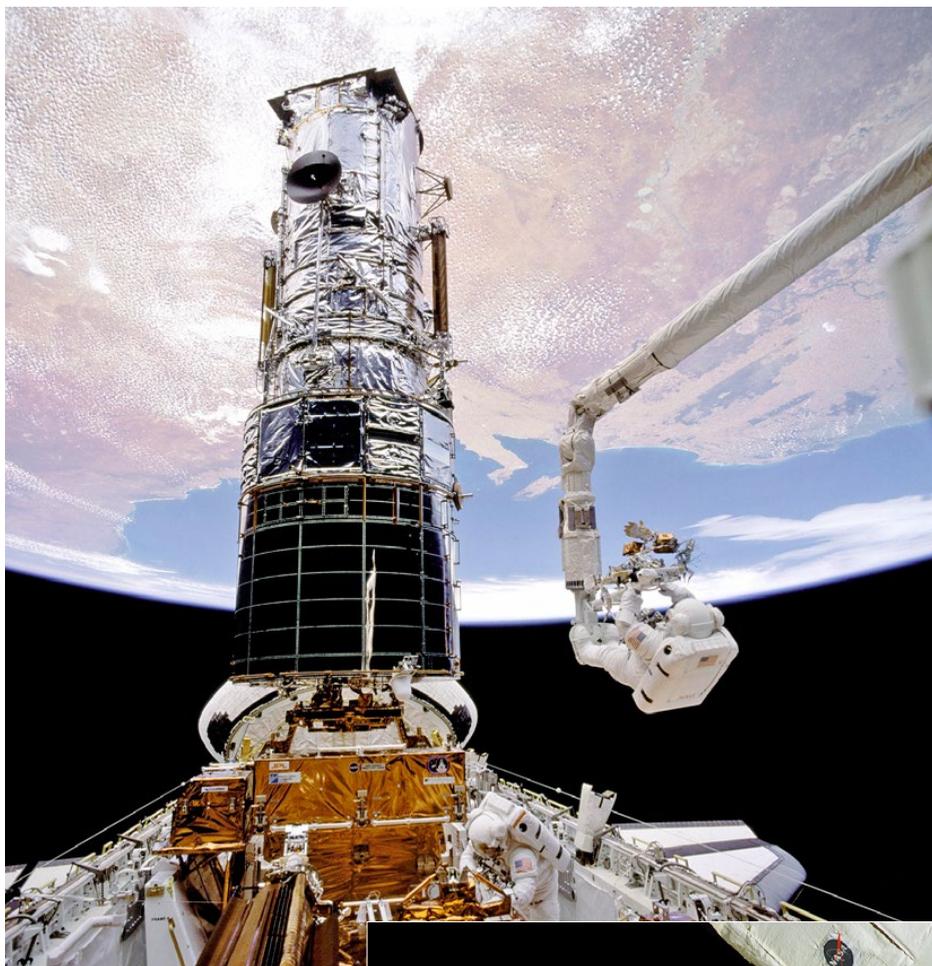
Quoiqu'on ne le crie pas souvent sur les toits, une motivation importante – et pas nouvelle – à l'exploration humaine du Système solaire est la quête de matières premières utiles sur Terre. Par exemple, l'hélium 3 lunaire, un isotope rare de l'hélium. Les noyaux d'hélium 3 fusionnent spontanément à température et densité suffisamment élevées, libérant de grandes quantités d'énergie sans déchets radioactifs. Il constituerait ainsi un combustible quasi parfait pour de futurs réacteurs à fusion nucléaire. Sur Terre, les noyaux d'hélium 3 ne représentent qu'un millionième des noyaux d'hélium, déjà rares, mais leur teneur relative dans le sol lunaire est 100 fois plus élevée (3), d'où les visions futuristes d'une société qui fonctionnerait à l'hélium lunaire, en quantité suffisante pour

5

MISSIONS HUMAINES de réparation du télescope Hubble ont eu lieu. Une grande réussite des humains dans l'espace mais qui, selon certains, aurait eu un coût exorbitant.



▲ La sonde japonaise Hayabusa-2 a prélevé, en 2018 et 2019, des matériaux sur l'astéroïde Ryugu, très ancien dans le Système solaire.



▲ Les missions de réparation du télescope Hubble ont constitué de véritables exploits (ici, en 1997).



assurer notre consommation électrique actuelle pendant des siècles. Les astéroïdes sont également des mines ambulantes de richesse. Pour la plupart, leur composition ressemble à celle de la Terre, mais quelques-uns sont constitués en grande partie de métaux tels que le fer, le nickel et le cobalt et, en plus petites quantités, d'argent, d'or et de platine. Un tel astéroïde, de la taille d'une grosse maison, contiendrait ainsi un million de kilogrammes

de métaux et une centaine de kilogrammes de platine, d'or et autres métaux rares sur Terre. On peut donc imaginer des missions spatiales utilisant ces abondants minéraux pour construire des colonies spatiales minières, et les énormes profits qui seraient tirés du retour sur Terre des métaux précieux. En 2015, le Congrès des États-Unis vota une loi connue sous le nom de Space Act, qui interdit toute

prétention d'autorité sur les corps cosmiques, mais promeut le droit des citoyens américains (et donc de leurs sociétés) à entreprendre « la récupération commerciale de ressources spatiales dénuées d'interférences nuisibles... moyennant l'autorisation et la supervision continue du gouvernement fédéral » (4). Le joli terme de « récupération », couramment employé dans le monde de l'extraction minière, tend à masquer les effets évidents de telles activités. D'un point de vue moral, avon-nous, en tant qu'humains, ou que citoyens américains, ou personnes ou entreprises privées, le droit d'altérer, voire de détruire l'environnement d'autres corps célestes ? Pour certains, la réponse est évidente : bien sûr, les ressources de ces mondes appartiennent aux premiers capables de les exploiter (lire l'encadré p. 49).

Contamination biologique

L'argument moral opposé repose sur l'idée que les humains ne devraient pas s'engager dans de telles activités à la légère, parce que ce que l'on fait peut ne pas être réparable. Pour les scientifiques, la menace la plus grave de la « récupération » des ressources extraterrestres réside dans le fait que les activités humaines peuvent brouiller pour toujours notre connaissance de l'origine et de la distribution de la vie dans le Système solaire. Où que nous atterrissions, nous laissons inévitablement des traces de nos propres formes de vie. La Nasa s'est inquiétée de ce problème dès les premières sondes envoyées sur la Lune, et a pris des mesures sérieuses, sachant qu'elles ne pourront jamais être suffisantes pour éviter la contamination biologique d'autres mondes. Des travaux d'extraction de grande envergure ne pourront jamais se faire sans contamination. Même la Lune et les astéroïdes, tout hostiles à la vie qu'ils soient aujourd'hui, ●●●

Une motivation importante est la quête de matières premières utiles sur Terre

●●● peuvent contenir des traces d'activité biologique passée. En ce qui concerne les colonies sur Mars – même d'« inoffensives » colonies d'exploration –, le problème est bien pire: la plupart des experts s'accordent à penser que la vie a probablement existé sur Mars quand l'eau circulait librement sur sa surface, et qu'elle peut même persister sous sa surface, où des bassins d'eau existent peut-être encore. La découverte de vie dans un monde voisin devrait révéler, en comparant son ADN ou une équivalence, si la vie dans le Système solaire a des origines diverses, ou si elle s'est transférée d'un monde à un autre à bord de météorites ou d'astéroïdes. Si nous trouvons des organismes de type terrien sur Mars, mais que nous ne pouvons pas savoir s'ils s'y trouvent depuis des milliards d'années ou depuis peu, cette question restera à jamais sans réponse.

La survie de notre espèce

Les partisans de l'exploitation spatiale évoquent souvent un futur glorieux sur Mars, une fois que des ingénieurs l'auront « terraformée », c'est-à-dire rendue plus habitable. La libération de grandes quantités de dioxyde de carbone, actuellement stocké dans ses roches et gelé dans ses petites calottes polaires, ainsi que d'autres gaz piégeant encore

mieux la chaleur, pourrait produire un effet de serre qui augmenterait sa température de surface et sa pression atmosphérique jusqu'à ce que l'eau puisse à nouveau couler sur sa surface. Au vu de la façon dont les humains ont « terraformé » la Terre, on peut raisonnablement trouver ces projets inquiétants...

Des colonies humaines dans l'espace permettraient-elles la survie de notre espèce, une fois la Terre rendue inhabitable? Mettons de côté l'immense difficulté de créer des colonies viables de millions de personnes (nécessaires pour une variation génétique suffisante à long terme). L'idée que nous apprendrons, de nos erreurs sur Terre, comment survivre dans l'espace ne relève-t-elle pas d'un optimisme béat? Si nous sommes incapables de résoudre nos problèmes sur notre propre planète, il semble hautement improbable que nous sachions le faire ailleurs. Il se pourrait aussi que le plan d'abandonner 8 milliards de nos congénères sur la Terre en perte engendre des troubles susceptibles de faire dérailler le projet.

Sur la fierté nationale, il n'est pas nécessaire d'être partisan d'un monde unique pour reconnaître que la conquête nationaliste des astres voisins et l'exploitation de

1%

**DES ASTRONAUTES
partis dans l'espace
n'en sont pas revenus.**

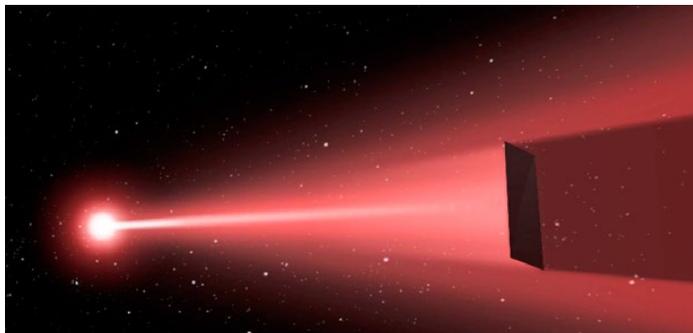
▼ *Certains astéroïdes, par leur composition en métaux rares sur Terre, sont des sources de richesse. Des missions spatiales d'exploitation minière de l'espace sont donc envisagées (ici, vue d'artiste du Harvestor de l'entreprise DSI).*

leurs ressources n'offrent pas les conditions idéales à une exploration rationnelle et durable. Exporter notre compétitivité terrienne dans l'espace risque fortement d'augmenter les conflits ici et là-bas.

L'immense émotion suscitée par les voyages spatiaux humains est indéniable, mais cette flamme spirituelle vaut-elle tellement plus que tout ce que nous pourrions apprendre de robots spatiaux? Justifie-t-elle le coût et le danger des expéditions humaines, la contamination d'autres planètes et les effets nuisibles de leur exploitation commerciale? N'oublions pas qu'à ce jour, environ 1 % des astronautes partis dans l'espace n'en sont pas revenus. Bien que notre expertise accrue puisse faire diminuer ce chiffre, il nous rappelle les risques que cache l'expression « tourisme de l'espace » et son évocation de gens ordinaires jouissant de l'exaltation d'un voyage hors de la Terre: se déplacer dans l'espace reste plus l'apanage d'un Thomas Pesquet que de monsieur et madame Tout-le-Monde.

Quant à enflammer les esprits, nos robots sur Mars ont su susciter l'attention générale et même une certaine identification humaine pendant leurs années passées sur la planète. La culture populaire ne cesse d'ailleurs de nourrir notre identification aux robots, comme en témoigne la pléthore de créatures fascinantes qui peuplent nos écrans. Enfin, les expéditions privées sont-elles souhaitables? Même si les gouvernements qui planifient les missions spatiales futures étaient sensibles à nos arguments, qui arrêtera les richissimes qui n'ont de comptes à rendre à personne? Nous avons tendance à supposer l'existence d'un forum dans lequel le pour et le contre des humains dans l'espace sont débattus afin d'atteindre une conclusion (plus ou moins) rationnelle.





▲ Avec un mode de propulsion inédit beaucoup plus rapide (ici, la propulsion photonique), le voyage interstellaire devient envisageable.

Qu'en est-il des entrepreneurs qui naviguent libres de telles contraintes? Elon Musk et Jeff Bezos n'abandonneront pas leurs projets, et l'histoire montre qu'il n'y aura pas pénurie de volontaires pour partir les premiers sur Mars ou ailleurs, même sans perspective de retour. Elon Musk a à ce point embrassé la croyance que les humains ne peuvent satisfaire leur désir d'exploration qu'en allant eux-mêmes dans l'espace qu'il a suggéré de « nucléariser » Mars – d'utiliser la force nucléaire pour libérer le dioxyde de carbone de son sol et de ses calottes polaires. Un tel programme va-t-il nous convaincre que nous pouvons nous permettre d'oublier la Terre et ses problèmes ou, au contraire, nous inciter à faire plus d'efforts pour elle et pour nous? Puisqu'il y a peu d'espoir d'entraver ces entreprises, autant laisser les maîtres de l'espace poursuivre leur désir, en gardant la conviction – nous le devons,

toujours – que les humains trouveront bientôt la voie de la sagesse. Notre discussion ne s'est pas aventurée au-delà des prochaines décennies, un temps déjà suffisant long pour douter de nos prédictions. Si la civilisation humaine parvient à surmonter ses problèmes actuels, elle enverra certainement des gens vers d'autres planètes du Système solaire. Si l'on découvrait un mode de propulsion beaucoup plus rapide qu'aujourd'hui, ou un moyen de prolonger la vie, ou de la suspendre à volonté pour un voyage de plusieurs siècles, nous pourrions envoyer des humains jusqu'aux systèmes planétaires des étoiles voisines. Une évolution darwinienne permettrait peut-être à des colonies humaines de s'adapter à la vie dans l'espace. Si nous pouvions manipuler le génome humain à notre gré (comme cela arrivera probablement bientôt), nous pourrions

peut-être fabriquer une population conçue pour l'espace. À ces « peut-être » s'ajoute l'invention de machines bien supérieures à ces surhumains. Il existe déjà des engins spatiaux de quelques grammes, capables de photographier et de communiquer par radio, qui pourraient être accélérés par laser jusqu'à 20 % de la vitesse de la lumière et atteindre les étoiles les plus proches en quelques décennies. En poussant l'imagination, nous pourrions peut-être faire voyager la conscience téléchargée d'individus ou créée par intelligence artificielle, à bord de ces nano-explorateurs qui arpenteront l'immensité de l'espace au nom de l'humanité, et qui rencontreront peut-être des sondes semblables émanant d'autres civilisations avec lesquelles ils interagiraient. En attendant, méditons les mérites de nos robots spatiaux actuels comparés à leurs homologues humains. ■

Traduit de l'anglais par Marie Treyer

- (1) V. Ter Minassian, « L'origine d'Arrokoth expliquée par sa forme bilobée », *La Recherche* n° 559, mai 2020, p. 30.
- (2) S. Guilbaud, entretien avec Joseph Silk : « Un télescope sur la face cachée de la Lune pour étudier le début de l'Univers », *La Recherche* n° 542, décembre 2018, p. 72.
- (3) W. Fa et Y.-Q. Jin, *Icarus*, doi.org/10.1016/j.icarus.2007.03.014, 2007.
- (4) tinyurl.com/Space-Act-2015



C'EST L'ANNÉE OÙ LE CONGRÈS des États-Unis vota le Space Act: Il interdit toute prétention d'autorité sur les corps cosmiques, mais promeut le droit des citoyens américains (et de leurs sociétés) à entreprendre « la récupération commerciale de ressources spatiales dénuées d'interférences nuisibles, moyennant l'autorisation et la supervision continue du gouvernement fédéral ».

Pour en savoir plus

La Recherche a publié

- S. Guilbaud, « Grâce aux collaborations, le spatial décolle », *La Recherche* n° 557, mars 2020, p. 54.
- V. Glavieux, entretien avec Marcello Coradini : « Il faut innover et ouvrir de nouveaux marchés », *La Recherche* n° 536, juin 2018, p. 80.
- J.-F. Hait, portrait d'Éric Lorigny : « La dimension humaine est primordiale sur

Mars », *La Recherche* n° 485, mars 2014, p. 56.

À lire

- Jean-François Clervoy et Franck Lehot, *Histoire de la conquête spatiale*, De Boeck, 2019.
- Marcello Coradini, *Conquête spatiale*, FYP Éditions, 2018.
- Philippe Henarejos, *Ils ont marché sur la Lune*, Belin, 2018.
- Xavier Pasco, *Le Nouvel Âge spatial*, CNRS Éditions, 2017.
- Isabelle Sourbès-Verger et

Denis Borel, *Un empire très céleste. La Chine à la conquête de l'espace*, Dunod, 2008.

■ André Lebeau, *L'Espace, les enjeux et les mythes*, Hachette, 1998.

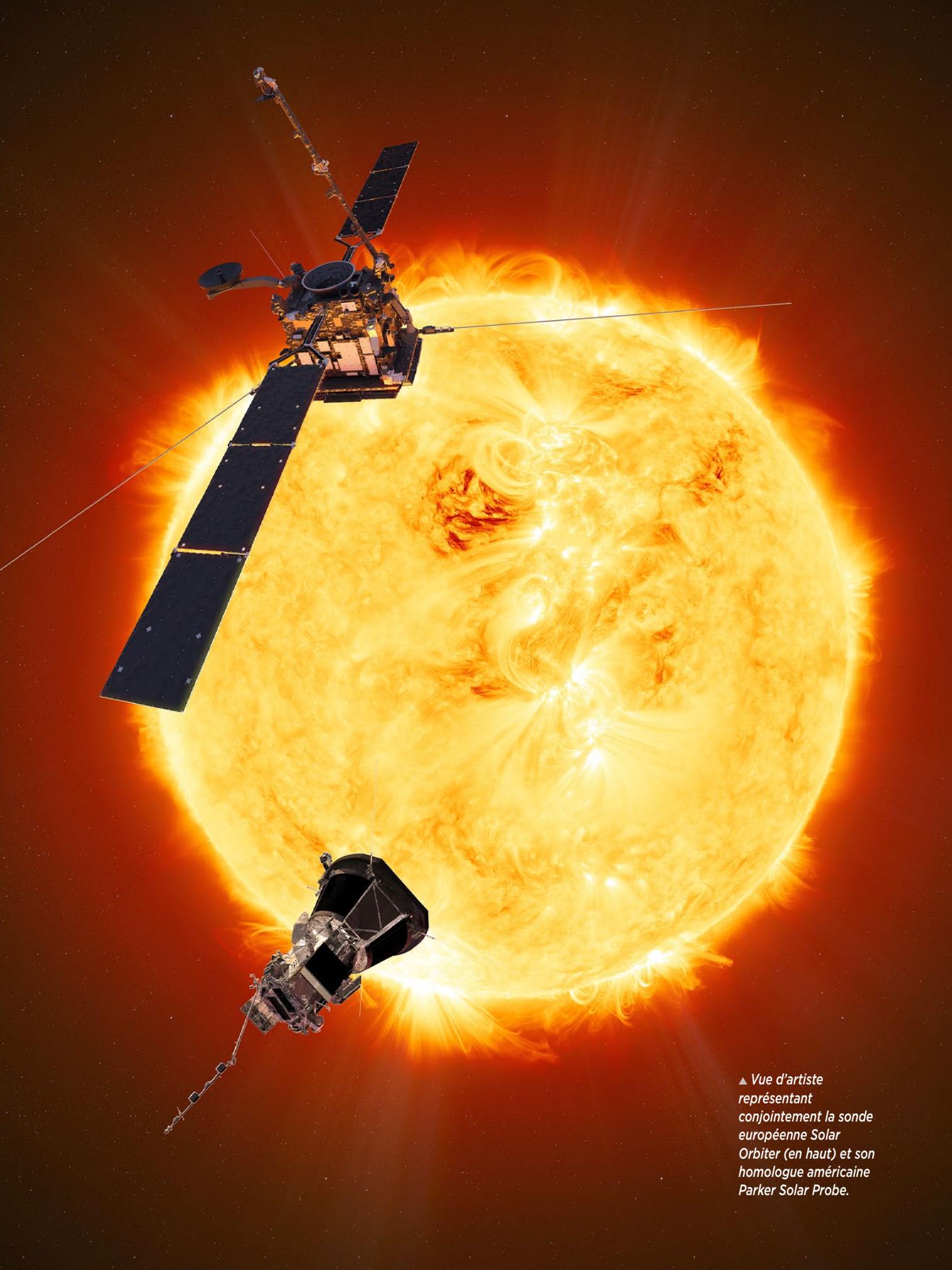
Sur le Web

- tinyurl.com/ESA-Space-Resources-Strategy
Le rapport de l'ESA sur la stratégie d'exploitation durable de la Lune et du Système solaire (2019, en anglais).

- tinyurl.com/ESA-Science-Moon
Le rapport de l'ESA sur la stratégie scientifique pour la Lune (2019, en anglais).
- <https://mars.nasa.gov>
Le programme d'exploration de la Nasa pour Mars (en anglais).
- tinyurl.com/Lunar-Gateway
Présentation du Lunar Gateway, le concept de base en orbite autour de la Lune (en anglais).
- tinyurl.com/YouTube-Xavier-Pasco

Une conférence de Xavier Pasco lors des Rencontres du ciel et de l'espace, en 2018.

- tinyurl.com/conquete-espace
La table ronde du Forum du CNRS, en 2017 : « La conquête de l'espace : des robots ou des hommes ».
- tinyurl.com/Inter-debat-midi
Émission « Le Débat de midi » sur France Inter : « Exploration spatiale : des robots ou des hommes ? », en 2018.



▲ *Vue d'artiste
représentant
conjointement la sonde
européenne Solar
Orbiter (en haut) et son
homologue américaine
Parker Solar Probe.*

Astrophysique

Plongée dans la fournaise du Soleil

Milan Maksimovic et **Étienne Pariat**, Observatoire de Paris, **Philippe Louarn**, Institut de recherche en astrophysique et planétologie de Toulouse, **Frédéric Auchère**, Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay

L'européenne Solar Orbiter et l'américaine Parker, les sondes parties à l'assaut de la frontière interne de l'héliosphère, vont passer plusieurs années dans l'environnement proche du Soleil. Une aubaine pour les astrophysiciens qui étudient le vent solaire, le champ magnétique, l'environnement solaire et l'influence du Soleil sur notre planète.

Une distance minimale d'approche d'environ 7 millions de kilomètres pour Parker Solar Probe, de la Nasa, et d'environ 42 millions de kilomètres pour la mission Solar Orbiter, de l'Agence spatiale européenne (ESA). Des températures pour les boucliers de protection de 1370 °C et de plus de 550 °C respectivement. Des vitesses maximales atteintes de 74000 km/h pour l'européenne et de 690000 km/h pour l'américaine. L'objectif n'est bien sûr pas de mettre en concurrence les deux agences spatiales, mais de comprendre la physique du cœur de notre Système solaire, là où se crée le vent solaire (le flot de particules issu de l'atmosphère solaire) et où se constitue l'héliosphère, la zone d'influence exclusive du Soleil.

Lancée le 12 août 2018, la sonde Parker est destinée à s'approcher au plus près du Soleil afin de caractériser son atmosphère (ou couronne), visible lors des éclipses solaires. Telle une comète, elle devrait, d'ici 2025, passer à huit reprises plus près de notre étoile que la planète la moins éloignée, Mercure. Solar Orbiter, elle, a été lancée le 10 février 2020. Elle ne s'approchera pas autant de notre étoile que son homologue, mais on peut la voir comme une « sonde-orchestre » de l'exploration spatiale: elle emporte

à son bord pas moins de dix instruments scientifiques, contre quatre seulement pour Parker. Découvrir l'héliosphère interne jusqu'à la proche couronne solaire et explorer l'ultime frontière qu'elle constitue, y réaliser à la fois les observations à distance par imagerie et les mesures in situ du vent solaire afin de comprendre comment le Soleil crée et contrôle son héliosphère, tels sont les objectifs, exploratoires et scientifiques, de ces missions. Le vent solaire est un flux de particules qui résulte de ●●



ASTROPHYSICIENS
Milan Maksimovic (1) est directeur de recherche au CNRS. Philippe Louarn (2) est directeur de recherche au CNRS. Frédéric Auchère (3) est astronome. Étienne Pariat (4) est chercheur au CNRS.

Contexte

Les missions Solar Orbiter et Parker Solar Probe ont été lancées en 2018 et 2020, presque conjointement quand on compare cette durée aux onze ans du cycle solaire. Ainsi s'ouvre un âge d'or pour la physique du Soleil et de l'héliosphère: les données uniques récoltées seront exploitées durant plusieurs décennies.

●●● l'expansion thermique de la couronne solaire, la partie externe de l'atmosphère de notre étoile. Au-dessus de la photosphère (la « surface » du Soleil, d'où sont émis les photons visibles depuis la Terre) et de la chromosphère, la couronne s'étend jusqu'à des millions de kilomètres. La couronne ne peut en effet pas rester en équilibre autour du Soleil : la température à sa base n'est que de 5800 kelvins et monte brusquement à plusieurs millions à une altitude de l'ordre de 2000 km. À ces températures, l'hydrogène et l'hélium, principaux composants de la couronne, sont complètement ionisés et constituent un plasma d'électrons, de protons et d'ions hélium (He^{2+}). Ce plasma, qui présente la caractéristique d'être très dilué, est dit « non collisionnel » (lire l'encadré p. 57). À plus haute altitude encore, l'énergie thermique coronale est convertie en énergie cinétique d'ensemble, pour donner naissance à un vent de plasma dont la vitesse d'expansion est comprise entre 200 et 800 km/s.

Champ magnétique

Par quel(s) mécanisme(s) et par le biais de quelle(s) source(s) d'énergie maintient-on la température coronale aussi élevée? Quelle est la physique permettant la conversion de l'énergie thermique coronale en énergie cinétique dirigée, donnant naissance au vent solaire? Pourquoi le vent rapide provient-il des trous coronaux (*), où la température du plasma est plus faible que dans le reste de la couronne? Après un peu plus de cinquante ans d'exploration spatiale et malgré de nombreux progrès, à la fois sur le plan de l'observation et de la théorie, ces questions (qui sont vraisemblablement liées) constituent une des dernières grandes énigmes de la physique solaire. Elles ont aussi des implications probables pour la physique stellaire en général. Au-delà des



▲ *Les propriétés magnétiques de Solar Orbiter en phase de test en 2019, en Allemagne.*

► *Embarqué à bord de Solar Orbiter, le capteur PAS doit analyser le vent solaire.*

impacts réels sur notre environnement technologique, Solar Orbiter et la sonde Parker ont été conçues pour apporter des réponses à ces questions fondamentales dans les années qui viennent.

Au centre de ces questions figure un champ fondamental : le champ magnétique. Il joue un rôle dans la quasi-totalité des problématiques actuelles en physique du Soleil et de l'héliosphère, qu'il s'agisse du chauffage de la couronne et de l'accélération du vent solaire, ou du déclenchement des éruptions solaires et des éjections coronales de masse (lire *La Recherche* n° 548, juin 2019, p. 48).

D'où vient ce champ magnétique solaire? Il est produit et entretenu grâce à ce qu'on appelle l'effet dynamo, à l'intérieur du Soleil. Là, d'immenses structures magnétiques sont créées et s'élèvent vers la surface par poussée d'Archimède magnétique, en formant de larges arches. Une fois émergées, ces



(*) **Les trous coronaux** sont des zones peu denses de la couronne solaire, dont le champ magnétique est connecté au champ interplanétaire, et qui apparaissent sombres lorsque cette dernière est observée en rayonnement UV ou X.

(*) **L'héliosismologie** est l'étude de l'intérieur du Soleil par l'analyse des ondes acoustiques qui s'y propagent (ses pulsations propres).

structures créent les taches visibles sur la surface solaire – zones de champ magnétique intense et de température inférieure à celle de la surface alentour – ainsi que les boucles observables dans l'atmosphère du Soleil.

Ces structures emmagasinent de grandes quantités d'énergie magnétique. Quand elles deviennent instables, de gigantesques éruptions se produisent et éjectent dans le Système solaire des quantités phénoménales de plasma (typiquement 10^{12} kg), à plusieurs centaines de kilomètres par seconde. Les conséquences de l'impact de ces éjections coronales de masse avec les magnétosphères et les atmosphères

planétaires constituent le sujet d'étude de la météorologie de l'espace. En effet, notre société technologique devient de plus en plus sensible à l'action de notre étoile sur ses activités – cela est particulièrement vrai pour les routes aériennes polaires, les voyages interplanétaires, les télécommunications, ou encore la qualité du signal GPS – et il devient fondamental de mieux comprendre les mécanismes physiques des relations Soleil-Terre (lire p. 60).

Dissipation de l'énergie

L'énergie responsable du chauffage de la couronne et de l'expansion du vent solaire provient sans doute de la conversion de l'énergie mécanique des mouvements convectifs de la photosphère. Ces derniers sont similaires aux mouvements de bouillonnement de l'eau dans une casserole, l'énergie magnétique pouvant être transportée dans la couronne par divers processus (conduction, processus magnétohydrodynamiques, mécanismes hybrides, etc.). Comment cette énergie est-elle dissipée et chauffe-t-elle le plasma coronal? Cela reste une énigme. La dissipation de cette énergie pourrait se produire de

UN UNIVERS NON COLLISIONNEL

Contrairement à l'atmosphère terrestre, où atomes et molécules rencontrent des voisins plus de 100 millions de fois par seconde, dans le vent solaire, le temps moyen entre deux collisions se mesure... en heures. Dans ces milieux hyper-raréfiés et hors équilibre, le retour à l'équilibre thermodynamique s'accompagne souvent d'émission d'énergie sous forme de rayonnements électromagnétiques non conventionnels, parfois de grande intensité. La majeure partie des environnements astrophysiques se présente d'ailleurs sous la forme de plasmas non collisionnels. De fait, un univers exclusivement « collisionnel » n'aurait

rien à voir avec celui que nous étudions. Nous n'aurions pas découvert les objets lointains et exotiques, détectables justement par leurs rayonnements non conventionnels: pulsars, quasars, etc. Pas de rayons cosmiques non plus, ni d'aurores polaires... Le vent solaire constitue donc un formidable laboratoire d'étude des plasmas astrophysiques sans collisions. Il permet d'aborder bien des aspects de la physique de ces milieux, en particulier ceux relatifs aux processus turbulents, qui restent mal compris. Les instruments in situ de Solar Orbiter et de la sonde Parker sont spécifiquement conçus pour analyser ces phénomènes.

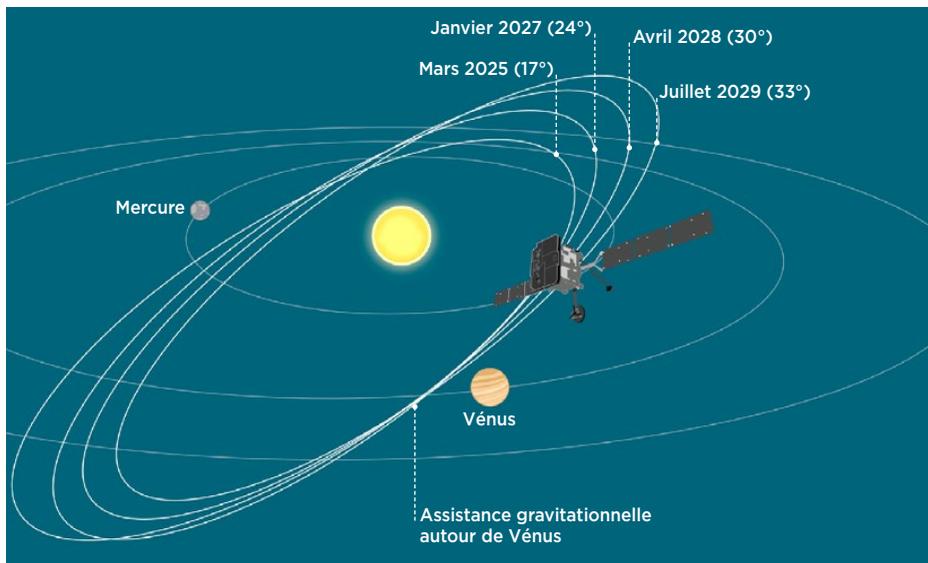
▼ **Partie de la Terre le 10 février 2020, la sonde européenne Solar Orbiter est en route vers le Soleil. Elle profitera de l'assistance gravitationnelle de Vénus à huit reprises entre 2020 et 2030. Son plan orbital va progressivement s'incliner par rapport au plan des planètes.**

façon quasi permanente, par une myriade de petits événements de nature impulsive, similaires aux éruptions, peu énergétiques individuellement et trop localisés pour être visibles de loin. C'est pourquoi l'observation rapprochée par les deux sondes en route vers le Soleil sera précieuse.

Les deux missions Solar Orbiter et Parker rassemblent deux communautés scientifiques qui, bien qu'étudiant le même objet – le Soleil et son héliosphère –, ont développé par le passé deux approches

d'observation distinctes. L'imagerie à distance de notre étoile, à partir du sol et dans le domaine visible, ou bien de l'espace et dans l'ultraviolet, a permis d'appréhender le Soleil aux grandes échelles. Toutes les informations que nous avons obtenues jusqu'ici sur le Soleil ont été recueillies grâce à l'imagerie ou bien par spectroscopie. Autrement dit, elles résultent de l'analyse des photons en provenance de notre étoile, et ce, qu'il s'agisse de notre connaissance de la structure interne du Soleil obtenue par héliosismologie (*), de l'émergence du champ magnétique, de l'inversion des pôles magnétiques solaires tous les onze ans environ par observation des taches solaires (ce qu'on appelle le cycle solaire), ou bien de la structuration de la couronne et son chauffage.

En parallèle, avec l'avènement des premières sondes interplanétaires, la physique des plasmas spatiaux a vu le jour au début des années 1960. De cette époque datent les premières mesures directes du vent solaire, à l'aide de compteurs de particules observant directement le plasma coronal en expansion. Ces mesures in situ ont permis d'accéder directement aux ●●●



... échelles physiques auxquelles le champ magnétique, transporté par le vent solaire, interagit avec les constituants de ce dernier, à savoir les électrons, les protons et les ions d'hélium.

Les deux missions spatiales combinent ces deux approches. L'orbite de Solar Orbiter a été spécialement calculée afin qu'une batterie complète d'instruments in situ et de télédétection puisse, d'une part, s'approcher au plus près du Soleil, et, d'autre part, permette des mesures hors du plan de l'écliptique (le plan de l'orbite de la Terre – et de la plupart des planètes – autour du Soleil). Cette orbite originale devrait offrir deux avantages inédits : elle permettra d'observer pour la première fois par imagerie les pôles de notre étoile ; elle réduira également la distance de la sonde au périhélie (le point le plus proche de son orbite autour du Soleil), permettant ainsi des observations prolongées d'une région particulière de la photosphère ou de la couronne. La sonde européenne a été lancée

Il y aura en tout une dizaine de conjonctions radiales entre le Soleil, la sonde Parker et Solar Orbiter

le 10 février 2020 de la base Cap Canaveral, en Floride. Plusieurs manœuvres d'assistance gravitationnelle sont en cours afin de placer la sonde sur une orbite elliptique autour du Soleil de 168 jours de période avec un périhélie à 0,28 unité astronomique (UA ; 1 UA représente la distance entre la Terre et le Soleil, environ 150 millions de kilomètres). Elle sera donc légèrement plus proche du Soleil que ne l'est Mercure, en orbite à 0,3 UA lors de son périhélie. La sonde approchera le Soleil au plus près environ trois ans et demi après le lancement, soit vers la fin de l'année 2023. Ensuite, toutes les trois ou quatre orbites, la gravité de Vénus sera utilisée pour augmenter progressivement l'inclinaison. La mission nominale s'achèvera sept ans après le lancement (vers 2027-2028, donc), alors que la sonde aura atteint 25° d'inclinaison par



C'EST L'INCLINAISON MAXIMALE qu'atteindra Solar Orbiter par rapport au plan de l'écliptique. Cela lui permettra notamment de réaliser des mesures inédites des pôles du Soleil.

rapport à l'écliptique. Une extension de la mission de trois ans après 2027 permettrait d'atteindre plus de 35° d'inclinaison. Du fait de cette orbite très particulière, Solar Orbiter est une mission très ambitieuse, à la fois scientifiquement et techniquement.

La sonde et son instrumentation seront soumises à un environnement hostile nécessitant des solutions spécifiques. La densité de rayonnement solaire atteinte à 0,28 UA (environ 13 fois celle au niveau de la Terre) impose l'utilisation d'un bouclier thermique. Les panneaux solaires doivent être orientables pour pouvoir fonctionner dans des conditions de température et d'illumination très variables entre le périhélie et l'aphélie (le point le plus éloigné de l'orbite autour du Soleil). Le flux de particules est aussi très intense, ce qui impose de fortes contraintes à certains composants optiques ou électroniques, qui ont été spécialement conçus pour y résister. La sonde Solar Orbiter embarque un

LES PREMIÈRES DÉCOUVERTES DE LA SONDE PARKER

Étant partie un peu avant son alter ego européen, Parker Solar Probe a déjà plongé à quatre reprises dans la fournaise solaire. Les premières données révèlent un environnement solaire bien plus tourmenté que ce qu'on imaginait. « *Alors que l'on s'attendait à un milieu relativement régulier et laminaire, les lignes de champ magnétique se révèlent au contraire très torsadées, avec des inversions soudaines*, décrit Thierry Dudok de Wit, professeur à l'université d'Orléans. Cette forte structuration du vent solaire s'observe aussi dans la distribution des particules chargées, comme les électrons. Une série d'articles a récemment été publiée (1) pour tenter d'apporter une première interprétation, et il semblerait bien qu'il s'agisse des signes possibles des mécanismes de chauffage



▲ Un jet coronal vu par la sonde Parker.

qui se produisent plus près du Soleil. » L'autre surprise dans les données recueillies concerne la rotation du vent solaire. Ce vent a une composante radiale – qui s'éloigne du Soleil – et une composante transverse – qui correspond à la rotation du vent. Or les mesures ont fait apparaître une composante de rotation du vent plus forte que ce qui était prévu par la plupart

des modèles. Enfin, les instruments permettent aussi de détecter des poussières qui impactent le satellite. À proximité immédiate du Soleil, on ne devrait plus en observer ; en effet, en s'approchant d'un astre chaud, les poussières vont se vaporiser et il ne restera plus que du gaz. Or cette disparition des poussières se produit plus loin que prévu par les modèles. Ce ne sont là que quelques exemples du fait que l'atmosphère solaire, que Parker Solar Probe va sonder de plus en plus profondément jusqu'en 2025, réserve encore de nombreuses surprises.

Philippe Pajot

(1) D. J. McComas *et al.*, *Nature*, 576, 223, 2019 ; J. C. Kasper *et al.*, *Nature*, 576, 228, 2019 ; R. A. Howard *et al.*, *Nature*, 576, 232, 2019 ; S. D. Bale *et al.*, *Nature*, 576, 237, 2019.

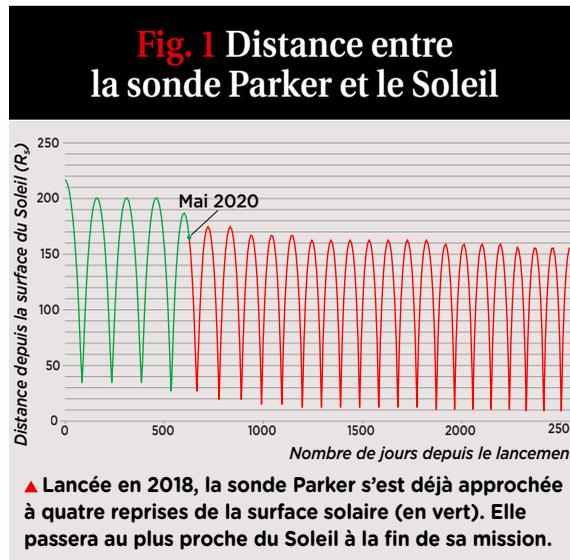
ensemble de six télescopes. Baptisés EUI, Metis, PHI, SoloHI, Spice et Stix, ils fourniront, via imagerie et spectroscopie à haute résolution et grand champ, des diagnostics du plasma solaire de l'intérieur de l'étoile (par héliosismologie) jusqu'à la naissance du vent. La résolution spatiale maximale atteinte sera de l'ordre de 100 km, ce qui est quatre fois mieux que ce qui est actuellement obtenu depuis l'orbite terrestre.

Observations conjointes

La sonde embarque également quatre instruments de mesure in situ (SWA, EPD, MAG et RPW). Leur rôle sera de caractériser en détail les particules et les champs électriques et magnétiques du vent solaire qui se trouvent près de la sonde. Ces instruments ont des capacités en termes de cadence temporelle de mesures, de quantité de données mesurées et de résolution en énergie et en fréquence qui sont supérieures d'un facteur 100 à 1 000 en comparaison avec les sondes qui ont déjà exploré l'héliosphère entre 0,3 UA et l'orbite terrestre.

Finalement, la charge utile globale de Solar Orbiter a été optimisée afin de permettre une compréhension globale du système Soleil-héliosphère. L'un des meilleurs exemples concerne le contenu en éléments lourds (oxygène, carbone, fer, etc.), bien moins abondants que l'hélium, de la couronne solaire. Les proportions relatives de ces éléments seront mesurées in situ, avec l'instrument SWA, dans le vent solaire, tandis que des mesures équivalentes seront effectuées, par télédétection spectroscopique, avec le télescope Spice, dans les régions dont le vent provient.

Par sa conception générale, la sonde Parker est très similaire. Comme son homologue, elle est protégée par un bouclier thermique, comprend des panneaux solaires rétractables, et son orbite



utilise des assistances gravitationnelles de Vénus pour s'approcher du Soleil. Toutefois, il existe aussi des différences notables, liées à son objectif principal d'exploration de la haute couronne solaire. Positionnée plus près de notre étoile qu'aucun autre engin envoyé par l'homme, la sonde subira un tel flux de photons qu'on n'a pu se permettre de faire des ouvertures dans son bouclier thermique à des fins d'imagerie directe du Soleil, comme c'est le cas pour Solar Orbiter. La seule caméra à bord permet d'imager la couronne locale quasi perpendiculairement à l'axe Soleil-sonde, en regardant vers les « côtés » du bouclier solaire, à la manière d'un rétroviseur. Les panneaux solaires sont également plus petits et sont refroidis activement par circulation d'eau vers les radiateurs de la sonde. La sonde fera 24 passages successifs au périhélie qui l'amèneront, le 22 mars 2025, à sa distance la plus proche et à sa vitesse la plus élevée (Fig. 1). Partie un peu avant Solar Orbiter, elle a déjà obtenu quelques premiers résultats très intéressants (lire l'encadré p. 58).

Solar Orbiter et Parker sont deux missions héritières d'une longue histoire au sein de leurs agences respectives. Tandis que la genèse de Solar Orbiter remonte à la fin des

années 1990, avec le programme Horizon 2000+, il faut faire un saut dans le passé bien plus important – jusqu'à 1958 et au comité Simpson, qui a jeté les bases du programme spatial scientifique de la Nasa – pour trouver les premières idées d'une sonde solaire américaine. Les aléas ont été nombreux, mais la quasi-simultanéité des deux lancements est heureuse. Les sondes vont ainsi faire des mesures tout à fait complémentaires.

Ainsi, au cours des cinq années de mission commune, il y aura une dizaine de conjonctions radiales entre le Soleil, la sonde Parker et Solar Orbiter. Imaginons, par exemple, qu'une éruption solaire se produise au cours de cette période, et que celle-ci donne lieu à une éjection coronale de masse, éventuellement accompagnée de la production de particules énergétiques. L'éruption sera tout d'abord observée et caractérisée par les imageurs de Solar Orbiter, ce qui permettra de comprendre les mécanismes de génération de cette perturbation du vent solaire ambiant. Quelque temps plus tard, la sonde Parker observera in situ l'éjection coronale de masse. Finalement, ce sera à nouveau le tour de Solar Orbiter (quelques dizaines d'heures après) de prendre le relais, et d'observer cette perturbation avec ses analyseurs de particules et de champs électromagnétiques.

Ce type d'observations conjointes, ainsi que toutes les nouveautés de ces missions, ouvrent un âge d'or pour la physique du Soleil et de l'héliosphère. Les données finales de ces deux sondes seront librement accessibles, quelques mois après leur réception au sol, à l'ensemble des astrophysiciens, mais également à tous les curieux et passionnés du Soleil. Nul doute que la complémentarité entre ces deux missions apportera une moisson de résultats décapante. ■

POUR EN SAVOIR PLUS

■ sci.esa.int/web/solar-orbiter

Le site de l'ESA dédié à Solar Orbiter.

■ nasa.gov/content/goddard/parker-solar-probe

Le site de la Nasa consacré à la sonde Parker.

Lire aussi
notre article p. 60
sur la météo solaire.

Une alerte météo contre les tempêtes solaires

La magnétosphère protège notre planète des particules solaires – le plasma – qui peuvent perturber les GPS et les télécommunications. Si ce dernier est très énergétique, le bouclier ne suffit plus et les conséquences peuvent être dramatiques pour nos sociétés modernes. La météorologie solaire cherche à prévoir ces phénomènes.

« Une éruption de classe X9.3 a atteint un pic à 12 h 02 temps universel. » La dépêche, tombée dans les boîtes mail des services astronomiques spécialisés, a fait l'effet d'une bombe. Traduite en termes profanes, elle indique qu'en ce mercredi 6 septembre 2017, un phénomène d'une ampleur exceptionnelle a été observé dans une région active de la surface du Soleil : un flash lumineux de couleur blanche d'une intensité inégalée depuis douze ans, qui a affolé les détecteurs à rayons X des satellites géostationnaires GOES 13 et GOES 15 de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). L'événement est d'autant plus excitant que, selon toute vraisemblance, il en annonce d'autres pour les heures et les jours à venir. Et de fait, un second « message d'alerte rapide », diffusé par le Solar Influences Data Analysis Center (SIDC) de l'observatoire royal de Belgique, fait état de l'expulsion hors de l'atmosphère de notre étoile d'une titanesque bulle de gaz chaud électrifé. Formant un halo brillant

sur les images des coronographes du télescope spatial Soho, la perturbation associée à cette éjection de masse coronale (CME) file à travers l'espace à 1 200 km/s. Les premières estimations prévoient qu'elle frappera la Terre dans l'après-midi du surlendemain...

L'éruption du 6 septembre 2017, et celle qui l'a suivie quatre jours plus tard au sein du même « complexe de taches solaires n° 2673 », comptent parmi les plus gros cataclysmes de la décennie. Et pourtant, sur Terre, les nuisances que leurs « sursauts radio électriques », « orages géomagnétiques » et « émissions de particules de hautes énergies » ont occasionnées ont été limitées. Le signal GPS fut temporairement dégradé. Les communications radio hautes

fréquences (HF) utilisées pour les opérations de secours qui se déroulaient au même moment dans les Caraïbes, après le passage de l'ouragan Irma, ont été perturbées. Et dans la journée du 10, les moniteurs à neutrons installés au sol près des pôles ont enregistré, pour la première fois depuis 2006, des gerbes de particules dues à l'entrée de rayonnements cosmiques solaires dans la haute atmosphère. Mais pour le reste, ces tempêtes sont passées quasiment inaperçues.

Une réelle menace

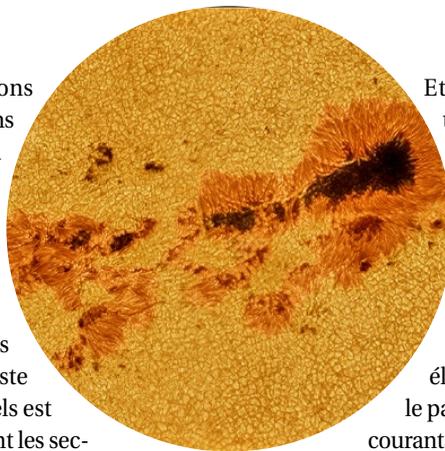
Que se serait-il passé si elles avaient été plus fortes ? Répondre à cette question est la mission de la météorologie de l'espace dite « opérationnelle ». Cette jeune discipline a pour objet la détection et la prédiction des aléas causés par le Soleil et l'élaboration de services à même d'en évaluer les effets. Elle était déjà pratiquée dans les années 1960, au moment du lancement du programme Apollo, mais elle a réellement pris son essor une trentaine d'années plus tard, aux États-Unis d'abord, en Europe ensuite. Elle trouve sa raison d'être dans les humeurs colériques de notre étoile.

Contexte

Satellites d'observation et modélisation permettent d'envisager une météo spatiale dont les centres de météorologie solaire opérationnelle sont les premiers acteurs. Ils produisent chaque jour des bulletins d'alerte de l'activité solaire, en prenant en compte les caractéristiques du milieu interplanétaire et du champ magnétique de la Terre. Vigies de notre étoile, les sondes Parker et Solar Orbiter permettront de mieux prévoir ses pics d'activité.

Le Soleil n'a en effet rien d'un astre tranquille. À certaines périodes de forte activité, des éruptions se déclenchent à sa surface, dans les régions occupées par les taches solaires, engendrant un supplément de rayonnement dans les domaines visible, UV, X et radio, voire l'émission de particules de hautes énergies. Des événements d'éjections de masse coronale surviennent aussi, aboutissant parfois à la formation, plus haut, dans l'atmosphère du Soleil, de bulles de plasma. Ces gigantesques nuages, composés de centaines de millions de tonnes d'électrons et de protons, se superposent au vent solaire, se propagent à travers l'espace et, s'ils croisent le chemin de la Terre, perturbent la magnétosphère, sa barrière de protection naturelle. Les effets d'un tel phénomène sont connus. Ils ne se limitent pas, loin de là, à l'apparition d'aurores dans les régions polaires. Dégradation ou interruption de la navigation

GPS, des communications radio et des transmissions de données. Gène de la détection radar. Détérioration ou destruction de satellites. Pannes du réseau électrique ou à bord des aéronefs. Surplus de radiations reçues par les équipages... La liste des dommages potentiels est longue. Et nombreux sont les secteurs qui ne peuvent se permettre d'ignorer ces bouffées de colères du Soleil. D'autant que le souvenir des plus violentes d'entre elles reste présent pour rappeler la réalité de la menace. Le 1^{er} septembre 1859, deux gigantesques éruptions, observées par l'astronome britannique Richard Carrington, ont engendré des aurores boréales jusqu'aux latitudes du Mexique et d'Hawaï et interrompu les communications télégraphiques en Amérique du Nord et en Europe.



▲ *Un groupe de taches solaires. Leur surveillance quotidienne permet d'évaluer le risque d'éruption.*

▼ *L'aurore polaire est la face spectaculaire - et inoffensive - de l'éruption solaire (ici au-dessus du site de radar de Saskatoon, au Canada).*

Et le 13 mars 1989, une tempête solaire a provoqué un black-out dans la province du Québec: six millions de personnes ont été plongées dans le noir suite à des surtensions survenues dans le réseau électrique provoquées par le passage dans le sol de forts courants induits, à plus de 100 km d'altitude, par les perturbations de l'ionosphère terrestre. Si des catastrophes de ce genre devaient se reproduire, nul doute qu'elles se solderaient, pour nos sociétés devenues hyperdépendantes de l'électricité et des télécommunications, par des pertes financières considérables. De l'ordre, selon certaines estimations, de milliers de milliards de dollars! D'où l'idée de créer un service chargé d'annoncer l'arrivée de ces perturbations et d'en anticiper, en temps réel, les conséquences. ●●●



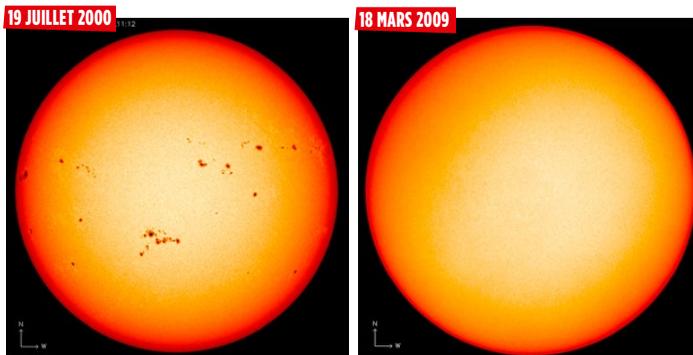
LES CYCLES DE NOTRE ÉTOILE

Énorme boule de plasma chaud de 700 000 km de rayon, le Soleil est un astre turbulent. Son enveloppe, qui tourne sur elle-même à des vitesses différentes selon les latitudes, est animée de mouvements de convection qui brassent en permanence son gaz chaud et électrifié. Le résultat est un spectaculaire « effet dynamo », qui se manifeste par la formation à sa surface de vastes zones plus froides et plus sombres – les taches solaires, dans lesquelles sont ancrées d'immenses boucles de champs magnétiques où surviennent les éruptions. Quatre siècles d'observation de ces taches grâce aux télescopes ont démontré que le nombre de ces régions actives connaît une modulation passant périodiquement par des maxima et des minima. C'est le fameux cycle du Soleil. Ce dernier dure en moyenne 11 ans, mais sa longueur peut aller de 9,5 à 14 années. L'amplitude des cycles varie également.

À certains moments, comme en 1957, la quantité de taches simultanément visibles sur le disque solaire atteint des sommets (cycle 19, jusqu'à 250 taches) et à d'autres, lors de grands minima séculaires, elle devient quasi nulle pendant 50 à 60 ans. Des analyses isotopiques réalisées sur des anneaux de croissance des arbres, ainsi que sur des sédiments, ont démontré que ce phénomène de « minimum de Maunder » est répétitif : il surviendrait tous les 100 à 500 ans et serait susceptible de se répéter prochainement, ce qui pourrait avoir une incidence sur le climat terrestre. On n'en est pas encore là, même si depuis quatre cycles, le Soleil présente une décroissance continue d'activité : l'intensité du cycle 24, qui s'achève actuellement, n'a pas dépassé les 100 taches solaires.

Qu'en sera-t-il du cycle 25 ? C'est ce qu'essaye de déterminer, depuis avril 2019, un panel de spécialistes réunis par la Nasa-NOAA en compilant jusqu'ici plus d'une soixantaine de prévisions ayant fait l'objet d'une publication. Verdict de ces experts : « *Le prochain cycle atteindra son pic entre 2023 et 2026 et aura une amplitude comparable au précédent, soit la moitié de celui de 1957-1958* », indique Frédéric Clette, astrophysicien à l'observatoire royal de Belgique et directeur du centre Sunspot Index and Long-term Solar Observations (Silso), officiellement chargé de la production, de la conservation et de la dissémination au niveau international des informations relatives au nombre de taches solaires.

V. T. M.



▲ Vues par le télescope Soho, les nombreuses taches solaires visibles au maximum du cycle (en 2000) ont presque disparu au minimum (en 2009).

ENTRE LE SOLEIL ET LA TERRE

8 minutes

20 minutes

1 à 4 jours

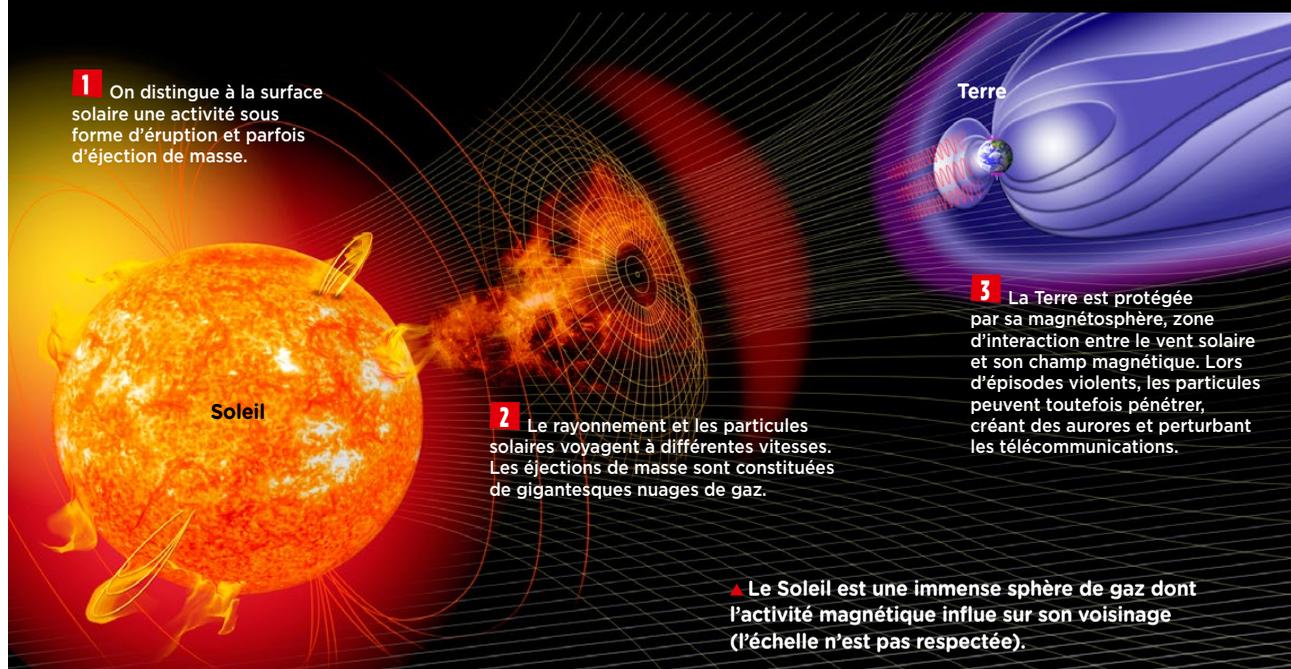
Ce sont les durées du voyage entre le Soleil et la Terre respectivement du rayonnement électromagnétique, des particules rapides et des bulles de plasma chaud qui émanent des éruptions solaires.

... Tel est le but de la météorologie de l'espace opérationnelle. Chapeauté par une organisation baptisée International Space Environment Service (Ises), cette spécialité unique en son genre – la seule à être entièrement consacrée à la surveillance d'un objet astronomique autre que la Terre – s'appuie sur un réseau mondial d'une vingtaine de centres d'alerte régionaux. Le Space Weather Prediction Center (SWPC) de la NOAA, installé à Boulder, dans le Colorado, est le plus connu d'entre eux. Mais il en existe d'autres, notamment en Europe, où deux structures fonctionnent 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7 : l'une à Exeter, au Royaume-Uni, dans les locaux du Met Office ; l'autre à Bruxelles, au sein du SIDC de l'observatoire royal de Belgique. À cela s'ajoutent diverses initiatives telles que le programme Surveillance de l'espace de l'ESA, dont l'un des objectifs est de soutenir le développement des applications destinées aux utilisateurs.

Réagir rapidement

Comme en météorologie terrestre, il s'agit d'assimiler en continu des observations et de faire tourner des modèles afin de réaliser des prévisions. « *À ceci près que la zone à couvrir comprend le Soleil, la Terre et les 150 millions de kilomètres qui les séparent, et que les phénomènes à prendre en compte ont une grande diversité de taille, de vitesse et d'énergie* », précise Judith de Patoul, astrophysicienne et prévisionniste au SIDC de l'observatoire royal de Belgique. Une éruption survient quand, à l'intérieur d'une tache solaire, des lignes de champs magnétiques adoptent des configurations particulières. Malgré les résultats encourageants obtenus, dans le cadre du projet européen Flarecast, par des équipes comme celles d'Étienne Pariat du laboratoire Lesia de l'observatoire de Paris

Que se passe-t-il sur Terre après une éruption solaire ?



1 On distingue à la surface solaire une activité sous forme d'éruption et parfois d'éjection de masse.

2 Le rayonnement et les particules solaires voyagent à différentes vitesses. Les éjections de masse sont constituées de gigantesques nuages de gaz.

3 La Terre est protégée par sa magnétosphère, zone d'interaction entre le vent solaire et son champ magnétique. Lors d'épisodes violents, les particules peuvent toutefois pénétrer, créant des aurores et perturbant les télécommunications.

▲ Le Soleil est une immense sphère de gaz dont l'activité magnétique influence son voisinage (l'échelle n'est pas respectée).

ou de Tahar Amari du centre de physique théorique de l'École polytechnique à Palaiseau, ce phénomène n'est pas prédictible, même si certaines situations sont plus favorables que d'autres. En revanche, une tempête solaire se décompose en plusieurs éléments qui, voyageant à des vitesses différentes, parviennent successivement sur Terre. Le rayonnement électromagnétique associé au flash initial arrive en huit minutes. Les particules énergétiques, en vingt à soixante minutes. Et les nuages de plasma chaud à l'origine des orages géomagnétiques, en un à quatre jours. Tout l'enjeu du travail des prévisionnistes est de parvenir à déterminer, dans ces courts laps de temps, quand et avec quelles intensités ces multiples formes de perturbations atteindront notre planète...

En pratique, les équipes d'un centre comme le SIDC analysent en temps réel les données envoyées par un peu moins d'une dizaine de satellites. Certains,

comme les télescopes spatiaux Soho ou SDO, produisent des images du Soleil ou livrent des données. D'autres, tels DSCOVR ou Stereo, mesurent les propriétés du vent solaire. Enfin, GOES ou ACE détectent les particules de hautes énergies et le rayonnement X ou, lorsqu'ils sont placés en amont de la Terre, jouent le rôle de vigie en fournissant préalablement à leur arrivée des informations sur les nuages de plasma. « Il est évident que le maillage de l'espace réalisé à l'aide de cette poignée d'instruments parfois vieillissants et dont presque aucun n'a été conçu pour la météorologie de l'espace est



“ L'objectif est d'envoyer des messages d'information aux centres de contrôle du trafic aérien, aux centres des compagnies et aux équipages ”

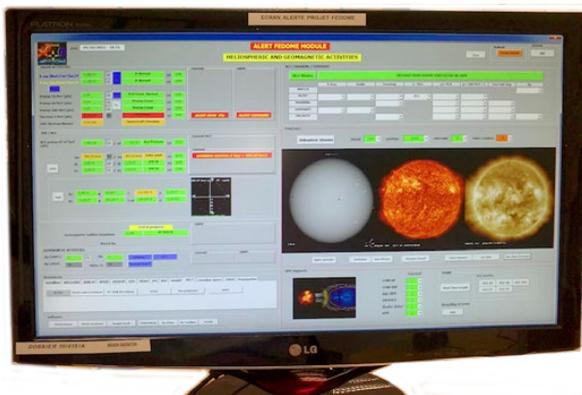
Stéphanie Wigniolle Desbios, département des services à l'aviation de Météo-France

insuffisant, estime Frédéric Clette, astrophysicien à l'observatoire royal de Belgique. *Pour suivre le déplacement des orages géomagnétiques, nous aurions au minimum besoin d'une sonde dont le champ de vue couvrirait à la fois le Soleil et la Terre. Notre étoile tournant sur elle-même, il faudrait aussi que cette sonde puisse observer les taches solaires avant que celles-ci soient orientées face à notre planète.* » Un projet de mission spécifique de l'ESA, baptisé Lagrange ou L5, existe bien, mais il n'a pour l'instant pas été approuvé. Malgré tout, le SIDC est aujourd'hui en mesure de lancer des messages d'alerte et de produire quotidiennement des bulletins de prévision rendant compte de l'activité de notre étoile, des caractéristiques du milieu interplanétaire en termes de vents solaires et des conditions géomagnétiques de l'environnement terrestre. Mais avec quelle fiabilité ? « *En vingt ans, beaucoup de progrès* ... »

... ont été accomplis dans la connaissance de tous les maillons de la chaîne des relations Soleil-Terre», constate Guillaume Aulanier, président du Programme national Soleil-Terre de l'Insu-CNRS. Certaines équipes, comme celle d'Alexis Rouillard, chargé de recherches CNRS à l'Irap, à Toulouse, sont passées maîtres dans l'art de modéliser la propagation des éjections de masse coronale. En se déplaçant, ces nuages de plasma chaud peuvent générer dans le vent solaire soufflé en permanence par notre étoile des ondes de choc qui le compriment. Les simulations réalisées par les chercheurs toulousains permettront à terme de prévoir en temps réel quand et avec quelles intensités ces dernières viendront heurter la magnétosphère terrestre. « L'erreur actuelle sur le temps d'arrivée est de dix heures environ », indique Alexis Rouillard, qui souhaiterait maintenant pouvoir rendre compte du champ magnétique associé à ces perturbations. De l'orientation de ce dernier dépend souvent la quantité de particules qui pénétreront dans l'ionosphère terrestre...

Des efforts ont également été faits en direction des utilisateurs. Ainsi, en France, pays géographiquement et géologiquement moins concerné par le problème, une entité baptisée Oframe a vu le jour avec le soutien du Cnes, du CNRS, du CEA et de l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (Onera). Elle vise, explique son co-responsable Thierry Dudok de Wit, enseignant-chercheur à l'université d'Orléans, « à créer un guichet unique où les industriels et les organismes publics pourront trouver des réponses à leurs demandes ».

Deux autres projets sont en cours. Lancé en 2011 avec un financement de la Direction générale de l'armement, le premier, conduit en partenariat avec les scientifiques, a



▲ Le serveur du projet Fedome, qui surveille les effets de l'activité solaire sur le matériel électronique et les transmissions militaires.

abouti à la création d'une structure spécialisée au sein du Centre opérationnel de surveillance militaire des objets spatiaux (Cosmos) de l'armée de l'air. Installé dans la base aérienne 942 de Lyon-Mont Verdun, Fedome a pour mission de fournir des informations sur les risques de dégradation des signaux GPS, radar et radio employés par les militaires. « Il peut même proposer des blocs de fréquences qui ne seront pas ou

La modélisation de la propagation des éjections de masse coronale est de mieux en mieux maîtrisée

peu affectés par les perturbations solaires », explique son responsable, le major Lionel Birée. Le système a été utilisé avec succès en 2016 au cours d'une opération conduite en Afrique par les troupes françaises. Initié par l'Organisation de l'aviation civile internationale, le second projet a associé quatorze pays, dont la France, représentée, sous l'égide de la Direction générale de l'aviation civile, par Météo-France et les sociétés toulousaines CLS et ESSP. Il s'est achevé le 7 novembre 2019, avec l'ouverture du premier service de météorologie de l'espace, opérationnel 24 heures sur 24, pour l'aviation civile. Son but : prévenir les acteurs de l'aéronautique d'une perturbation en cours ou à

venir des communications radio HF et des signaux de positionnement par satellite, ainsi que d'une forte augmentation des niveaux de rayonnement auxquels pourraient être exposés les navigants. « L'objectif est d'envoyer des messages d'information aux centres de contrôle du trafic aérien, aux centres des compagnies et aux équipages », explique Stéphanie Wigniolle Desbios, du département des services à l'aviation de Météo-France. Fortes de leur expertise dans ce domaine, les équipes françaises ont la responsabilité de produire, au sein d'un des consortiums fournisseurs du service, des données sur les radiations. « Les modèles élaborés avec l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire sont chargés d'évaluer les doses de rayonnement cosmique d'origines galactique et solaire reçues à bord des avions et de donner une alerte en cas de dépassement de seuils, explique l'astrophysicien Karl-Ludwig Klein, du laboratoire Lesia de l'observatoire de Paris, qui a livré à la société CLS les logiciels adéquats. Ces valeurs sont déterminées grâce à des moniteurs à neutrons fonctionnant au sol, dont deux sont installés dans les îles Kerguelen et en Terre Adélie. »

De quoi largement occuper les météorologues de l'espace, le temps que le Soleil rentre dans sa prochaine phase de forte activité. « Celle-ci atteindra son maximum vers 2025, pile au moment où les sondes Solar Orbiter, Parker Solar Probe et BepiColombo auront rejoint leurs postes d'observation au plus près de notre étoile et autour de Mercure », se félicite Kader Amsif, responsable du thème Soleil, héliosphère et magnétosphère au Cnes. Placés aux premières loges, les engins spatiaux auront alors toutes les chances de faire avouer à l'astre solaire les raisons de sa mauvaise humeur... ■

Vahé Ter Minassian

POUR EN SAVOIR PLUS

■ www.meteo-espace.fr/sw_france/fr

Les services météo de l'espace du Cnes-Insu.

■ Tahar Amari, « Les colères magnétiques du Soleil », *La Recherche* n° 548, juin 2019, p. 48.



Plaire et convaincre

Urist, un nain multidimensionnel, devrait se réjouir de sa promotion comme cartographe royal. Pourtant, il conserve une mine sombre et examine avec circonspection la tâche qui lui incombe désormais : dresser un plan précis du pays. Ce qui pourrait paraître une mission technique ordinaire dans toutes les contrées s'avère éminemment compliqué à Keshud Gab : lors d'une récente guerre, un nécromancien a perturbé toute la géométrie de l'espace et personne n'a pu jusqu'ici établir dans quelle mesure cette perturbation affectait la géographie du territoire. Sa mission va l'amener à vivre d'étonnantes et inattendues aventures. Ceci pourrait être la quatrième de couverture d'une nouvelle de fantaisie humoristique à la Terry Pratchett. Pourtant, il s'agit de l'introduction, résumée, d'un article de recherche paru en 2020 sur le site de prépublications ArXiv, signé par Rami Luisto, postdoctorant à l'université de Jyväskylä, en Finlande (1).

CE JEUNE CHERCHEUR explique qu'il a rédigé ce texte de la sorte en réaction aux critiques de son directeur de thèse qui le trouvait d'ordinaire un peu trop verbeux. Il ne faudrait pas croire pour autant que cette taquinerie enlève le sérieux de son travail : au détour des voyages et des interrogations de ces nains, Rami Luisto démontre un lemme qui établit, sous des hypothèses détaillées, la *L*-bilipschitzianité globale d'une certaine application. Je ne vais pas entrer dans les détails du contenu mathématique, mais je m'interroge sur le statut de ce texte. Est-ce réellement un article de mathématique ? D'un point de vue purement formel, c'est un

texte écrit par un mathématicien qui présente un résultat et donne suffisamment d'éléments de démonstration pour qu'un autre mathématicien du domaine puisse en comprendre les tenants et aboutissants. En revanche, son style est loin du format canonique auquel la communauté est habituée. Les publications de recherche et de nombreux manuels d'enseignement ont pris pour habitude de présenter les résultats de manière formelle, avec une démarche où se succèdent définitions, théorèmes et démonstrations, et où l'écriture ne doit jamais obérer la rigueur. Une sorte de cheminement universel qui laisse peu de place aux commentaires, aux digressions et encore moins à tout style d'ambition plus littéraire.



Le style universel des publications nous prive de la personnalité des auteurs

On a souvent attribué ce formalisme à Bourbaki ; le groupe de mathématiciens s'étant initialement formé (en 1930) en réaction contre l'ouvrage de l'analyste Édouard Goursat, jugé « filandreux », a choisi un mode de rédaction collectif plutôt épuré. Les adversaires de Bourbaki ont souvent caricaturé cette démarche (le mythe de l'objectivité d'une présentation, la volonté d'effacer les traces de la construction, la froideur ou la rigidité du projet...) et pointé quelques excès. Sans

rentrer dans ces discussions (où certains critiques gagneraient à lire davantage les textes dont ils parlent...), il faut reconnaître que l'écriture des articles s'est quelque peu standardisée et qu'un.e mathématicien.ne du XXI^e siècle a par défaut tendance à adopter un style sobre et une organisation du texte « classique », assez éloignée des rédactions des siècles précédents.

FAUT-IL S'ATTRISTER de cette uniformisation ou s'en réjouir ? D'un certain point de vue, ce style mathématique universel facilite l'accès aux articles en fournissant une trame que chacun peut aborder indépendamment de son bagage culturel personnel et donc s'approprier assez rapidement. D'un autre côté, cela nous prive de la chaleur, de la personnalité, voire de l'enthousiasme de l'auteur, qui forment pourtant une partie essentielle de la transmission d'un savoir. Ce n'est d'ailleurs pas tout à fait un hasard si les ouvrages de diffusion, que l'on aille du génialissime *Gödel, Escher, Bach* de Douglas Hofstadter aux romans de notre Mickaël Launay national en passant par la fan fiction *Harry Potter and the Methods of Rationality* de Eliezer Yudkowsky, adoptent souvent un style d'écriture très personnel, et sollicitent notre curiosité et notre goût de l'imaginaire... Dans le sempiternel débat entre plaire ou convaincre, ne peut-on pas simplement apprécier que certains choisissent une voie médiane en essayant de plaire et convaincre ? ■

(1) R. Luisto, arXiv:2003.13758, 2020.

Roger Mansuy est professeur au lycée Saint-Louis, à Paris, et membre de la Commission française pour l'enseignement des mathématiques (CFEM).

À l'ère numérique, redécouvrir notre lien à la nature

Mélusine Martin, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australie

À travers un travail d'enquête minutieux, Mélusine Martin s'est intéressée au rapport que l'être humain entretient avec la nature. Une relation ambivalente: il considère en faire partie, mais désigne comme « naturelles » les seules zones vierges de toute présence humaine. Aujourd'hui, la révolution numérique nous amène à repenser ce lien.

Qu'est-ce que la nature ? Les recherches que je mène en Australie m'ont conduite à poser cette question à un grand nombre de personnes. Les réponses varient : « *La nature, c'est toutes les choses qu'étudie la biologie* », « *c'est tout moins l'homme et ses créations* », ou alors « *ce sont les arbres mais pas ceux des villes!* » Tout est nature, rien n'est nature. Là où se termine la nature débute l'artificiel. Car ce sont là les deux notions principales sur lesquelles on trébuche. Ce qui est naturel n'est pas artificiel et inversement. Du moins jusqu'à ce que l'on aborde la place de l'être humain au sein de son environnement. Le domaine de la sociologie environnementale est régi par des concepts clés, l'un d'entre eux

étant le dualisme humain/nature. Ce dualisme est prédominant dans la société occidentale. Il définit l'être humain comme étant séparé et différent de la nature : c'est une manière séparatiste de voir le monde. On apprend à penser qu'en tant qu'être humain, on est supérieur aux plantes et aux animaux, que l'environnement est là pour nous servir, qu'il s'agit d'un élément sauvage qui doit être contenu, régulé, contrôlé, voire protégé. Ce dualisme n'est pas nouveau. Au XIX^e siècle, la révolution industrielle opère une transformation dans la relation de l'homme à la nature. L'interaction quotidienne que l'être humain avait avec son environnement s'urbanise, se mécanise, s'artificialise. Du fait des inventions technologiques, l'exploitation des ressources



SOCIOLOGUE

Mélusine Martin est assistante de recherche au Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (Csiro), organisme gouvernemental australien pour la recherche scientifique, et doctorante à l'université James-Cook, en Australie, et à Sorbonne Université.

naturelles passe à la vitesse supérieure. La nature, au lieu d'être partie intégrante du quotidien des hommes, devient un territoire relégué aux abords des villes, éloigné, étranger, parfois effrayant, souvent enchanteur, généralement idéalisé. C'est de la ville qu'est née une vision romantique du monde naturel. Idyllique, paisible et pure, conçue en antithèse de l'environnement urbain, bruyant et chaotique, la nature devient alors une échappatoire à la civilisation. Les essais et écrits environnementaux américains à partir de la seconde moitié du XIX^e siècle ont joué un rôle important dans cette façon de voir. En 1845, le philosophe américain Henry David Thoreau décide d'aller vivre dans une cabane qu'il a construite lui-même dans les bois de Concord, dans le Massachusetts. De cette expérience, il tire l'essai *Walden* (1854), devenu l'un des textes phares du mouvement écologiste moderne. De même, l'écrivain américain John Muir, qui fonde en 1892 le Sierra Club, l'une des ●●●

Contexte

Plus de la moitié de la population mondiale vit en ville. Dans ce contexte, où il faut compter également avec la présence de plus en plus envahissante des technologies numériques, la relation de l'homme à la nature se transforme.

●●● plus importantes organisations de protection de l'environnement aux États-Unis, relate dans ses écrits ses aventures dans la Sierra Nevada. Enfin, en 1949, l'écologue américain Aldo Leopold rédige l'*Almanach d'un comté des sables*, qui contribue, par son succès auprès du public, à l'intérêt accru des populations pour l'écologie (1).

Ces auteurs prônent un retour à un mode de vie simple et autosuffisant. Mais la nature qu'ils célèbrent, conçue en opposition à la ville et à la civilisation, a, dans une certaine mesure, consolidé le dualisme humain/nature en cristallisant la notion d'une nature pure, un idéal que l'être humain, par sa présence, ne peut que souiller. Cette vision paradisiaque de l'environnement, perçu comme un lieu que l'homme a perdu et qu'il cherche à retrouver, nous rend aveugle à la nature bien réelle qui nous entoure au quotidien, en ville ou à la campagne.

De nouvelles notions

Pendant, cette vision a évolué. La révolution numérique initiée à la fin des années 1990, en transformant le monde, a altéré notre lien à l'environnement. Les systèmes de croyances établis lors de la révolution industrielle coexistent aujourd'hui avec de nouveaux courants de pensée, et le dualisme humain/nature atteint ses limites face à ces nouvelles tendances, notamment en politique environnementale. Le XXI^e siècle, ère de la crise écologique, a fait émerger les notions de recyclage, de développement durable, ou encore de réchauffement planétaire. L'homme, intrinsèquement perçu comme « supérieur à » – donc responsable de – la nature est dans une démarche de protection de l'environnement qui commença au début du XX^e siècle. La mise en place des parcs nationaux aux États-Unis, qui débuta à ce moment-là, en



▲ *Apparu dans les années 1960, le concept de wilderness établit que la nature perd toute qualité sauvage dès lors qu'elle se trouve en présence d'êtres humains.*

est un bon exemple. L'homme délimite une superficie de nature dite « intacte » et décide de la protéger légalement de toute intrusion humaine, notamment grâce au Wilderness Act ratifié par le Congrès américain en 1964.

L'article premier définit le terme *wilderness* comme « un endroit où la Terre et sa communauté vivante ne sont pas envahies par l'homme, où l'homme reste un visiteur de passage... Un lieu qui conserve son caractère sauvage,

sans amélioration continue ni infrastructure humaine, et qui est protégé et régulé afin de préserver son état naturel ». Une notion de plus en plus critiquée par les chercheurs car faisant référence à un idéal qui n'existe pas. En effet, selon la définition du Wilderness Act, seul l'Antarctique pourrait être qualifié de « sauvage ». Ni l'Amérique ni l'Australie ne passeraient le test, des communautés indigènes ayant peuplé ces deux pays depuis respectivement 11 000 et 40 000 ans. William Cronon, historien de l'environnement, expliquait, en 1995, dans un essai intitulé « The Trouble with Wilderness » que « si nous nous autorisons à croire que

Nous vivons, à l'heure actuelle, une extension de notre propre identité à notre environnement



la nature, afin d'être vraie, doit être sauvage, alors notre présence en son sein représente sa chute. L'endroit où nous sommes est l'endroit où la nature n'est pas » (2).

À l'ère numérique, ces croyances sont à nouveau remises en question. L'hyperconnectivité et l'emploi quotidien d'Internet ajoutent une dimension – celle d'une réalité virtuelle – à celle faite d'odeurs, de terre et de pluie de la nature réelle. Les recherches que j'ai effectuées ces deux dernières années en Australie ont eu pour but de comprendre comment l'être humain se connecte à la nature dans un contexte moderne, en évaluant les conséquences sur ce lien



▲ L'Australien Glenn Albrecht a inventé en 2005 le terme « solastalgia » pour évoquer l'éco-anxiété.

d'une consommation numérique régulière (une heure ou plus de connexion à Internet au moins cinq jours par semaine).

Menés sur 220 participants (118 Américains et 102 Australiens), ces travaux sont fondés sur un protocole de recherche mixte, incluant un sondage en ligne et des entretiens qualitatifs semi-directifs. L'enquête a été réalisée auprès d'un échantillon représentatif d'individus du mouvement écocitoyen : militants écologistes, habitants d'écovillages, membres de jardins communautaires, propriétaires de fermes urbaines et rurales, étudiants en sciences environnementales, membres du mouvement zéro déchet, etc. Le sondage, structuré autour d'un ensemble de 29 questions ouvertes ou fermées (réponses préétablies à choix unique ou multiple), aborde les concepts de « solastalgia », de trouble déficitaire de nature, d'anxiété liée à l'usage d'Internet, ou encore de détox numérique.

Le philosophe australien Glenn Albrecht a inventé le terme « solastalgia » (*solastalgia*) pour évoquer la détresse éprouvée par l'être humain lorsque son environnement proche est affecté de manière négative. Plus de 90 % des participants au sondage disaient souffrir de solastalgia. Les entretiens semi-directifs qui ont suivi le sondage ont confirmé qu'Internet engendre également une forme de solastalgia virtuelle. L'individu est affecté par les informations disponibles en ligne sur les problèmes écologiques à l'échelle globale. Pour de nombreux participants, cette forme de solastalgia est perçue comme plus violente que la solastalgia simple car, s'il leur est possible d'agir lorsque la nature environnant leur quotidien est menacée, ils se sentent impuissants face à des événements situés à des milliers de kilomètres.

C'est sur le dualisme humain/nature que les résultats sont le plus surprenants. Ils révèlent des contradictions dans la logique de pensée, pointant ainsi vers une évolution du dualisme dans l'inconscient collectif. J'ai souvent été déroutée par la somme de paradoxes dans les réponses des participants, avant de comprendre que ces paradoxes mêmes représentaient les réponses que je cherchais et qui définissaient la place de l'être humain moderne au sein de la nature et son identité par rapport à elle.

En effet, la majorité des individus interrogés se définit comme faisant partie de la nature. Cette assertion est fondée à la fois sur une perception intellectuelle et sur une perception émotionnelle du participant. Autrement dit, ces individus ont appris à se penser (intellect) comme faisant partie de la nature, par leur éducation (école, parents, médias, etc.), et cela s'exprime aussi comme une sensation, un ressenti (une émotion) qu'ils éprouvent, souvent, d'ailleurs, lorsqu'ils sont au contact d'éléments naturels. Mais, s'ils se définissent comme faisant partie de la nature, ces mêmes individus admettent que la nature perd toute qualité sauvage en présence d'êtres humains. Ainsi, la plupart adhèrent à la définition de *wilderness* présentée par le Wilderness Act.

Liens du cœur

Les mentalités ont ainsi peu à peu évolué depuis la naissance des mouvements écologistes du début du XX^e siècle, et l'être humain, afin de mieux sauver cette nature pour laquelle il se bat, s'y est identifié. C'est ce que nous vivons à l'heure actuelle : une plus grande identification à notre environnement ou, en d'autres termes, une extension de notre propre identité à celui-ci. Le temps doit faire son œuvre pour que le nouveau se défasse du vieux, et la croyance en une ●●●

●●● séparation humain/nature reste encore très présente, se révélant dans d'apparents illogismes tels que « je suis la nature mais pas la nature sauvage » (*wilderness*), ou encore « je suis la nature mais les objets que je crée n'en font pas partie (créations humaines telles que plastique, voiture, iPhone...) ».

Comment interpréter ces résultats? L'anthropologue britannique Kay Milton explique l'importance des émotions d'amour et d'empathie chez les écologistes, et comment ces liens du cœur soutiennent les actions du mental et rendent les gens plus efficaces dans leurs démarches de sauvegarde de l'environnement (3). On ne défend bien que ce que l'on aime, et ce que l'on aime, dans une certaine mesure, devient soi (d'où le phénomène d'identification de mes participants, qui considèrent les êtres humains, et se considèrent eux-mêmes, comme étant la nature). On souffre lorsque l'on voit des arbres abattus, des animaux massacrés, comme si l'on était soi-même entamé. Le concept de solastalgie, de même que celui de trouble



▲ Les émotions d'amour et d'empathie ont toute leur place dans le combat écologiste.

déficitaire de nature (*nature-deficit disorder*), terme inventé par le journaliste américain Richard Louv en 2005, dénoncent le manque de vert de la société contemporaine occidentale, qui passe la majeure partie de son temps enfermée plutôt qu'à l'extérieur (ce qui a une résonance particulière en ces temps de confinement...). Respirer un air qui sent

le gasoil, subir les travaux en bas de chez soi, voir un parc être rasé pour faire place à un centre commercial : toutes ces situations sont des exemples de solastalgie et évoquent l'importance que la nature a pour l'être humain, ce lien viscéral qu'il entretient avec elle et que l'urbanisation n'a pas su entacher.

Vertus thérapeutiques

Il y a donc la nature que l'on imagine et celle que l'on vit. Il s'agit à la fois d'une réalité extérieure et d'une condition intérieure ou, comme le dit en 1967 l'Américain Roderick Nash, professeur émérite d'histoire et d'études environnementales, dans *Wilderness and the American Mind*, la nature est affaire de perception, « elle fait partie de la géographie de l'esprit ». Aujourd'hui, un nombre croissant de chercheurs souhaite se libérer du dualisme humain/nature ou, du moins, le redéfinir. L'avenir de ce concept est, à l'image de la société qui l'emploie, en évolution. La nature est à la mode. Le fait que la science soit à présent capable de prouver les vertus thérapeutiques de celle-ci sur la physiologie

PL@NTNET FÊTE SES 10 ANS

Il y a dix ans naissait Pl@ntNet, qui permet d'identifier une plante avec un smartphone. Mis au point par plusieurs instituts de recherche (le Cirad, Inria, l'Inra et l'Institut de recherche pour le développement), le système est d'abord un site Internet, baptisé Pl@ntScan. Les images, fournies par des chercheurs, permettaient alors l'identification de 35 espèces d'arbres méditerranéens. Une prouesse technique, qui repose sur la combinaison d'informations visuelles des différents organes de la plante et l'interaction avec l'utilisateur pour affiner l'identification. Pour des raisons techniques (mauvaise qualité des appareils photos intégrés aux téléphones portables), il faut attendre 2013 pour que soit lancée l'application mobile (libre et gratuite). Aujourd'hui, le jeu de



données compte près de 1,8 million d'images et recense environ 28 000 espèces de plantes. Le projet a fait des émules, puisque le portail en ligne Open, avec la participation du Muséum national d'histoire naturelle, dénombre pas moins de 154 observatoires participatifs des espèces et de la nature (1). V. G.

(1) open-sciences-participatives.org/home

humaine y est certainement pour beaucoup. Il a par exemple été montré que passer du temps au vert aide à combattre le stress, la dépression (4). Cela rendrait aussi plus créatif, régulerait les troubles du sommeil, ou encore atténuerait l'hyperactivité (5). C'est même devenu l'un des remèdes préférés des programmes pour les personnes souhaitant se déconnecter du numérique (ce qu'on appelle en anglais la *digital detox*).

Mais Internet peut également être un outil positif dans notre lien à la nature. L'une des surprises de mon enquête a été de comprendre que les gens voient aussi la technologie comme un atout dans leur relation à l'environnement. Cela est bénéfique dans le sens où Internet, par le biais des smartphones, ordinateurs et tablettes, nous engage dans une plus grande compréhension intellectuelle de celui-ci. On ne connaît pas une plante, mais on peut l'identifier et en apprendre plus en cherchant sur le Web (lire l'encadré p. 71). Comment cultiver le chou chinois en pot? Quand apparaîtra la prochaine pleine lune? Où se trouve le chemin de randonnée le plus proche?

Pour répondre à toutes ces questions, et à bien d'autres, Internet est un outil efficace. Sa limite réside dans l'impact qu'il a sur le corps et la physiologie humaine. Passer du temps en ligne est stressant et fatigant, quelle que soit la recherche entreprise. Mais ce que le Web nous apprend, la nature nous le rend. Comment vous sentez-vous après plus d'une heure face à un écran? Et

Équilibrer temps connecté et temps au vert permet de bénéficier du meilleur des deux mondes

comment vous sentez-vous après une longue balade en forêt? Ces interrogations faisaient partie de mon sondage.

La majeure partie des participants dit se sentir fatiguée, voire épuisée, après une session en ligne. La science confirme que la lumière bleue des appareils numériques est délétère et altère les rythmes du corps humain (6). Passer du temps face à un écran avant de se coucher retarde l'apparition de la mélatonine (l'hormone du sommeil), décale les cycles de veille et de sommeil, et favorise la fatigue

chronique. En somme, si Internet offre la possibilité de développer sa relation au monde naturel, cela reste un outil qu'il faut employer avec modération. Créer un équilibre entre temps connecté et temps au vert permet de bénéficier du meilleur des deux mondes et de limiter les effets délétères de la technologie numérique.

Le dualisme humain/nature est représentatif de la tendance inhérente à la culture occidentale à séparer et catégoriser. On sépare l'homme et son environnement comme on sépare l'esprit et le corps, la ville et la nature, ou encore l'individuel et le global. Ces dualismes sont des filtres au travers desquels nous percevons le monde. Et comme pour tous les chemins parcourus un millier de fois, on finit par les emprunter sans plus s'en apercevoir. Mon travail de recherche, s'il m'a permis de remettre en question un bon nombre d'idées préconçues, m'a surtout appris à voir l'unité au-delà de la séparation. La technologie numérique est un nouvel outil dans notre relation à l'environnement, qui n'a de sens que celui que son utilisateur lui accorde. Comme les personnes que j'ai interviewées me l'ont montré, il est possible d'utiliser Internet pour nourrir notre relation à la nature, et il est nécessaire d'apprendre à contrôler sa consommation. ■

(1) Henry David Thoreau, *Walden ou la Vie dans les bois*, Albin Michel, 2017; John Muir, *Un été dans la Sierra*, Hoëbeke, 2014; Aldo Leopold, *Almanach d'un comté des sables*, Flammarion, 2017.

(2) W. Cronon, « The Trouble with Wilderness or, Getting Back to the Wrong Nature », in William Cronon, *Uncommon Ground: Rethinking the Human Place in Nature*, W. W. Norton, 1995.

(3) Kay Milton, *Loving Nature: Towards an Ecology of Emotion*, Routledge, 2002.

(4) G. N. Bratman et al., *PNAS*, 112, 8567, 2015.

(5) R. A. Atchley et al., *PLoS ONE*, 7, e51474, 2012.

(6) G. Tosini et al., *Mol. Vis.*, 22, 61, 2016.



▲ Parce qu'ils altèrent les rythmes du corps humain, les appareils numériques ne génèrent pas la même fatigue qu'une longue balade en forêt.



LUDOVIC ORLANDO

Un regard sans œillères sur la paléogénétique

Ce spécialiste de l'ADN ancien, connu pour ses travaux sur le cheval, explore l'histoire du vivant sans la réduire au seul génome. Il défend une approche dans laquelle la nature n'est pas idéalisée et ne s'oppose pas à la culture. Il souhaite pour cela élargir le champ des recherches à toutes les marques laissées par l'homme sur son environnement.

Les murs du laboratoire anthropologie moléculaire et imagerie de synthèse (Amis), à Toulouse, sont couverts de posters de chevaux. On se croirait dans une chambre d'adolescent, n'étaient les titres coiffant les images: *Nature*, *Science*, *Cell*... Au cœur de la vieille faculté de médecine de Toulouse, Ludovic Orlando, 43 ans, reçoit dans un bureau rénové, cartons à peine débarrassés. Sur les étagères, encore des représentations de chevaux: l'animal emblématique de celui qui a pris, au 1^{er} janvier 2020, les rênes de ce laboratoire dédié à l'évolution de l'être humain au sens large, de la préhistoire à nos jours, en combinant la recherche de vestiges sur le terrain et l'analyse moléculaire, mariant ainsi archéologie, anthropologie et génomique.

700 000 ANS

C'EST L'ÂGE D'UN CHEVAL du Yukon, au Canada, dont Ludovic Orlando a contribué à séquencer le génome en 2013.

En préambule, il annonce vouloir rééditer un livre qu'il avait publié il y a une quinzaine d'années (*L'Anti-Jurassic Park: faire parler l'ADN fossile*, Belin, 2005), afin de « rétablir une nouvelle fois la vérité » sur l'ADN ancien. « Dans les années 2000, on surinterprétait le moindre fragment de génome, on racontait l'histoire des peuples avec quelques paires de bases », déplore-t-il. Même le biologiste suédois Svante Pääbo, pionnier mythique de la discipline qui consiste à faire parler les génomes des restes anciens, s'y est trompé. « En 2004, il affirmait qu'Homo sapiens ne s'était pas croisé avec Neandertal. En 2010, il démontrait lui-même le contraire », explique celui qui voue au scientifique une « immense admiration ». C'est au début de ces années 2000 que Ludovic Orlando commence sa carrière de chercheur. Le génome humain vient d'être séquencé à l'issue de treize années d'efforts considérables. Bientôt, ce sera l'avènement du séquençage à haut débit, qui permettra de réaliser ce travail en quelques jours à peine. « Une révolution technologique, la DeLorean du génome, s'amuse le paléogénéticien, en référence

au film "Retour vers le futur". Aujourd'hui, on peut séquencer la plus grande partie du vivant, y compris des espèces encore jamais vues. »

Créativité scientifique

Ce n'est pas encore le cas lorsque ce bon élève natif de Marseille entre à l'École normale supérieure de Lyon en 1996, sans idée claire sur son avenir. Pour lui, la biologie est la plus complète des sciences, parce qu'elle convoque toutes les autres. C'est pour cela qu'il ne souhaite pas être « ultraspécialisé ». Ses lectures d'alors: sociologie, histoire de l'art et « Henry Miller, Virginia Woolf et Jean-Marie Gustave Le Clézio, pour la langue, le rythme, la vie dans sa plus grande liberté ». Cette liberté, il ne la trouvera pas durant sa première expérience dans un laboratoire en France. Le travail y est « trop descendant, pas assez collaboratif... » En 2003, il soutient sa thèse sur l'ADN de l'homme de Neandertal et de l'ours des cavernes, puis enseigne pendant deux ans en collège et lycée. La production des savoirs lui manque: « Je me croyais enseignant, je me suis trouvé chercheur. » Retour à l'ENS comme enseignant-chercheur, sans réelle satisfaction.

Contexte

Le début des années 2000 a marqué l'essor des recherches et des techniques d'analyse du génome humain. Une ouverture dont profitent certains paléontologues qui, à l'aide de ces outils, font de fantastiques découvertes et jettent une nouvelle lumière sur l'histoire évolutive du vivant.

La décennie suivante, en revanche, a des allures de conte de fées. 2010 : le Centre de géogénétique ouvre ses portes à Copenhague, au Danemark. À sa tête, le truculent Eske Willerslev. Ce scientifique aventurier, ancien trappeur en Sibérie, est devenu un expert mondial des génomes anciens. En 2010, son équipe publie la séquence du premier génome humain ancien, celui d'un individu de l'ethnie Saqqaq du Groenland, qui vivait il y a 4000 ans. De leur côté, Svante Pääbo et Johannes Krause découvrent une nouvelle espèce, l'homme de Denisova, par un procédé d'analyse purement génétique. Les performances des séquenceurs et de l'informatique explosent. L'occasion est rêvée : Eske Willerslev offre à Ludovic Orlando de monter son propre groupe au sein de l'institut. « *En arrivant, il avait peu de publications à son actif, mais un énorme potentiel qui s'est vite révélé. Sa créativité scientifique et sa capacité de travail sont étonnantes. Sur-tout, il est excellent en techniques de laboratoire et en bio-informatique. C'est un avantage décisif* », raconte le chercheur danois, qui regrette encore son départ. L'intéressé renvoie l'hommage : « *Je suis né à la recherche dans ce laboratoire.* »

Domestication du cheval

Suit une imposante série de publications dans lesquelles Ludovic Orlando joue un rôle de leader. À commencer par le séquençage du génome le plus ancien, celui d'un cheval du Yukon, au Canada, vieux de 700 000 ans (1) – « *une réussite technologique* », souligne Eske Willerslev. En effet, de nouvelles méthodes d'extraction et de séquençage de l'ADN ont été utilisées pour la première fois avec succès sur des échantillons très fragiles. Également à son actif à cette époque : le déchiffrement du premier épigénome ancien (2)



SES DATES

- 1977** Il naît à Marseille.
- 1999** Agrégation en sciences de la vie et de la Terre.
- 2003** Thèse de doctorat, université de Lyon.
- 2010-2016** Il dirige son propre groupe au Centre de géogénétique de Copenhague, au Danemark.
- 2016** Directeur adjoint du laboratoire Amis, à Toulouse.
- 2020** Directeur du laboratoire Amis.

– « *un travail fondamental, dont on mesurera les conséquences dans quelques années* », estime le chercheur danois –, ainsi que l'analyse des caractères génétiques d'un mélange de populations de l'âge du bronze (3).

Pourquoi Ludovic Orlando s'intéresse-t-il en particulier au cheval... alors qu'il n'est pas cavalier ? « *C'est l'instrument de l'histoire. Sa domestication, il y a 5500 ans, correspond à la première globalisation. Grâce à lui, les humains vont plus vite, plus loin, les cultures et les langues entrent en contact. Il sert à*

augmenter la productivité agricole, à faire la guerre... Il a modelé notre histoire et reste un mystère : pourquoi a-t-il survécu au maximum glaciaire en Europe [il y a environ 20 000 ans, NDLR], et pas en Amérique ? »

La première trace de domestication du cheval a été identifiée à Botai, au Kazakhstan, sur des restes datant de 3 500 ans. Or le séquençage de l'ADN issu de ces vestiges a montré que ces chevaux ne sont pas les ancêtres de ceux que l'on connaît aujourd'hui. Une autre lignée, ibérique celle-là, vieille de 4 000 ans et récemment analysée, ne l'est pas non plus (4)... Le cheval a donc été domestiqué au moins une deuxième fois, ailleurs, et l'ancêtre du cheval actuel reste inconnu, de même que l'identité des humains qui l'ont domestiqué. C'est la grande question scientifique qui mobilise Ludovic Orlando. ●●

●●● Avec un succès aussi précoce, peut-on garder la tête froide? « *Oui, car il y a un énorme travail derrière ces papiers. Celui sur le génome le plus ancien, je le vomissais littéralement vers la fin (sic)... La découverte, c'est le doute. On est très exposés dans cette discipline, on porte une grande responsabilité.* » Une responsabilité qui s'étend au-delà de la connaissance pure. Celui qui affirme ne pouvoir se passer des sciences humaines et sociales, qui fait des incursions dans le champ artistique pour comparer la représentation et la génétique, est conscient des risques d'un procès en réductionnisme. De même qu'il prend soin d'éviter l'écueil de la sociobiologie, la thèse controversée d'un fondement génétique des comportements sociaux développée dans les années 1970 par Edward Osborne Wilson, qui a fait récemment une réapparition médiatique remarquée chez certains prophètes autoproclamés du transhumanisme et de l'intelligence artificielle. « *Nous ne sommes pas réductibles à notre génome, estime Ludovic Orlando. Il faut aujourd'hui dépasser l'antagonisme nature-culture.* »

Ainsi, le paléogénéticien n'hésite pas à utiliser le qualificatif de « *bio-culturel* » quand il parle du cheval de Przewalski, quitte à faire grincer des dents. Les recherches qu'il a menées sur cet ongulé, souvent considéré comme le seul cheval sauvage, vont « *à l'encontre d'une sorte d'idéal de nature* ». Découverte dans les années 1870, chassée à outrance, passée au bord de l'extinction dans les années 1960, sauvée de justesse grâce à des animaux de captivité, l'espèce compte aujourd'hui environ 2 000 individus en liberté. « *C'est l'archétype d'une politique de conservation qui réussit. Mais lorsque nous avons séquencé le génome des chevaux de Botai, nous avons compris*



que Przewalski est leur descendant! Il est donc un cheval domestiqué revenu à l'état sauvage (5), relate le chercheur. Ce résultat a été reçu comme une trahison par les associations de conservation de l'animal que je conseillais. J'ai dû en démissionner. Comme si tout ce qui mérite d'être préservé devait être sauvage! Je pense au contraire qu'il faut conserver et documenter des traces de l'impact humain. Parce qu'il n'y a plus d'environnement vierge. »

Un séquençage élargi

En 2021, le laboratoire Amis sera renommé Imagene (interdisciplinarité en médecine, archéologie, génomique, sciences environnementales et évolution), à l'initiative de Ludovic Orlando et de son équipe. « *Outre ses qualités scientifiques, Ludovic apporte une dimension fédératrice, il est capable de créer des ensembles multiculturels* », souligne Éric Crubézy, professeur d'anthropologie biologique à l'université Toulouse-III-Paul-Sabatier, l'un des fondateurs du laboratoire. Sous sa direction, pendant plus de vingt ans, de

▲ *Reconstitution par Ludovic Orlando d'un cheval domestiqué de Botai, au Kazakhstan, grâce au séquençage de l'ADN issu de restes datant de 3500 ans.*

nombreux chantiers de fouilles ont été conduits, notamment en Sibérie, qui ont permis d'accumuler un matériel considérable : restes humains et animaux, artefacts, prélèvements microbiens... « *Ce laboratoire est très fort dans la détermination des relations de parenté entre humains. Désormais, nous allons tout séquencer : sujets, liens de parenté, animaux, bactéries du milieu* », explique Ludovic Orlando. Un choix scientifique, mais aussi stratégique. Les grands laboratoires dans le monde – ceux de Svante Pääbo, à l'Institut Max-Planck de Leipzig, de Johannes Krause, à Iéna, ou de David Reich, à la Medical School de Harvard –, dotés de moyens largement supérieurs, se sont focalisés sur l'humain. « *Avec le cheval, et tout le vivant qui constitue l'environnement de l'humain, il a une carte à jouer pour placer le site toulousain dans le peloton de tête* », souligne Éric Crubézy.

« *Nous allons étudier l'impact de la révolution industrielle sur notre génome, celui des changements alimentaires, en particulier avec la consommation de sucre, précise Ludovic Orlando. Nous visons des applications en santé humaine.* » L'activité de recherche et la nouvelle organisation du laboratoire laissent peu de temps libre à ce père de trois enfants. Après les romans de jeunesse, ses lectures se portent aujourd'hui davantage sur des essais, notamment ceux du biologiste américain Peter Turchin, inventeur de la « *cliodynamique* », qui consiste à modéliser les grands cycles de l'histoire par les mathématiques. À la croisée des disciplines, encore et toujours. ■

Jean-François Haït

“ **Il faut conserver et documenter des traces de l'impact humain, car il n'y a plus d'environnement vierge** ”

Ludovic Orlando, laboratoire Amis

- (1) L. Orlando et al., *Nature*, 499, 74, 2013.
- (2) J. S. Pedersen et al., *Genome Res.*, 24, 454, 2014.
- (3) M. E. Allentoft et al., *Nature*, 522, 167, 2015.
- (4) A. Fages et al., *Cell*, 177, 1419, 2019.
- (5) C. Gaunitz et al., *Science*, 360, 111, 2018.



Les mécanismes cérébraux derrière les émotions

L'identification des bases neurales du comportement est l'un des piliers des neurosciences, mais elle demande au préalable la compréhension du comportement en lui-même. En octobre 2019, cette problématique a fait l'objet d'un numéro spécial du journal académique *Neuron*. Les neuroscientifiques mettaient l'accent sur l'importance de l'étude des comportements « naturels et non restreints », en plus des études faites en laboratoire dans des conditions très contrôlées. Ils insistaient sur la nécessité d'étudier les comportements et la neuroanatomie dans un large éventail d'espèces pour mieux les comparer, non seulement pour embrasser la richesse et la complexité du cerveau, mais surtout afin de mieux transposer à l'homme les connaissances acquises chez l'animal.

PARMI LES SUJETS chauds : les liens entre comportement émotionnel et cerveau. En particulier, entre expression faciale et activité neurale. Reflet des émotions, les expressions du visage sont, pour certaines, universelles. Ainsi, lorsque nous sommes dégoûtés, nos yeux deviennent plus étroits, notre nez se plisse et notre lèvre supérieure se déforme. Même si nous pensons parfois lire certains sentiments dans les expressions de nos animaux de compagnie, beaucoup d'entre eux nous apparaissent sans expression. Cependant, dès 1872, Charles Darwin proposait que les expressions faciales soient une mine d'information pour qui veut étudier les émotions à la fois chez les humains et les animaux. De nombreux travaux ont été publiés, qui corrélaient les expressions faciales avec les émotions dans différentes

espèces, notamment chez les rongeurs. Mais les méthodes utilisées impliquaient un long processus de notation manuelle et souffraient de biais, rendant difficile la reproduction de ces études.

Des chercheurs de l'Institut Max-Planck de neurobiologie, dans un article récent, sont les premiers à décrire différentes expressions faciales émotionnelles chez les souris (1). Comme chez nous, la face du rongeur se métamorphose selon qu'il goûte une substance sucrée ou amère, ou lorsqu'il est exposé à un stimulus douloureux.

“ Il existerait des neurones reflétant chacun une sensation spécifique ”

En décomposant les vidéos des mouvements des muscles faciaux alors que les souris réagissaient à différents stimuli, et à l'aide de méthodes d'apprentissage statistique (lire *La Recherche* n° 559, p. 28), les chercheurs ont relié de manière fiable cinq états émotionnels à leurs expressions faciales : le plaisir, le dégoût, les nausées, la douleur et la peur. De plus, l'équipe dirigée par Nadine Gogolla a montré que l'expression faciale d'une souris n'est pas seulement une réaction à l'environnement : elle reflète la valeur émotionnelle du stimulus qui la déclenche. Par exemple, les souris qui ont léché une solution de sucre quand elles avaient soif ont montré une expression faciale beaucoup plus joyeuse

que les souris rassasiées. Les auteurs ont ensuite étudié comment l'activité neuronale dans différentes régions du cerveau affecte les expressions faciales. Ainsi, ils ont pu évoquer différentes expressions faciales en activant, au moyen de techniques optogénétiques, des zones cérébrales spécifiques, connues pour jouer un rôle dans le traitement émotionnel. Mieux encore, grâce à leur système automatisé de reconnaissance faciale, ils ont mesuré l'intensité et la nature d'une émotion sur une échelle de temps de quelques millisecondes seulement. De quoi la comparer à l'activité neuronale, très rapide elle aussi, dans les zones cérébrales pertinentes. L'une d'elles s'appelle le cortex insulaire, une structure associée au comportement émotionnel et à la perception des émotions, chez les animaux comme chez les humains. Les résultats de cette étude suggèrent l'existence – au moins dans le cortex insulaire – de « neurones de l'émotion », reflétant chacun une sensation spécifique.

CE PROCÉDÉ innovant, proposé par Nadine Gogolla et son équipe, a fait du bruit dans la communauté des neurosciences comportementales, car il permettrait, à terme, de déchiffrer les mécanismes neuronaux fondamentaux derrière les émotions... chez la souris ! Mais il s'agit d'une condition préalable pour comprendre les soubassements cérébraux des émotions chez l'homme. Et donc des troubles associés comme l'anxiété et la dépression. ■

(1) N. Dolensek *et al.*, *Science*, 368, 89, 2020.

Mariana Alonso est neuroscientifique au laboratoire perception et mémoire de l'Institut Pasteur.

● Cette chronique est proposée en alternance avec celle d'Adrien Peyrache, de l'université McGill, au Canada.

Et Greenwich remet toutes les pendules à l'heure

Marie-Christine de La Souchère, agrégée de physique

La désignation du méridien de Greenwich, en 1884, comme origine des longitudes et point de départ du comptage des heures à l'échelle mondiale a mis fin à des siècles de confusion. Un choix scientifique qui entérine une pratique déjà largement installée et marque une nouvelle victoire du Royaume-Uni dans la compétition qui l'oppose à la France.

Positionner l'origine des longitudes aux confins des terres connues. Un point de départ naturel, que choisissent les premiers géographes du bassin méditerranéen, qui fixent le méridien de référence à l'extrémité occidentale de l'Europe. Aux I^{er} et II^e siècles de notre ère, le Romain d'origine phénicienne Marin de Tyr et l'astronome grec Claude Ptolémée placent le premier méridien au niveau des mythiques îles Fortunées (identifiées par la suite comme les îles Canaries). Mais, en réalité, Ptolémée n'a qu'une idée très vague de leur position, celles-ci ayant été approchées mais pas explorées.

Vers la fin du Moyen Âge, les navigateurs décident de s'aventurer plus loin dans l'océan Atlantique. Les Portugais découvrent l'archipel des Açores et constatent que l'aiguille de la boussole y indique exactement le nord, sans dévier ni vers l'est ni vers l'ouest. L'absence de déclinaison magnétique, c'est-à-dire de différence entre les directions du nord géographique et du nord magnétique, n'est-elle pas une particularité propre à distinguer un méridien et à en faire une origine naturelle des longitudes ?

Le Flamand Gérard Mercator, à l'origine du système de projection cartographique qui porte son nom, choisit l'île de Corvo, dans les Açores, pour faire passer ce méridien



AGRÉGÉE DE PHYSIQUE

À travers ses livres, cette normalienne passionnée de vulgarisation scientifique cherche à faire connaître les sciences par l'approche historique ou l'anecdote.

fondamental, avant d'opter en 1569 pour l'une des îles du Cap-Vert. L'éditeur hollandais de globes et de cartes Willem Janszoon Blaeu commence lui aussi par privilégier les Açores avant d'abandonner cette référence, une fois prouvé que le phénomène n'était pas caractéristique d'un méridien géographique en particulier. Grâce aux observations des marins hollandais, Blaeu savait que les îles du Cap-Vert ou des Açores n'étaient pas le seul endroit où l'aiguille aimantée se figeait en direction du nord vrai. Le phénomène s'observait également au cap des Aiguilles, marquant le passage de l'océan Atlantique à l'océan Indien, ou sur les rives de l'océan Pacifique, dans les villes de Canton, au sud de la Chine, ou d'Acapulco, au Mexique. En outre, le long d'un même méridien géographique, l'aiguille aimantée accusait une déviation différente en fonction du relief.

Observation astronomique

La première moitié du XVII^e siècle voit donc un retour en grâce du méridien de Ptolémée. Les

Contexte

Le choix d'une origine des longitudes est longtemps resté l'apanage des cartographes et astronomes des grandes puissances maritimes qui, chacune, avaient leurs critères propres. L'adoption d'un méridien de référence commun est devenue une nécessité au XIX^e siècle, quand le développement du télégraphe électrique et l'essor des communications ferroviaires ont rendu indispensable la mise en place d'un temps universel.

Hollandais font passer celui-ci dans l'île de Tenerife, par le pic du Teide, visible à distance et considéré un temps comme la plus haute montagne de la Terre (3 718 mètres). En 1634, les Français adoptent comme référence les côtes ouest de l'île de Fer, la plus occidentale des Canaries. Mais, une fois le méridien de Paris défini par les astronomes de l'Académie des sciences en 1667, ce dernier supplante progressivement celui de l'île de Fer. À l'époque, l'observation en deux endroits différents d'un même phénomène astronomique, comme l'éclipse des satellites de Jupiter, est le procédé le plus fiable pour déterminer les différences de longitude. Comme cette technique réclame une lunette de forte puissance, les principaux pays d'Europe prennent l'habitude de compter la longitude à partir du méridien passant par l'observatoire de leur capitale. En 1675, les Britanniques font édifier dans la banlieue de Londres, à Greenwich, un observatoire dont l'astronome royal a pour mission « *de rectifier les tables des mouvements célestes et les positions des étoiles fixes dans le but de donner les moyens de déterminer les longitudes pour le perfectionnement de l'art de la navigation* ».

Congrès et débats

Un siècle plus tard, le méridien traversant le centre de l'instrument des passages (déterminant l'instant de passage d'un astre dans le plan méridien) de Greenwich a gagné les faveurs d'un grand nombre de navigateurs, grâce à la publication des éphémérides nautiques de l'astronome royal Nevil Maskelyne et de l'*Atlantic Neptune*, atlas monumental de 145 cartes, couvrant les côtes de l'Amérique du Nord.

Au XIX^e siècle, l'invention du télégraphe électrique et l'arrivée du chemin de fer nécessitent d'établir une heure de référence commune à l'ensemble de la planète. La multiplicité

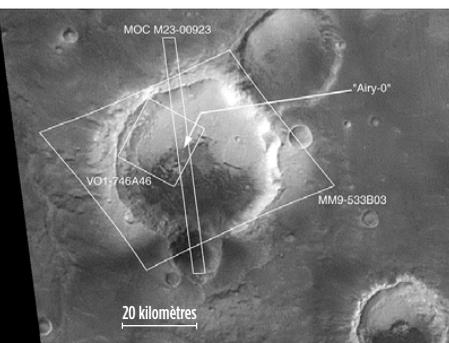


▲ La ligne du méridien de référence traverse l'Observatoire royal de Greenwich, au sud-est de Londres.

des heures locales (chaque ville avait sa propre horloge, dont le midi était repéré par le passage du Soleil au méridien) est devenue un véritable casse-tête pour les exploitants et les usagers, tout particulièrement dans les pays étendus en longitude. La mise en place d'un temps universel, tributaire de l'adoption d'un méridien origine, est débattue au cours des années 1870, lors des congrès successifs de l'Union géographique internationale, à Anvers, Paris, puis Venise.

Le sommet de la grande pyramide de Gizeh, pendant près de quatre millénaires l'édifice humain le plus haut du monde, a ses partisans, de même que Jérusalem, centre du monde chrétien. Des méridiens neutres, choisis sur des critères exclusivement géographiques, ont également leurs adeptes. Le minéralogiste français Alexandre-Émile Béguyer de Chancourtois milite pour un méridien purement océanique ou presque, séparant le Nouveau Monde ●●●

UN MÉRIDIEN ZÉRO SUR LA PLANÈTE ROUGE



▲ Le cratère d'impact Airy-0 sert de repère pour définir la position du méridien zéro de la planète Mars.

En 1783, lorsque l'astronome français Cassini de Thury propose aux Anglais de recalculer l'écart de longitude entre les observatoires de Paris et de Greenwich, la lunette de l'astronome royal James Bradley sert à définir le méridien de Greenwich. Puis, en 1850, lorsque l'astronome royal George Biddell Airy fait construire un instrument plus performant dans une salle avoisinante, le méridien de référence est déplacé d'une dizaine de mètres. Mais quelle référence choisir pour Mars ? Une vingtaine d'années auparavant, deux astronomes allemands, Wilhelm Beer et Johann Heinrich von Mädler, avaient entrepris une étude systématique de la planète Rouge.

Sur leur carte de 1837, ils avaient choisi comme origine des longitudes une tache circulaire aisément repérable, désignée par la lettre a. Les premières images à haute résolution de la surface martienne, transmises par la sonde Mariner 9 en 1972, détaillent cette zone a, dévoilant un cratère d'environ 40 km de diamètre. L'année suivante, celui-ci sera nommé cratère Airy par l'Union astronomique internationale, en hommage à l'astronome de Greenwich. Un petit cratère d'impact situé à l'intérieur du précédent, le cratère Airy-O, sert actuellement de repère pour définir la position du méridien zéro de la planète Rouge.

M.-C. S.

●●● de l'Ancien. Proche du méridien de Ptolémée, ce demi-cercle fictif passerait à 8° à l'ouest de l'île de Fer, de manière à éviter les terres habitées, et franchirait le chenal de Saint-Michel, dans les Açores. Le géographe Henry Bouthillier de Beaumont, président de la Société de géographie de Genève, plaide, quant à lui, pour un médiateur (l'équivalent de l'équateur pour les longitudes) traversant le détroit de Béring et dont le prolongement « couperait à peu près l'Europe et l'Afrique par le milieu », évitant les capitales et empêchant ainsi toute préséance de l'une d'entre elles.

La majorité des congressistes, toutefois, penche en faveur d'un méridien de référence passant par un observatoire au rayonnement éprouvé et doté de l'équipement adéquat. La septième conférence générale de l'Association internationale de géodésie, réunie à Rome en octobre 1883, fait observer que les éphémérides produites par l'observatoire de Greenwich sont plus nombreuses, ont une diffusion plus vaste et embrassent une surface plus grande que celles de leurs concurrents. Sans exclure totalement d'autres méridiens, la conférence préconise l'adoption

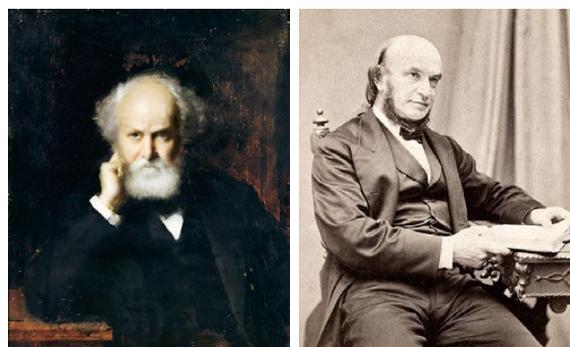
du méridien de Greenwich comme origine des longitudes et point de départ du comptage des heures.

Une référence pragmatique

En octobre de l'année suivante, à l'initiative des États-Unis, diplomates et scientifiques de vingt-cinq nations se réunissent à Washington pour statuer définitivement. Le bouillant astronome Jules Janssen est le délégué scientifique de la France, tandis que son collègue John Couch Adams, directeur de l'observatoire de Cambridge, représente le Royaume-Uni. Les Français, conscients des faibles chances du méridien de Paris et soucieux avant tout d'écarter celui de Greenwich, jouent la carte d'un

méridien choisi exclusivement selon des critères géographiques. Adams, qui n'est pas dupe de la manœuvre, fait observer qu'aucune formation terrestre spécifique ne permet de distinguer un méridien d'un autre. Les écarts de longitude entre deux lieux s'obtenant par comparaison des instants de passage d'une même étoile au méridien, la référence doit être un observatoire capable d'assurer, par télégraphe, la comparaison de l'heure à distance.

Le délégué des États-Unis souligne par ailleurs que les deux tiers de la flotte mondiale, dont la marine américaine, utilisent déjà le méridien de Greenwich, largement pris comme référence des cartes marines. En outre, le système de fuseaux horaires de l'ingénieur canadien Sandford Fleming, basé sur le méridien de Greenwich et adopté par les compagnies ferroviaires d'Amérique du Nord l'année précédente, donne pleinement satisfaction. Enfin, l'observatoire de Paris se trouve en plein cœur d'une ville très peuplée, sujette à la pollution et aux glissements de terrain, tandis que l'observatoire de Greenwich se situe à l'écart de Londres, sur une hauteur, au milieu d'un grand parc.



▲ Le Français Jules Janssen (à g.) et le Britannique John Couch Adams (à dr.) ont défendu chacun leur méridien « national ».

À l'unanimité moins trois voix (la France et le Brésil s'abstiennent, et Saint-Domingue vote contre), le méridien passant par le centre de la lunette méridienne de l'observatoire de Greenwich est consacré méridien de référence. Les longitudes seront comptées de -180° à $+180^\circ$ à partir de celui-ci, positivement vers l'est, négativement vers l'ouest. La suggestion, émise à Rome par les astronomes, de compter la longitude terrestre dans un seul sens, d'ouest en est, de 0 à 360°, est rejetée. Avec plus de réticence, par 15 voix sur 25, les représentants adoptent pour temps universel (UT) le temps civil de Greenwich. Le jour universel sera le jour civil de Greenwich, compté de 0 à 24 heures (et non de 0 à 12, en distinguant heures du matin et de l'après-midi). Il débutera au minuit

moyen du premier méridien, marquant le changement de date sur celui-ci. Pour conclure, les délégués français expriment le souhait de voir se généraliser l'extension du système décimal aux mesures d'angles et de temps. La question ne figurant pas à l'ordre du jour, la conférence se contente de formuler le vœu que les études techniques soient reprises dans ce sens.

La France ne se résigne à rallier le système horaire mondial qu'en 1911, en raison du potentiel de la tour Eiffel

La consécration du méridien de Greenwich est vécue en France comme une courbette devant la puissance commerciale du Royaume-Uni. « *Échec pour la science* », selon Janssen,

« *inclinaison devant le veau d'or* », pour l'un de ses collègues de l'Académie. La France ne se résigne à rallier le système horaire mondial que vingt-sept ans plus tard, une fois avéré le potentiel de la tour Eiffel en tant qu'antenne de communication à longue distance. Paris ne pouvant laisser passer l'occasion de jouer un rôle phare en matière de transmission horaire, la loi du 9 mars 1911 introduit l'heure du méridien de Greenwich en des termes qui ménagent la susceptibilité nationale : l'heure légale en France et en Algérie sera celle du méridien de Paris « *retardée de 9 minutes 21 secondes* ». Deux jours plus tard, la nouvelle heure fait son entrée dans les gares, supprimant par la même occasion le retard de cinq minutes des horloges présentes sur les quais (et sur lesquelles les trains se réglaient effectivement) par rapport aux horloges de la façade ou du seuil de la gare, qui marquaient l'heure de Paris.

La loi de 1911 restera en vigueur jusqu'à ce que le décret du 9 août 1978 rattache l'heure légale au temps universel coordonné (UTC), compromis entre le temps universel, lié à la rotation de la Terre, et le temps atomique, plus régulier. Le méridien de Greenwich n'intervient plus à part entière. Sa longitude, de surcroît, s'est révélée différente de zéro ! Pour représenter la Terre, le système géodésique mondial actuel, dit WGS 84, utilisé par le système de localisation GPS, se réfère à une Terre affranchie de ses anomalies gravitationnelles. Des anomalies gravitationnelles dont le directeur de l'observatoire de Greenwich, l'astronome George Biddell Airy, ignorait l'incidence sur la verticale du lieu, lorsqu'il avait fait installer, au XIX^e siècle, l'instrument servant à repérer la culmination des astres. Et qui font que l'ancien méridien zéro se trouve à 102,5 m à l'ouest du nouveau ! ■



▲ Cette carte publiée en 1716 par l'explorateur français Amédée François Frézier se réfère au méridien de Paris, défini en 1667 par l'Académie des sciences.

POUR EN SAVOIR PLUS

■ Françoise Duquenne, « Le buzz autour du méridien de Greenwich », XYZ n° 145, revue de l'Association française de topographie, 2015.

■ Jules Janssen, « Notice sur le méridien et l'heure universels », *Annuaire du bureau des longitudes* 1886, p. 835.

■ gutenberg.org/ebooks/17759

Les Comptes rendus et annexes des huit sessions de la conférence de Washington, en 1884.

ABONNEZ-VOUS À La Recherche

**EN VERSION PAPIER
ET NUMÉRIQUE** **NOUVEAU**

à partir de
60€

+ EN CADEAU 2 n^{os} Hors-série au choix



Partez à la découverte des mystères du sommeil et des rêves, dans ce hors-série de La Recherche.



100 jeux mathématiques, 25 énigmes policières, des entretiens avec Cédric Villani, Mickaël Launay, des articles...



Pesticides, particules fines, perturbateurs endocriniens... Ces molécules qui nous empoisonnent. Les solutions des scientifiques.



Le génie de l'animal : intelligence, empathie, habileté.

BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner sous enveloppe affranchie à La Recherche - Service Abonnements - 4, rue de Mouchy - 60438 Noailles cedex

OUI, je m'abonne à La Recherche et je reçois **EN CADEAU** 2 hors-série au choix.

OFFRE CLASSIQUE 1 AN - 10 n° + 1 n° double (en version papier et numérique)* pour **60€** au lieu de ~~71,90€~~**

OFFRE COUPLÉE 1 AN - 10 n° + 1 n° double + 4 hors-série (en version papier et numérique)* pour **84€** au lieu de ~~99,50€~~**

Je choisis mes 2 cadeaux :

Le sommeil et le rêve (G22) 100 jeux mathématiques (G23) Ces molécules qui nous empoisonnent (G24) Le génie de l'animal (G25)

*Rendez-vous sur www.larecherche.fr et créez votre compte en ligne pour accéder à la version numérique des numéros compris dans votre abonnement.

MES COORDONNÉES

M. Mme Melle

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Tél. : _____

Ville : _____

Pour accéder à la version numérique de vos numéros, merci d'indiquer votre e-mail :

E-mail : _____ @ _____

MON MODE DE RÉGLEMENT

chèque bancaire à l'ordre de La Recherche carte bancaire

N° _____

Expire fin _____

Signature obligatoire

Service abonnements : France : 01 55 56 71 15 - & Étranger : 00 33 155 56 71 15
E-mail : abo.recherche@groupe-gli.com

J'accepte de recevoir par mail des offres des partenaires de La Recherche.

La Recherche

** Vous pouvez acquérir séparément chacun des numéros normaux au prix de 6€40, le numéro double au prix de 7€90 et les hors-série au prix de 6€90. Offre exclusivement réservée aux nouveaux abonnés résidant en France métropolitaine dans la limite des stocks disponibles. Vous recevrez vos cadeaux sous 8 semaines maximum. La société Sophia Publications située au 8 rue d'Aboukir, Paris 2e est responsable de traitement et collecte des données afin de servir votre abonnement. Vos données pourront être transmises à d'autres organismes (presse, VAD, caritatif) et sont conservées pour une durée de 6 ans à partir de votre désabonnement. Vous pouvez exercer vos droits d'accès, de rectification, de limitation, de portabilité, d'opposition, d'effacement au traitement de vos données et définir vos directives post-mortem à l'adresse mail suivante : dpo@sophiapublications.fr en joignant une copie de votre carte d'identité. La société Sophia Publications dispose d'un délégué à la protection des données pouvant être contacté au 8 rue d'Aboukir, Paris 2e ou à l'adresse mail dpo@sophiapublications.fr. A tout moment vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL.

Physique ludique

Nous vous proposons une page de problèmes ludiques dont la résolution ne nécessite aucune connaissance avancée. Juste un peu de réflexion et parfois d'astuce. À vous de relever le défi!

■ Tout à l'envers

En cours de physique-mécanique, le professeur passe une vidéo montrant une balle en train de chuter. Puis il passe le film à l'envers. Il demande alors aux élèves d'indiquer dans chaque cas, par « haut » ou « bas », le sens des vecteurs vitesse et accélération.
→ À vous de répondre.



■ Haute tour Eiffel

La page « tour Eiffel » de Wikipédia en français indique 279,11 mètres pour la hauteur du dernier étage.
→ La précision à 11 cm près est-elle pertinente (même si l'action du vent est ignorée)?

■ Pouvoir énergétique

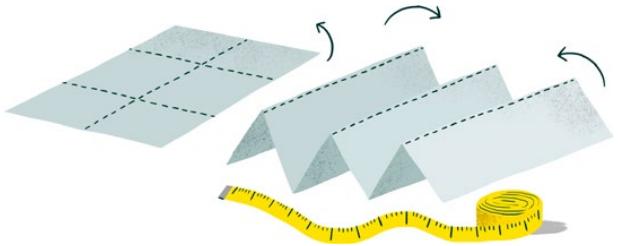
Le pouvoir énergétique des lipides est de 9 kcal/g, soit en gros 40 kJ/g, comme l'essence.
→ Sachant que celui de la nitroglycérine est de 1,5 kcal/g, pourquoi n'y a-t-il pas d'explosif au beurre?

■ Ballon à hydrogène ou à hélium?

L'hélium est deux fois plus lourd que le dihydrogène (4 g/mol contre 2 g/mol).
→ La force ascensionnelle – la résultante de la force d'Archimède et du poids – est-elle plus importante pour un ballon rempli avec de l'hélium ou de l'hydrogène? Dans quel rapport?

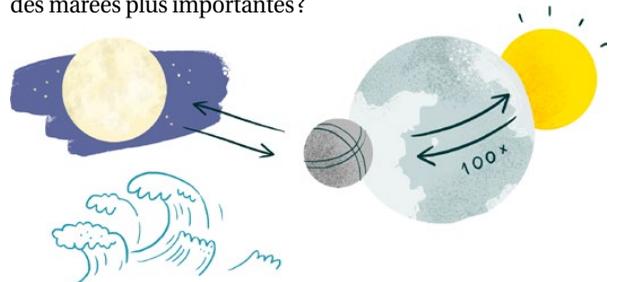
■ Pli hebdomadaire

À vue de nez, quelle serait l'épaisseur obtenue si une feuille de papier était pliée une fois par semaine pendant un an, soit 52 fois?
→ 5 mètres? 5 kilomètres? 500 millions de kilomètres?



■ Le principe des marées

La force gravitationnelle que la Lune exerce sur une boule de pétanque sur Terre est en gros 100 fois inférieure à celle exercée par le Soleil.
→ Comment se fait-il alors que la Lune provoque des marées plus importantes?



Page réalisée par Kamil Fadel
Illustrations: Coline Girard
Solutions dans le prochain numéro

SOLUTIONS DES JEUX DU NUMÉRO 559

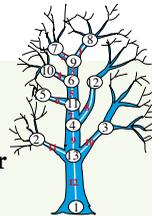
● Le muguet de Mélanie

Albain: E (7); Brice: F (8); Charles: A + D (3 + 6 = 9); David: B + C (5 + 5 = 10).
Il y a en tout 3 + 5 + 5 + 6 + 7 + 8 = 34 clochettes de muguet sur six brins. Ce nombre correspond à la somme des quatre nombres consécutifs 7 + 8 + 9 + 10. Il n'y a qu'une façon de répartir les six brins pour y parvenir: 7, 8, (3 + 6) et (5 + 5).

● Casse-noisettes

Alpha, Bêta et Gamma avaient respectivement 132, 66 et 33 noisettes. Si a , b et c sont les récoltes respectives d'Alpha, Bêta et Gamma et r la « raison » de la suite géométrique, on a: $a + b + c = 231 = c(1 + r + r^2)$. Or $231 = 3 \times 7 \times 11$. Parmi les nombres r possibles (de 1 à 14), seuls 2 et 4 sont tels que $1 + r + r^2$ divise 231. Si $r = 4$, alors $1 + r + r^2 = 21$ et donc $c = 11$ et $a = 176$, non divisible par 3. En revanche, si $r = 2$, alors $1 + r + r^2 = 7$ et donc $c = 33$, $b = 66$ et $a = 132$, divisible par 3.

● Un arbre porte-bonheur

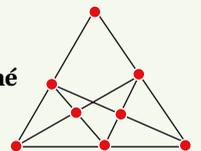


● Cubes nature

Le deuxième cube n'est pas identique aux autres. Sur le deuxième cube, le E et le U ne sont pas orientés de la même façon que sur les autres. En prenant le E de face, comme sur le dernier cube, on voit aussi que la lettre sur la face qui suit à droite est un R. Ceci se confirme sur l'avant-dernier cube alors que, sur le deuxième, c'est un A.

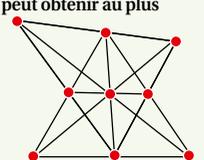
● Le jardin du Clerc Semé

Réponse a)



Réponse b)

Avec neuf arbres, on peut obtenir au plus dix alignements de trois arbres. Voir un exemple ci-contre (configuration de Pappus).





Loi de programmation pluriannuelle de la recherche et intégrité scientifique

Doit-on considérer que la loi fonde l'éthique? Le rapport européen sur l'intelligence artificielle affirme que l'éthique repose sur les droits fondamentaux et sur l'observance de la loi. Pourtant, des antagonismes entre lois et morale surgissent parfois. Songeons à la peine de mort ou au travail des enfants, que certains pays autorisent encore aujourd'hui. À cela s'ajoute l'existence de notions éthiques, comme l'équité, dont la fonction est de contrevenir à la rigidité inhérente à toute règle pour parvenir à établir une authentique justice, par-delà l'égalité abstraite et, parfois même, par-delà le droit.

Doit-on considérer, à l'inverse, que la réflexion éthique se place antérieurement, dans l'ordre logique et temporel, tant pour fonder la loi que pour l'appliquer? Sans doute! Certains objecteront avec raison que l'établissement de la loi obéit à des exigences économiques et politiques qui vont bien au-delà de la morale, même si celle-ci y prend parfois sa part. Profitons-en néanmoins pour commenter, sur le plan éthique, le projet de loi de programmation pluriannuelle de la recherche (LPPR) qui concerne tous les lecteurs de ce magazine, puisqu'il concerne la recherche.

LE PREMIER MINISTRE et le président de la République ont annoncé une programmation pluriannuelle de la recherche accompagnée d'une augmentation des moyens financiers – qui devraient atteindre les objectifs de 3 % du PIB mentionnés depuis des décennies par les gouvernements européens – et d'une réconciliation des organismes de recherche et de l'université.

À n'en pas douter, la recherche s'inscrit dans la durée. La programmation pluriannuelle paraît donc hautement souhaitable. Et comment ne pas se réjouir d'un accroissement des ressources dont les laboratoires ont tant besoin, de la préservation de la liberté dans le choix des sujets, et de la conservation d'une recherche fondamentale à côté d'une autre plus technologique et plus appliquée, ouverte à tous les partenariats? Au reste, le rapprochement de l'université et des organismes de recherche ne peut qu'être profitable à tous. Il y aurait donc tout lieu d'être satisfait des annonces.



Les travaux sur les coronavirus se sont raréfiés dès 2005, faute de financements”

Pourtant, avant même qu'un texte, même préliminaire, de la loi en gestation n'ait paru, de nombreuses personnalités du monde de la recherche ont manifesté leurs inquiétudes au vu des rapports de préfiguration publiés sur le site du ministère, ainsi que d'annonces publiques, dont certaines ont suscité l'émoi. Je me propose ici de leur emboîter le pas, à la lumière des réflexions du Comets, le comité d'éthique du CNRS, sur l'intégrité scientifique, afin de contribuer au débat et, ce faisant, de répondre à l'invitation faite par le gouvernement à tous les acteurs de la recherche.

Premier point, il convient de s'assurer que la LPPR mérite bien son nom et finance

des recherches à long terme sur des sujets variés, sans sacrifier aux effets de mode. On se souviendra que des travaux sur les coronavirus amorcés lors de l'épidémie de Sras en 2003 se sont considérablement raréfiés dès 2005, faute de financements, nous laissant démunis aujourd'hui. Plus généralement, il faudrait que la LPPR ne conduise pas à une concentration exclusive des financements sur les sujets « chauds ».

EN DEUXIÈME LIEU, si l'émulation stimule la créativité, comment ne pas craindre qu'une compétition trop farouche, pour des ressources trop rares, n'incite les chercheurs aux abois à des méconduites scientifiques (plagiat, falsification de données...). Sans doute y a-t-il toujours eu des comportements déviants et la loi n'en est pas responsable. Mais la faiblesse du nombre de postes proposés aux concours et de situations stables conduirait certains à toutes les extrémités.

Enfin, à l'heure où l'on constate l'importance cruciale de la science pour l'économie, il faut attirer les meilleurs talents vers les métiers de la recherche, sans les soumettre à des injonctions contradictoires : publier plus, avoir davantage de contacts avec le monde socio-économique, s'affranchir de tout lien d'intérêts... L'éthique devrait conduire à prendre en considération tous ces éléments dans la rédaction de la LPPR, en faisant en sorte que la lettre de la loi se conforme à l'esprit des discours qui l'ont précédée. ■

Jean-Gabriel Ganascia est professeur d'informatique à Sorbonne Université. Il préside le comité d'éthique du CNRS (Comets). Les vues exprimées dans cette chronique n'engagent que leur auteur.

MYSTÉRIEUSE BIRMANIE

Mandalay, golfe du Bengale, temples de Bagan... il y a des noms qui font instantanément rêver. Sans même évoquer la vallée des rubis, célèbre titre de Joseph Kessel, aussi bien journaliste qu'aventurier qui raconta les richesses de Mogok, ville toute empreinte de légendes.

Le voyage proposé aujourd'hui au Myanmar par Sciences et Avenir invite à la découverte de ce pays mieux connu de beaucoup sous le nom de Birmanie, qui paraît toujours aussi mystérieux.

Parce qu'il est synonyme de pierres précieuses - aussi bien saphirs que rubis ! - de jade et autres pierres fines, il nous fallait, pour le décrypter, un spécialiste incontestable du domaine. Ce sera le cas, avec Didier Giard, membre de l'Académie des Sciences d'Outre-Mer et Président de l'Association Française de Gemmologie, fin connaisseur de géopolitique, qui replacera pour nous l'importance du pays dans l'Asean (association des nations de l'Asie du sud-est) et sur les nouvelles routes de la Soie. Ce sont à la fois la découverte de sites somptueux et la compréhension du monde d'aujourd'hui qui vous sont proposées. Un merveilleux voyage en perspective.

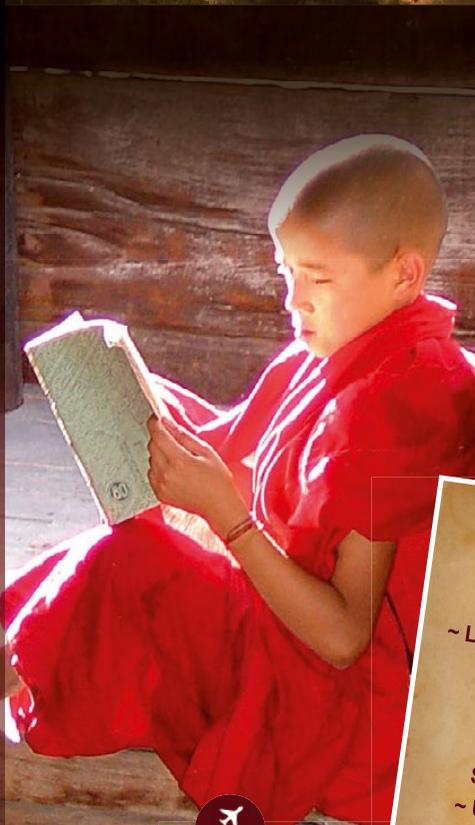


Dr Dominique LEGLU
Directrice de la rédaction
de Sciences et Avenir



**AVEC VOUS À BORD !
DIDIER GIARD**
Conférencier

Didier Giard est membre titulaire de l'Académie des Sciences d'Outre-Mer où il occupe le siège de l'ancien ambassadeur André Lewin et est membre de la prestigieuse Société des Explorateurs Français créée en 1937 par Paul-Emile Victor.



LES EXPÉDITIONS

SCIENCES
ET
AVENIR

CROISIÈRE EN BIRMANIE

FESTIVAL DU
PHAUNG DAW OO
AU LAC INLE

14 JOURS / 11 NUITS
DU 14 AU 27 OCT. 2020
A BORD DU PANDAW II

LES POINTS FORTS

- ~ UN CONFÉRENCIER DE TRÈS HAUT NIVEAU SPÉCIALISTE DE LA BIRMANIE.
- ~ LES VISITES DES PLUS BEAUX SITES DE LA BIRMANIE.
- ~ UNE DES MEILLEURES PÉRIODES DE L'ANNÉE.
- ~ LE GRAND MOMENT DE VOTRE CROISIÈRE, LE FESTIVAL DES BATEAUX PAGODES SUR LE LAC INLE, C'EST L'UN DES PLUS BEAUX SPECTACLES AQUATIQUES D'ASIE DU SUD-EST.
- ~ UN PETIT PAQUEBOT CONVIVAL DE 20 CABINES POUR 40 PRIVILÉGIÉS.
- ~ UN TOUT COMPRIS BLEU VOYAGES (excursions, boissons à table, etc...)
- ~ UN ACCOMPAGNEMENT FRANCOPHONE.

À PARTIR DE

3 700 €/PERS.

Au départ de Paris - En tout inclus

RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS :
BLEU VOYAGES

213 rue de Gerland - Bat 2 - 69007 LYON

TÉL. 04 72 76 75 66

www.expeditions-sciencesetavenir.fr

Bleu Voyages

Neige et Soleil Voyages SAS au capital de 396 800 • RC Bourgoin Jallieu B 398 629 766 •
Code APE 7911 Z • Immatriculation Atout France 038110038 • Agence garantie par l'APST • 15
Avenue Carnot - 75017 Paris • Agence assurée pour sa responsabilité civile et professionnelle
par le groupe MMA Entreprises n° de contrat 144569079.



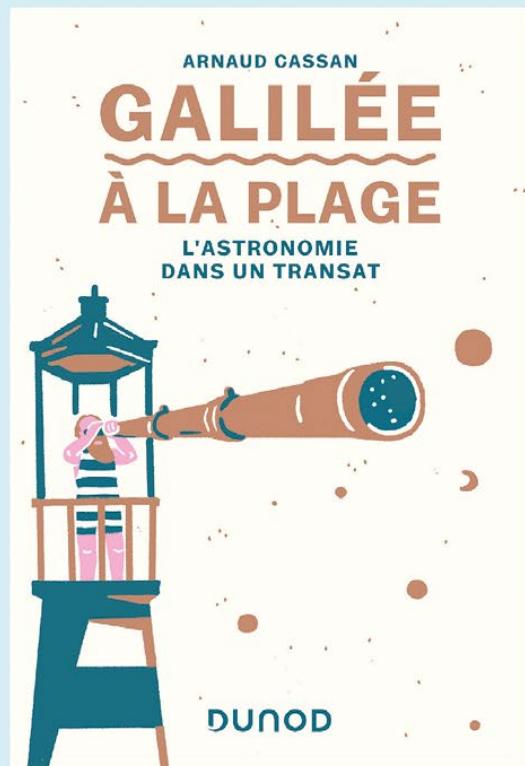
© Conception: www.pascalien.com - Crédits photos: Wikimedia / Michael Guillemer CC BY-SA 4.0 - Pixabay - CC0

À LA PLAGE

DEUX NOUVEAUTÉS EN LIBRAIRIE LE 10 JUIN



9782100795550

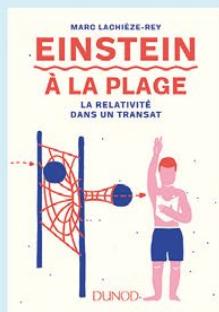


9782100795574

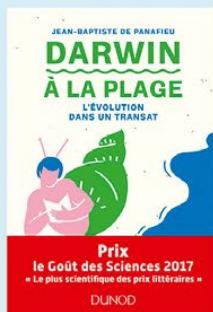
DANS LA MÊME COLLECTION



9782100772896



9782100763399



9782100758593

Le Tote Bag
À LA PLAGE
OFFERT
EN LIBRAIRIE

pour l'achat d'un livre
de la collection*

*Dans la limite des stocks disponibles



PRIX UNITAIRE : 15,90€

DUNOD
une page d'avance