

Pour la **HORS-SÉRIE** Science

La science expliquée par ceux qui la font

n° 121 - 11.23/12.23

L 13264 - 121 H - F: 9,90 € - RD



« Nous allons dans la bonne direction, mais pas assez vite »

Laura Cozzi
Directrice à l'Agence internationale de l'énergie



QUELLES ÉNERGIES POUR DEMAIN ?

SMR, fusion... le nucléaire en transition

L'hydrogène doit passer au vert

Une centrale solaire... dans l'espace ?

Énergies marines: un potentiel vaste comme l'océan

ÇA FAIT DU BIEN DE TOURNER LA PAGE

INFORMER. DIVERTIR. APPROFONDIR.

PRIX RELAY-SEPM DES MAGAZINES DE L'ANNÉE 2023

RELAY. **sepm**

SYNDICAT
DES ÉDITEURS
DE LA PRESSE
MAGAZINE



LES MAGAZINES
DE L'ANNÉE
2023

Découvrez chez RELAY les **magazines** de l'année.

La vie réelle

par **Loïc Mangin**
Rédacteur en chef adjoint
à *Pour la Science*

14 septembre 2019: dans une tribune, 300 chercheurs affirmaient que « le temps est venu d'abandonner les énergies fossiles et de faire un choix résolu en faveur des sources d'énergie bas carbone. » C'est un exemple d'une longue série d'appels et de rapports invitant à modifier radicalement le paysage énergétique.

Mais comment faire ?

De quels moyens dispose-t-on ?

Entre les décisions politiques d'en haut et nos changements de comportements, en bas, les chercheurs s'activent pour dessiner les contours d'un nouveau monde énergétique plus vertueux.

Les pistes sont nombreuses: batteries plus performantes, essor d'un nucléaire remodelé, développement de l'hydrogène, meilleure efficacité dans l'exploitation des sources renouvelables... Ce numéro le montre, ce n'est qu'en les suivant toutes, de front, que l'on peut espérer l'instauration rapide d'un mix énergétique compatible avec le maintien d'une certaine habitabilité de la Terre (pour les humains), d'une «vie réelle» plus clémente que celle annoncée.

Ont contribué à ce numéro



Alain Bécoulet

Ancien directeur de l'Institut de recherche sur la fusion par confinement magnétique au CEA et responsable scientifique du projet *Iter* depuis juin 2023.



Laura Cozzi

Directrice de la technologie et des perspectives à l'Agence internationale de l'énergie (AIE), à Paris.



Marc-Antoine Eyl-Mazzega

Directeur du centre Énergie et climat de l'Institut français des relations internationales (Ifri), à Paris.



Jean-Marie Tarascon

Professeur au Collège de France, et membre de l'Académie des sciences. Il a reçu la médaille d'or du CNRS en 2022.

Quelles énergies pour demain ?

01

La fin des fossiles ?

p. 6 Repères

Des schémas, des chiffres, des définitions: toutes les clés pour entrer sereinement dans ce numéro.

p. 8 Grand témoin

Laura Cozzi

4



D'ici à 2030, le monde devra avoir une puissance installée en énergie renouvelable trois fois supérieure à l'actuelle

p. 16 Une transition en trompe-l'œil

Jean-Baptiste Fresso

On ne peut pas compter sur une transition énergétique.

p. 22 « Le pic de la production pétrolière est hypothétique »

ENTRETIEN avec
Marc-Antoine Eyl-Mazzega

p. 26 Reconvertir nos usines à gaz

Michael Webber

Et si on utilisait les gazoducs pour de l'hydrogène ?

p. 34 Les promesses colorées de l'hydrogène

Davide Castelvecchi

À condition de devenir vert, l'hydrogène a de l'avenir.

02

L'avenir des renouvelables

- p. 44** Photovoltaïque: la fin du silicium?
V. Sivaram, S. Stranks et H. Snaith
La pérovskite, un matériau idéal pour les panneaux solaires.
- p. 52** Le solaire prend de la hauteur
Leonard David
À quand des centrales solaires spatiales autour de la Lune?
- p. 58** «Le futur des éoliennes?»
ENTRETIEN avec François Cauneau
- p. 64** Un océan d'énergie
Olivier Voizeux
Le potentiel des énergies marines renouvelables est infini.
- p. 70** Quelles batteries pour demain?
Jean-Marie Tarascon
Aller au-delà des batteries Li-ion actuelles.



p. 109 Rendez-vous

- 110 En image
- 112 Rebondissements
- 116 Infographie
- 118 Incontournables

03

Une nouvelle ère du nucléaire

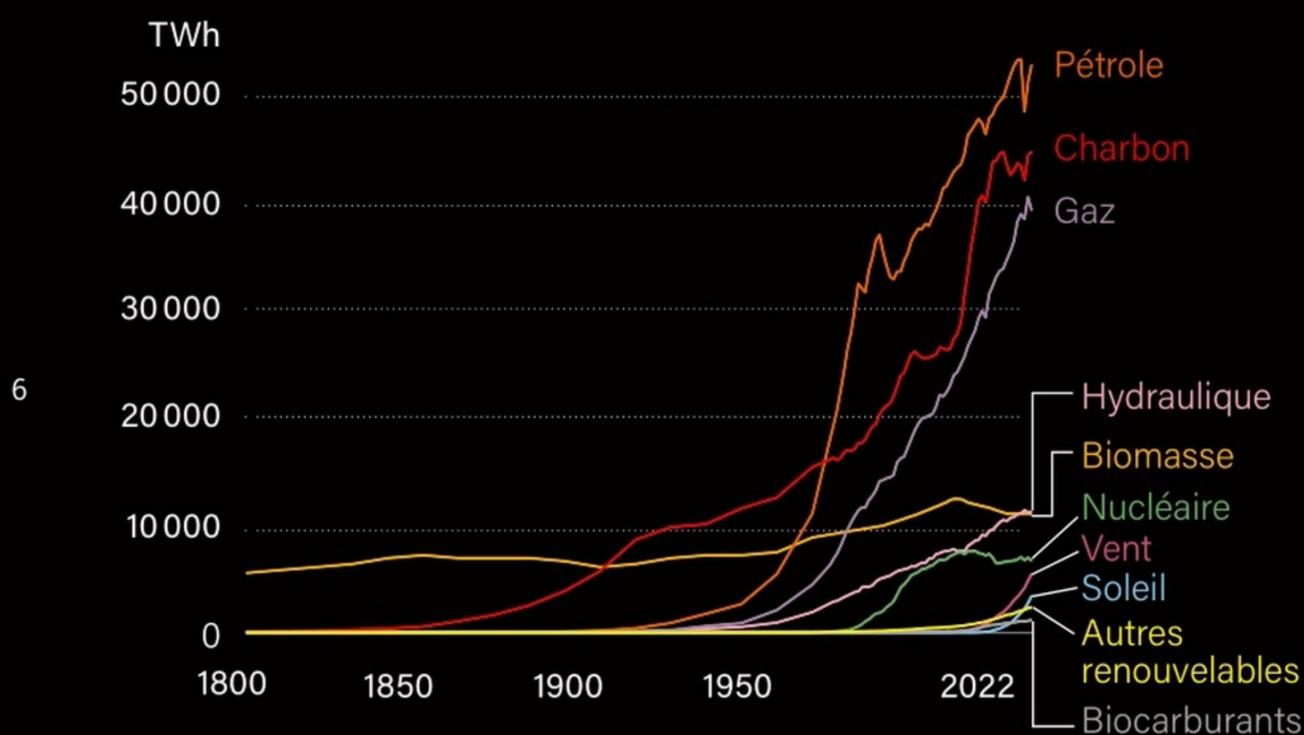
- p. 82** Le nucléaire à la croisée des chemins
S. David, S. Bouneau et A. Bidaud
Le nucléaire peut-il s'affranchir des ressources en uranium?
- p. 92** Fusion: un géant et ses avatars
PORTFOLIO
- p. 98** «Avec Iter, nous touchons au but»
ENTRETIEN avec Alain Bécoulet
- p. 104** Du nucléaire de poche
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik
À quand des petits réacteurs nucléaires modulaires?



FAIRE LE PLEIN D'ÉNERGIE...

Derrière ce terme en apparence passe-partout se cache une physique complexe. Un kit de survie s'impose.

Consommation d'énergie primaire depuis 1800



Toujours plus

Jusque vers les années 1750, le système énergétique se superposait au système agroforestier. Si l'on exclut les moulins et de rares filons superficiels de charbon, nos ancêtres n'utilisaient qu'une source unique d'énergie : la biomasse. Ils en disposaient directement, en brûlant du bois pour se chauffer et cuisiner (... ce que 2 milliards d'humains continuent de faire chaque jour). La révolution industrielle modifia

le cours de l'histoire en donnant une finalité au charbon enfoui dans le sous-sol. Le système énergétique prit alors son autonomie par rapport au système agroforestier, avec l'utilisation croissante d'énergies fossiles, puis une envolée presque exponentielle de ces dernières à partir des années 1950. Bien que la production d'électricité ait elle aussi fortement augmenté, elle reste très minoritaire dans le mix énergétique mondial.

LES MOTS POUR LE DIRE

> **Énergie** : entré dans le vocabulaire de la physique au XVIII^e siècle, ce mot n'a pris son sens contemporain qu'au XIX^e siècle, quand fut établi le principe de sa conservation. L'énergie est une grandeur qu'on ne connaît, à un instant T, que sous l'une des formes qu'elle peut prendre. Quand deux systèmes interagissent, ils ne font qu'échanger de l'énergie. *Stricto sensu*, il n'y a donc jamais production (même si nous ne cessons d'employer ce terme) mais toujours transformation ou transfert. On distingue les **énergies de stock** comme les minerais ou les huiles, localisées dans le sous-sol sous forme de réserves, et les **énergies de flux** – celles du vent, du Soleil, de la mer... – dont la majorité sont renouvelables.

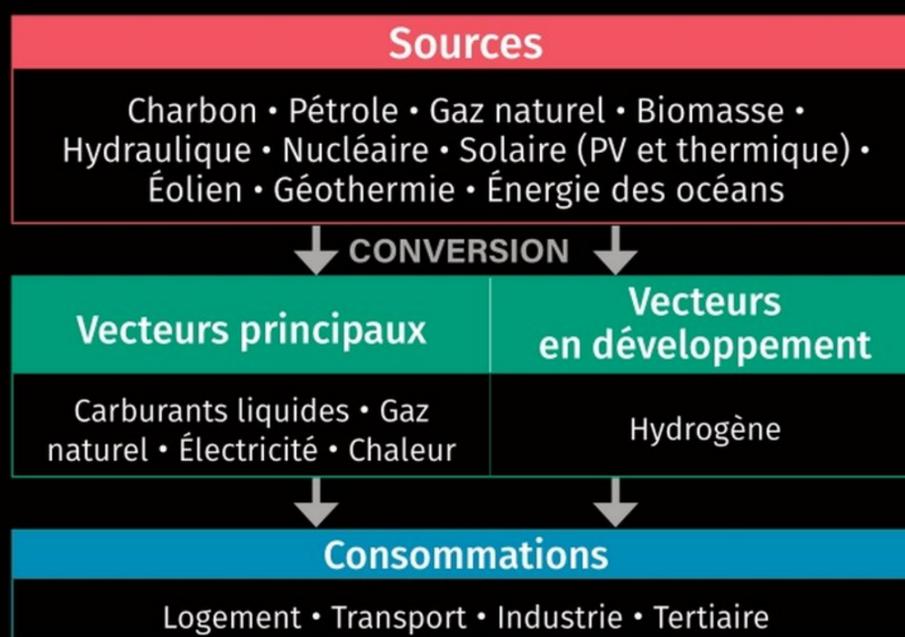
> **L'énergie primaire** est la somme des approvisionnements fournis par toutes les sources d'énergie (*voir page ci-contre*) avant toute transformation.

> **L'énergie de transformation** est celle dépensée pour convertir des sources en vecteurs (*voir page ci-contre*) énergétiques.

> **L'énergie finale** est celle qui arrive, après transformation et transport, aux utilisateurs finaux (vous, un chauffeur routier, une cimenterie...)

Le système énergétique actuel

Les **sources d'énergie**, ou énergies primaires, se répartissent en neuf catégories – dix si l'on y ajoute les énergies marines renouvelables. Elles sont le plus souvent utilisables par les humains après conversion en **vecteurs énergétiques**, aussi appelés « énergies secondaires ». Cette phase de transformation concerne le raffinage pour le pétrole, la purification pour le gaz naturel, le vaporeformage pour l'hydrogène... La **consommation** de l'énergie finale peut être répartie en quatre grands secteurs.

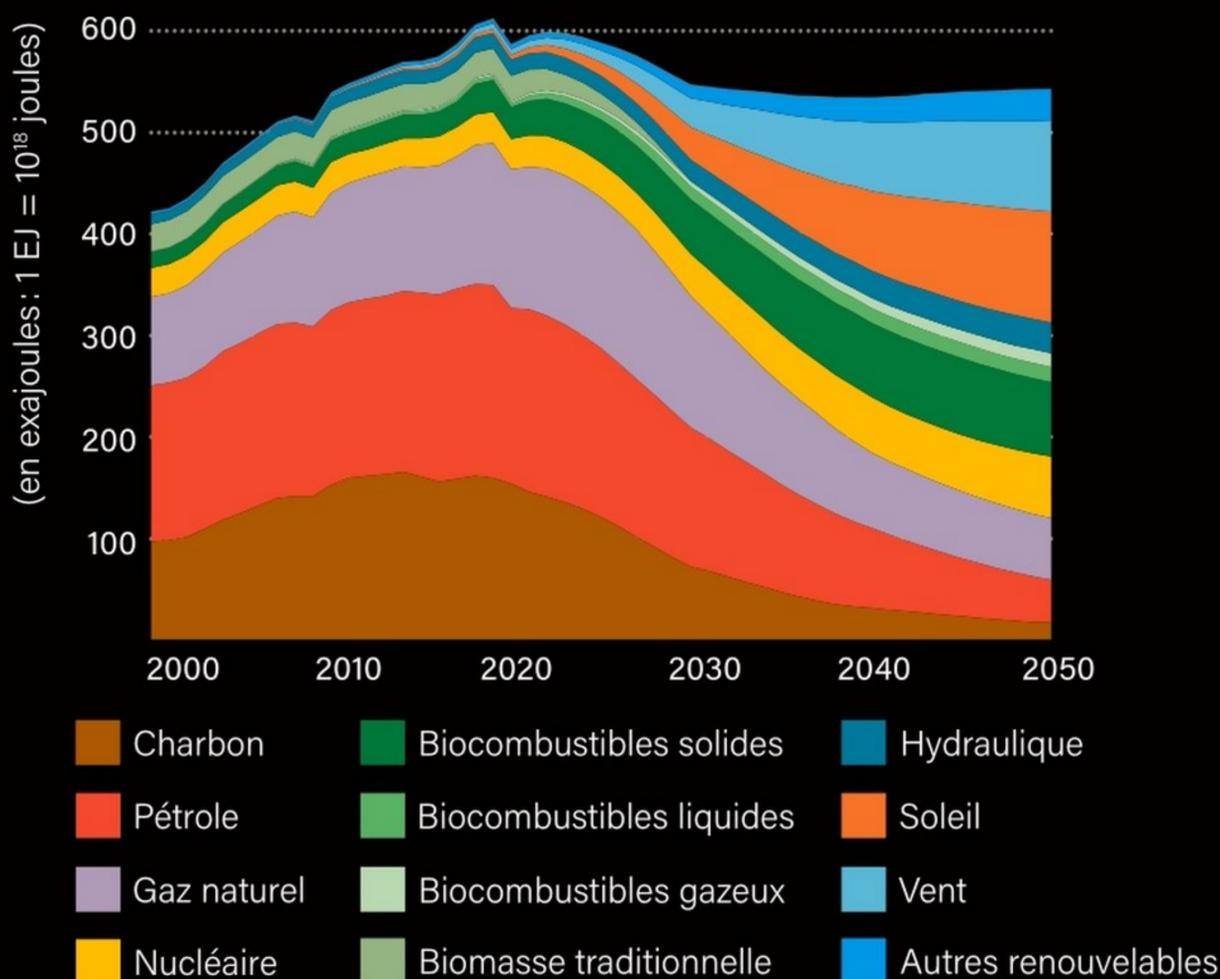


Puissance de quelques systèmes de production électrique

Panneau photovoltaïque sur un toit	3 à 9 kW	Centrale à gaz	400 à 600 MW
Petite éolienne	1 à 2 MW	Une tranche de centrale nucléaire en France	900 à 1450 MW
Grande éolienne en mer	7,5 à 13 MW	Barrage des Trois-Gorges (Chine)	18,2 GW
Usine marémotrice de la Rance	240 MW	Parc nucléaire français	63 GW

(en multiples du watt : kilowatt, kW = 1000 W ; mégawatt, MW = 1000 kW ; gigawatt, GW = 1000 MW)

Scénario « zéro émission nette »



Objectif 2050

En 2019, avant la pandémie de Covid-19, les deux tiers de l'énergie primaire produite dans le monde l'étaient sous forme fossile (40 % pour le seul pétrole). Dans son scénario NZE (*net-zero emissions*, « zéro émission nette » de gaz à effet de serre) pour 2050, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) prévoit que, pour contenir le réchauffement climatique autour de 1,5 °C, la production énergétique mondiale doit globalement baisser. Une forte décline du trio charbon-pétrole-gaz est nécessaire, compensée par une électrification massive à partir de sources renouvelables, notamment l'éolien et le solaire photovoltaïque. Un doublement de la part du nucléaire est envisagé.

A gauche : © Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023) ; Vaclav Smil (2017) OurWorldInData.org/energy, CC BY. A droite : © AIE / Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector

« L'électricité est une solution pour le futur, mais pas la seule »

8

Laura Cozzi
est directrice de la technologie
et des perspectives
à l'Agence internationale
de l'énergie



Un futur électrique se dessine. Sachant que la production d'électricité est responsable de 42 % des émissions de gaz à effet de serre, elle est aujourd'hui autant une solution qu'un problème. Comment décarboner ce secteur ?

Il n'y a pas assez de renouvelables dans la production électrique, c'est certain. Nous allons dans la bonne direction, mais pas assez vite: d'ici à 2030, le monde devra avoir une puissance installée en énergie renouvelable trois fois supérieure à l'actuelle. Cela dit, gardons en tête que si l'électricité est bien une solution pour le futur, elle n'est pas la seule. Elle représente désormais 20% de la consommation finale d'énergie et atteindrait 50% dans les scénarios de décarbonation les plus poussés de l'Agence internationale de l'énergie, alignés sur l'objectif d'une augmentation moyenne de la température de 1,5 °C. Dans les pays développés, la forte électrification d'une partie des transports et du chauffage domestique (avec les pompes à chaleur) s'observe déjà, en phase avec la décarbonation de la production électrique. Dans les grands pays émergents comme la Chine et l'Inde, la décarbonation a commencé aussi, mais une très grande partie de la production demeure dépendante du charbon. C'est en train de changer. Dans toutes les projections, y compris celles qui sont fondées

sur les politiques en cours, la part des renouvelables augmente de manière tellement forte qu'on atteindra un pic des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur électrique avant 2030.

La clé d'un futur électrique est-elle dans la capacité de stocker massivement l'électricité ?

Le stockage est un enjeu majeur, mais le premier reste la flexibilité, c'est-à-dire la possibilité de répondre en permanence à la demande. La stabilité du réseau électrique, à 50 Hz en Europe par exemple, est directement liée à l'équilibre entre la production et la consommation, et cela à chaque instant. Or la production des renouvelables varie, notamment avec la météo, sans rapport nécessaire avec les besoins. L'accroissement des capacités dans l'éolien et le photovoltaïque va donc conduire, d'ici à 2030, à des besoins en flexibilité deux à trois fois plus importants: afin d'éviter une rupture, les gestionnaires de réseaux devront savoir gérer cette situation pour assurer l'équilibre offre-demande en temps réel. Jusqu'à présent, la flexibilité était garantie par des centrales thermiques au gaz qui pallient l'intermittence des renouvelables, mais à mesure que la décarbonation avance, d'autres réponses devront être trouvées. Le stockage, sur des batteries

« Nous avons moins de trente ans pour parvenir à la neutralité carbone. Les solutions rapides, susceptibles d'être déployées à grande échelle, sont donc à privilégier »

10 géantes, par exemple, en est une. Encore faudra-t-il s'assurer de sa fiabilité dans la durée et à des coûts acceptables. La deuxième réponse passe par la numérisation des réseaux de distribution, afin de les gérer de façon plus intelligente. Ils devront être aussi bidirectionnels, c'est-à-dire capables de recevoir du courant non seulement de ceux qui produisent, mais aussi de ceux qui consomment, car ceux-ci produisent parfois. Quel intérêt? Cela m'amène à la troisième réponse: le pilotage intelligent de la demande, particulièrement de la recharge des véhicules électriques. Étant donné leur quantité de plus en plus considérable, ils constituent une source de stockage. Il est donc crucial qu'ils aient la possibilité de restituer une partie de cette électricité au réseau en cas de besoin. Le potentiel est très important.

De quoi seront faites les batteries de demain ?

Les batteries au lithium ont profité de progrès importants ces dernières années (voir *Quelles batteries pour demain?* par J.-M. Tarascon, page 70). On commence à voir apparaître des batteries au sodium, métal beaucoup plus abondant. Le facteur contraignant est devenu la présence de matériaux critiques comme le lithium. Désormais, les fabricants se soucient non seulement des performances, mais aussi de la disponibilité des matières premières. Une panoplie de chimies différentes est aujourd'hui testée afin de limiter l'exposition aux ruptures d'approvisionnement.

La France a privilégié la voie nucléaire, qui reste anecdotique à l'échelle de la planète (10 % de la production électrique mondiale). Est-ce un modèle à suivre pour lutter contre le réchauffement ?

Dans la révision majeure que nous conduisons de notre scénario «zéro émission pour 2050», aligné sur l'objectif de 1,5 °C, nous voyons la part du nucléaire dans le monde plus que doubler d'ici à 2050. La Chine en particulier investit de façon considérable et deviendra, d'ici à quelques années, la première puissance mondiale en nucléaire installé. Cette technologie a un potentiel pour décarboner et améliorer la flexibilité. Se passer du nucléaire dans ce scénario reviendrait à augmenter de manière significative le coût de la transition énergétique. Évidemment, tous les États ne sont pas contraints d'emprunter cette voie si leur politique intérieure ou les choix de leurs citoyens ne sont pas compatibles. Ils s'en sortiront sans. Néanmoins, l'invasion de l'Ukraine par la Russie a conduit plusieurs pays à se réintéresser au nucléaire – je pense notamment à la Belgique, qui avait fixé une échéance de sortie et qui l'a repoussée. L'accès au combustible n'étant pas un facteur limitant, la prolongation de la durée de vie des centrales est devenue un enjeu capital. Bien entendu, la question des déchets reste un défi clé. Sur la sécurité, on a vu très clairement qu'après l'accident de Fukushima les coûts de fabrication des centrales nucléaires ont augmenté partout pour rendre les équipements plus sûrs. On constate aussi un intérêt

pour les SMR, ou *Small Modular Reactors* (voir *Du nucléaire de poche*, par J.-M. Courty et É. Kierlik, page 104), des réacteurs plus petits, avec une meilleure sécurité intrinsèque. Ils seraient à même de satisfaire des besoins plus modestes, ou bien encore de permettre une cogénération d'électricité et de chaleur. De nombreux pays y voient un moyen d'avoir un nucléaire plus sûr.

Un autre nucléaire a-t-il encore le temps d'émerger ? Serait-il finançable ?

Nous avons moins de trente ans pour parvenir à la neutralité carbone. Les solutions rapides, susceptibles d'être déployées à grande échelle, sont donc à privilégier. On ne peut dès lors compter que sur le nucléaire tel qu'on le connaît aujourd'hui. Ce qui n'exclut pas d'autres formes pour plus tard – la fusion nucléaire sera peut-être le « nouveau pétrole » d'ici à la fin du siècle (voir *l'entretien avec A. Bécoulet*, page 98). Quant au financement, c'est devenu une question clé, en particulier dans les pays émergents. Si on regarde l'investissement dans les énergies « propres » au sens large, on voit que, depuis l'accord de Paris, les montants ont très fortement augmenté. À l'échelle du monde, pour 1 euro investi dans les énergies fossiles, 1,70 euro l'est dans les énergies propres (nous étions à 1 pour 1 il y a cinq ans)... Mais, dans les faits, cela concerne quasi exclusivement les pays riches et la Chine. En Afrique, en Inde, en Indonésie ou en Amérique latine, on investit peu dans cette voie-là. Ce n'est pas ainsi qu'on parviendra à l'objectif du 1,5 °C. Tous ces pays sont contraints de miser

sur des énergies qui ont un faible coût et mobilisent peu de capital.

En matière de transports, notre dépendance au pétrole est insoluble à court terme. Un substitut unique lui est-il envisageable ? Ou bien faut-il repenser entièrement notre façon de nous déplacer ?

Pour le transport individuel, qui représente 20 à 25% de la demande mondiale en pétrole, le véhicule électrique prend une place croissante. En 2021, ce segment pesait 5% des ventes automobiles contre 14% deux ans plus tard. Tous les constructeurs disposent désormais d'une offre très claire. Les transports en bus ont également pris le chemin de l'électrification. Ce ne sera pas le cas partout. Pour le secteur aérien, on verra peut-être émerger les biocarburants comme réponse, avec des niches pour l'hydrogène. Pour le transport maritime, l'hydrogène paraît actuellement la voie la plus avancée. Rien n'est joué, mais on peut déjà prédire qu'il n'y aura pas de solution unique.

L'hydrogène propre suscite de gros espoirs, mais il est encore cher à produire et gourmand en énergie. Les gisements naturels d'hydrogène, dont on réévalue l'importance à la hausse, peuvent-ils changer la donne ?

C'est possible, mais les données sont très récentes. L'Agence internationale de l'énergie suit

ça de très près. Pour l'instant, la fabrication d'hydrogène passe à 95% par des combustibles fossiles, le plus souvent du méthane (voir *Les promesses colorées de l'hydrogène*, par D. Castelvecchi, page 34). Dans le futur, on voit déjà qu'en mer du Nord les exploitants auront intérêt à utiliser l'éolien offshore pour produire de l'hydrogène par électrolyse – la voie la plus propre. Dans les pays de l'hémisphère Sud, très ensoleillés, on peut imaginer une production combinée d'électricité d'origine photovoltaïque et d'hydrogène. La part de ce dernier issue du méthane sera sans doute encore inévitable, mais on peut espérer qu'il sera couplé avec une capture et une séquestration du carbone. Néanmoins, ce gaz ne sera jamais la solution miracle: il satisfait aujourd'hui moins de 0,1% de la demande mondiale en énergie. Dans un scénario à 1,5 °C, on parvient à 10%, guère plus!

La sobriété est souvent invoquée, mais comment y croire quand la demande en énergie ne cesse de croître ?

C'est vrai à l'échelle mondiale, mais, pays par pays, vous noterez des différences. Dans les pays riches, la demande en énergie a vécu un pic en 2007 – et dès 2005 en France. Depuis, au cas par cas, elle stagne ou décroît. Mais le souci de sobriété doit s'articuler avec celui de l'équité. Globalement, les 10% d'individus les plus riches étaient responsables de la moitié des émissions mondiales de CO₂ liées à l'énergie... contre 0,2% pour les 10% les plus pauvres. À l'intérieur de chaque pays, on voit aussi les inégalités

s'accroître en fonction du niveau de revenu. C'est cela qu'il faut rééquilibrer. La sobriété est importante, mais elle ne peut être synonyme d'appauvrissement. Nous devons utiliser l'énergie de façon plus rationnelle. Entre août 2022 et janvier 2023, en raison des effets de la guerre en Ukraine sur les marchés, l'Union européenne a su diminuer sa demande d'énergie d'environ 19%: ce fut un vrai test de sobriété énergétique! Dans notre scénario à 1,5 °C, environ 5% de la réduction des émissions proviennent de la sobriété mise en place, de façon voulue et non subie, dans les pays riches. L'utilisation de la visioconférence à la place d'une partie des rencontres physiques permet, par exemple, ce genre d'économie.

Pour prévenir l'emballement climatique, faut-il davantage de centralisation ou, à l'inverse, multiplier les sources au plus près des consommateurs ?

Cela dépend complètement des pays concernés. En Afrique, l'électricité produite par des fermes solaires, puis distribuée, occupera une part prépondérante parce que son coût, le moins élevé aujourd'hui, est adapté au niveau de développement. En Europe, l'énergie va rester en grande partie centralisée – je pense par exemple à la production nucléaire française, ou bien à l'éolien offshore en Europe du Nord, bien

“L'HYDROGÈNE NE SERA JAMAIS LA SOLUTION MIRACLE: IL SATISFAIT AUJOURD'HUI MOINS DE 0,1% DE LA DEMANDE MONDIALE EN ÉNERGIE. DANS UN SCÉNARIO OÙ L'ON PARVIENT À CONTENIR LE RÉCHAUFFEMENT À 1,5 °C, CETTE PART MONTE À 10%, GUÈRE PLUS!”

que des solutions distribuées comme le photovoltaïque sur toiture se développent très fortement. C'est précisément parce que ces deux modes vont cohabiter que la flexibilité des réseaux sera si vitale.

Comment les questions d'énergie vont-elles peser sur les rapports Nord-Sud au XXI^e siècle ?

Les difficultés d'approvisionnement pétrolier et gazier ne vont pas disparaître comme par enchantement, elles continueront de modeler les relations internationales. Deux autres axes seront stratégiques pour définir les rapports entre États. Le premier concerne les matériaux critiques comme le lithium, le cuivre, le cobalt et bien d'autres. Le second, les chaînes d'approvisionnement des technologies propres comme les panneaux photovoltaïques, les véhicules électriques, les batteries... L'intérêt d'avoir une production domestique est de plus en plus évident, mais aucun pays n'a la capacité de devenir une «île énergétique», le commerce va continuer à fleurir et surtout à évoluer: de moins en moins de combustibles fossiles, de plus en plus de matériaux critiques et de technologies clés utiles aux renouvelables. Il faut aussi s'attendre à plus de spécialisation régionale – j'ai déjà mentionné la vocation de la mer du Nord à devenir un nœud pour l'éolien et l'hydrogène. Pour les pays dont la richesse repose aujourd'hui sur une ressource unique comme le pétrole ou le gaz, la diversification sera indispensable. L'hydrogène et ses dérivés peuvent alors s'avérer une opportunité.

Vous avez évoqué à plusieurs reprises un scénario «zéro émission» de l'Agence internationale de l'énergie pour 2050. Les États y souscrivent-ils ?

Ce scénario a été proposé pour la première fois en 2021, et nous sommes en train de le mettre à jour. En effet, deux phénomènes divergents ont été constatés. D'abord, un maintien d'investissements forts dans les énergies fossiles, autrement dit dans la mauvaise direction. Mais aussi une production d'électricité d'origine solaire et éolienne, ainsi que de véhicules électriques, augmentant dans des proportions jamais vues jusque-là. L'Agence internationale de l'énergie œuvre avec un grand nombre de pays pour adapter ce scénario global à leur réalité. C'est notamment devenu un atout pour engager des relations avec les pays émergents. Avec l'Indonésie, nous avons ainsi signé en novembre 2022 le Just Energy Transition Partnership. Cet accord a permis à ce pays d'avoir accès à 20 milliards d'euros versés par la communauté internationale pour diminuer sa consommation de charbon et augmenter la part de ses renouvelables dans son mix énergétique. Ce n'est pas rien!

Propos recueillis par Olivier Voizeux

La fin des fossiles ?

Aux yeux de la physique, le pétrole est une merveille. Liquide à température et pression ambiantes, donc facile à transporter, il est très dense en énergie, plus que la houille ou le gaz naturel. Capable d'animer toutes les machines, il a changé le cours de l'humanité, pour le meilleur et désormais pour le pire. Car ses émissions de CO₂, ajoutées à celles des autres sources fossiles, poussent désormais le climat vers des zones de non-retour. Comment s'en passer, alors qu'il ne semble pas près de s'épuiser, et espérer une possible transition ? En le remplaçant par un autre prodige, nommé « hydrogène » ? Ce serait illusoire : ce gaz, si abondant dans l'univers et pourtant si rare sur Terre, ne sera jamais qu'une ressource secondaire. Mais, pour nos activités les plus difficiles à décarboner, il a le potentiel pour se révéler providentiel... à condition d'être fabriqué « proprement ».



01

La transition énergétique n'a jamais eu lieu. Plutôt que de remplacer une source par une autre, l'humanité les additionne. Et c'est tout aussi vrai des matières premières.

Une **transition** en trompe-l'œil

Jean-Baptiste Fressoz

Depuis 2012, les centrales électriques de l'entreprise Drax, au Royaume-Uni, se passent de charbon au profit du bois. Leurs granulés sont embarqués dans le port de Prince Rupert, au Canada. Même les sources d'énergie millénaires ont de l'avenir...



Nombreuses sont les injonctions à amorcer une transition pour sortir de la crise environnementale majeure que connaît le monde aujourd'hui. Mais l'expression « crise environnementale » induit en erreur en suggérant que l'épreuve est brève et l'issue imminente. De ce point de vue, le concept d'anthropocène est plus approprié, car il souligne le caractère irréversible des phénomènes biogéochimiques planétaires enclenchés par les activités humaines.

On pourrait croire que, forts de cette prise de conscience, à coups d'innovations et de transitions énergétiques ou matérielles, nous avons effectivement ébauché un changement. Mais est-ce bien le cas ? L'observation historique des systèmes techniques et des flux de matières montre que rien n'est moins sûr.

Pour étudier l'histoire matérielle, on dispose de travaux issus de l'école viennoise de l'analyse des flux de matière. Cette approche très dynamique depuis les années 1990 consiste à utiliser les statistiques douanières, minérales et agricoles pour établir les quantités de minéraux extraits du sous-sol, la biomasse récoltée, les importations et les exportations comptabilisées en poids.

Prenons le cas de l'énergie, évidemment crucial pour le climat. L'histoire est celle d'additions et non de transitions. La grande époque du charbon n'est pas le XIX^e siècle, mais la nôtre. Et malgré les annonces de pic du pétrole, la consommation de l'or noir n'a fait pour l'instant que croître. Celle de biomasse (bois, matières agricoles) a, quant à elle, doublé entre 1900 et 2000 : en 1910, les humains consommaient 13% de toute la biomasse produite

En bref

> Depuis un siècle, les nouvelles techniques de production d'énergie ne se sont pas substituées aux anciennes, mais elles s'y sont ajoutées.

> De même, l'éventail des matières premières utilisées s'élargit et leur consommation augmente.

> Les transitions énergétiques et matérielles invoquées pour lutter contre le changement climatique n'ont encore jamais eu lieu.

et cette part est passée à 25% en 2005. Les guerres, les crises économiques ou les pandémies ne dessinent en général qu'une petite encoche dans une courbe de consommation matérielle globale toujours ascendante depuis au moins un siècle.

LES MATIÈRES PREMIÈRES NE SONT JAMAIS OBSOLÈTES

De la même manière, entre 1900 et 2015, le poids total des matières premières consommées par l'économie mondiale a été multiplié par 12 (*voir la figure page ci-contre*). Depuis la Seconde Guerre mondiale, malgré les efforts des industriels pour limiter les pertes et exploiter plus efficacement les matières produites, et malgré la prolifération des produits de synthèse (plastiques, etc.), aucune grande matière première n'a décliné hormis la laine de mouton, qui recule face aux fibres synthétiques, ce qui n'est, d'ailleurs, pas une bonne nouvelle pour l'environnement. Entre 1960 et 2010, sur les 69 principales matières premières, seules 6 ont vu leur consommation mondiale régresser. Et pour 5 d'entre elles (amiante, mercure, béryllium, tellure et thallium), cette décroissance était due à leur toxicité et à des interdictions nationales.

De fait, depuis un siècle, croissance et innovation n'ont encore jamais produit de substitution à l'échelle globale. L'éventail des matières premières utilisées s'est élargi et chacune est consommée en quantités grandissantes. On assiste même depuis 2002 à une nouvelle accélération de la consommation matérielle mondiale, bien plus

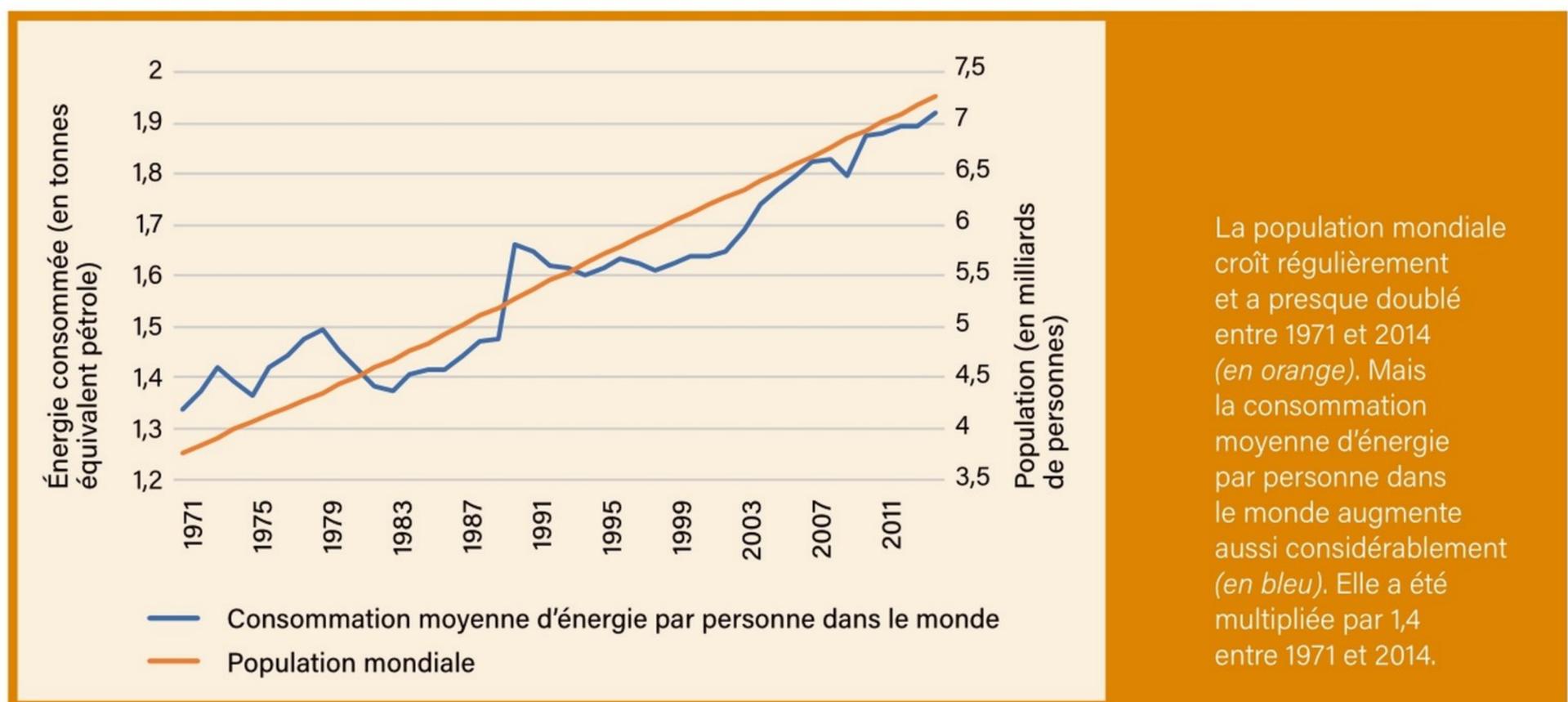
**LA GRANDE ÉPOQUE DU CHARBON
N'EST PAS LE XIX^e SIÈCLE,
MAIS LA NÔTRE. ET MALGRÉ
LES ANNONCES DE PIC
DU PÉTROLE, LA CONSOMMATION
DE L'OR NOIR N'A FAIT POUR
L'INSTANT QUE CROÎTRE**

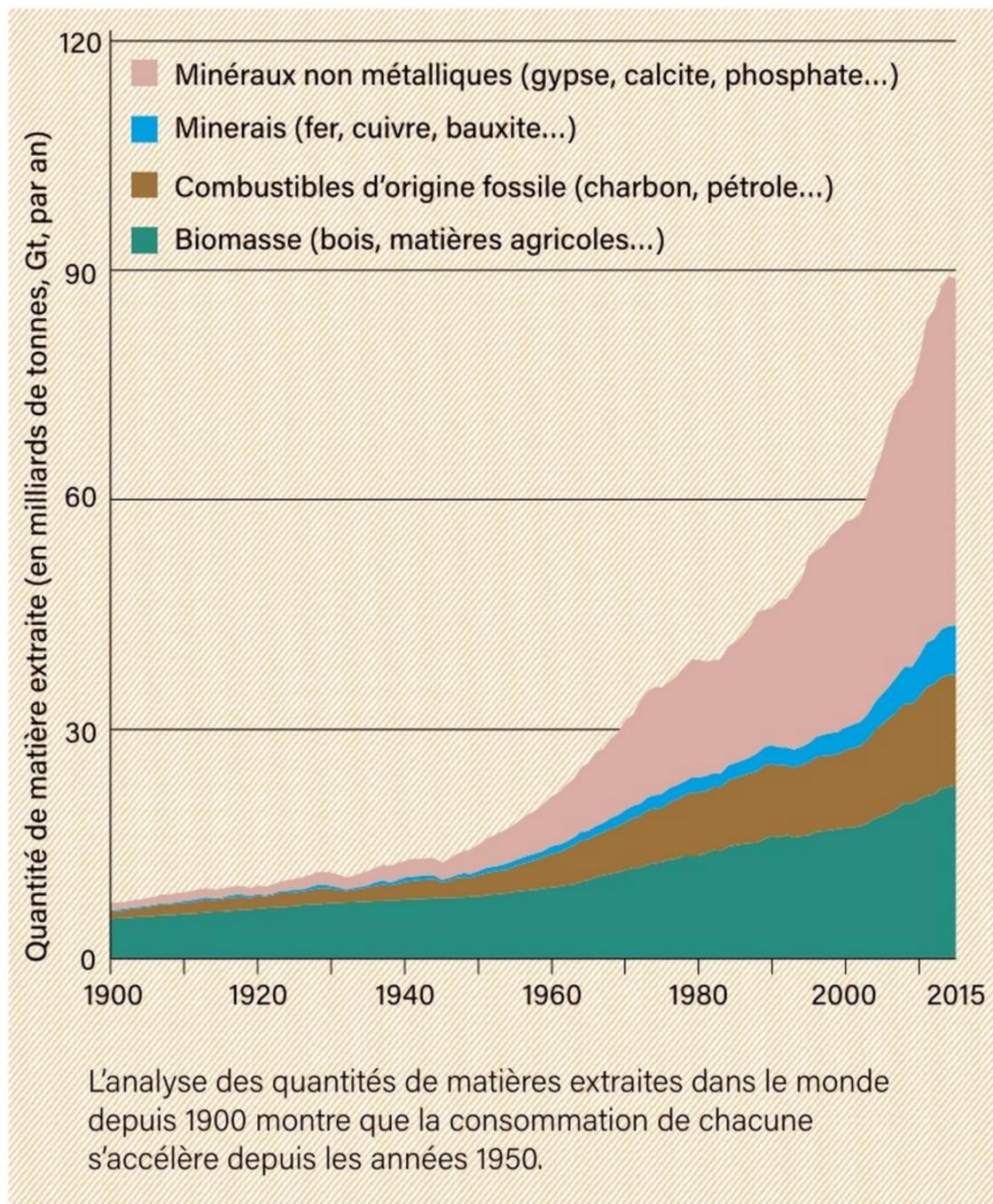
forte que la fameuse «grande accélération» des années 1950: entre 2002 et 2015, cette consommation a crû de 53% et on a extrait 1000 gigatonnes de matières du sol, soit un tiers de tout ce qui avait été extrait depuis 1900.

Le plus frappant dans l'histoire matérielle est sa dimension strictement cumulative: les matières premières ne deviennent jamais obsolètes. Prenons l'exemple de la construction, qui pèse très lourd dans la masse des matières consommées. Les constructions dans lesquelles vit l'humanité sont récentes. Aux États-Unis, 90% des habitations ont été bâties après 1945 et l'ancien continent est presque aussi neuf puisque 8 logements sur 10 datent de l'après-guerre. La proportion est encore plus forte dans les pays pauvres ou anciennement pauvres: en Chine, la quasi-totalité des logements a moins de cinquante ans. Ce monde bâti à neuf repose sur une matière clé: le béton, dont la consommation est passée de 0,5 à 20 gigatonnes par an entre 1945 et aujourd'hui. Mais il s'appuie aussi sur des matières «anciennes»: les quantités utilisées de tous les matériaux de construction, y compris les briques et le bois, croissent dans la même période.

Comment expliquer ce phénomène fondamental? Outre les interprétations classiques ayant trait à la croissance de la population et de

© Pour la Science - sources: IEA Statistics © OECD/IEA 2014, <https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.PCAP.KG.OE> (énergie); The World Bank (CC-BY-4.0), <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL> (population)





l'économie (voir la figure page précédente), cinq phénomènes majeurs caractérisent la dynamique d'accumulation matérielle de l'humanité. Premièrement, l'ancien persiste, en particulier dans les pays économiquement faibles. Le bois, par exemple, reste la première source d'énergie « renouvelable » dans le monde pauvre : 3 milliards de personnes, qui sont aussi les principales victimes de la pollution atmosphérique, brûlent du bois pour leur cuisine et leur chauffage. L'urbanisation en Afrique n'a pas conduit à une disparition du bois-énergie, mais à une substitution du bois vers le charbon de bois, dont la consommation a été multipliée par 6 entre 1960 et 2010. Le bois-énergie garde aussi une place importante dans certains pays riches. Ainsi, la centrale électrique de Drax, non loin de Leeds,

en Angleterre, consomme 8,5 millions de tonnes de bois par an provenant de diverses régions du monde, dont 7 millions importées d'Amérique du Nord, soit plus de deux fois ce que la Grande-Bretagne brûlait au XVIII^e siècle.

DU BOIS DONT ON FAIT LES MINES

À cela s'ajoute un deuxième phénomène, celui des « symbioses » entre sources énergétiques. Par exemple, contrairement aux récits trop simples de la révolution industrielle comme une transition du bois vers le charbon, la consommation de bois n'a fait que croître au XIX^e siècle. Celle de l'Angleterre, championne du charbon, a été multipliée par 6 entre 1830 et 1930. De façon assez étonnante, au début du XX^e siècle, l'Angleterre consommait davantage de bois pour soutenir les galeries des mines de charbon qu'elle n'en brûlait un siècle auparavant. Ce phénomène est notable dans tous les grands pays industriels. La Russie, dans les années 1960, consommait 23 millions de mètres cubes de poteaux de bois pour ses mines, soit davantage que toute la production forestière française au début du XX^e siècle. Les sources d'énergie « nouvelles » prennent un temps considérable pour s'affranchir des énergies anciennes qui les ont vues naître et n'y parviennent jamais complètement.

Par ailleurs, il faut aussi prendre en compte les réorientations d'usage qui surcompensent les dynamiques partielles de substitutions. Par exemple, si au XIX^e siècle l'usage du bois de feu a reculé dans les pays industriels face au charbon, le bois est venu

nourrir d'autres industries comme le papier, la construction, les traverses de chemin de fer, les tonneaux, les caisses, puis les palettes, etc.

Un quatrième phénomène contribue à l'accumulation de matières: les nouvelles matières premières alimentent de nouveaux usages davantage qu'elles ne servent à satisfaire des besoins anciens. Ainsi, au xx^e siècle, le pétrole ne s'est pas substitué au charbon, ou seulement à la marge. Il a avant tout été employé pour faire avancer des voitures dont la production nécessitait à son tour beaucoup de charbon (de l'ordre de 7 tonnes par automobile dans les années 1930) et, par voie de conséquence, beaucoup de bois de mine... Sans compter le béton, qui domine de loin la construction des routes – y compris celles recouvertes de bitume – et dont la production aussi a consommé beaucoup de charbon au xx^e siècle.

INCONTURNABLE CHARBON

Enfin, les nouvelles techniques relancent les matières «anciennes». Cela vaut pour les chemins de fer, qui ont massivement utilisé le bois, cela vaut aussi pour l'électricité, la grande innovation énergétique du xx^e siècle, qui a longtemps renforcé la centralité économique du charbon. À partir des années 1970, on assiste à une croissance très importante de la production d'électricité à partir de charbon en Chine, bien sûr, mais aussi dans des pays parmi les plus riches du monde. C'est en 2008 que la consommation de charbon des États-Unis a atteint son maximum historique. Le charbon est ainsi tout autant

l'énergie de la «révolution internet» du début du XXI^e siècle (un réseau supplémentaire d'électrons) que celle de la mal nommée «révolution industrielle» du XIX^e siècle. Pour le moment, le nucléaire et les renouvelables n'ont pas réussi à faire diminuer les fossiles dans le mix énergétique mondial, qui demeure fondamentalement carboné, les fossiles comptant encore pour environ 80% de l'énergie primaire globale.

L'anthropocène désigne donc une double irréversibilité, une double accumulation. Non seulement les flux de matières s'accumulent durablement dans les différents compartiments du système Terre, mais les techniques qui produisent ces flux, elles aussi, s'accumulent au cours du temps. Ainsi, tout comme le terme «crise environnementale» nous induit en erreur sur la temporalité du système Terre, les notions d'«innovation» et de «transition» sont inadéquates pour décrire l'évolution matérielle de l'humanité. Et, par conséquent, les défis auxquels nous faisons face à l'époque de l'anthropocène. Le plus grand d'entre eux sera sans doute de sortir de cette spirale matérielle d'horizon très limité.

— L'auteur —

> **Jean-Baptiste Fressoz** est historien des sciences, des techniques et de l'environnement au CNRS et à l'École des hautes études en sciences sociales, à Paris.

— À lire —

> **J. B. Fressoz**, *Sans transition: une nouvelle histoire de l'énergie*, Le Seuil, 2023.

> **F. Krausmann et al.**, *From resource extraction to outflows of wastes and emissions: the socioeconomic metabolism of the global economy, 1900-2015*, *Global environmental change*, 2018.

> **C. L. Magee et al.**, *A simple extension of dematerialization theory: Incorporation of technical progress and the rebound effect*, *Technol. Forecast. Soc. Change*, 2017.

“ Le pic de la production pétrolière est hypothétique, on ne l’atteindra sans doute jamais

Marc-Antoine Eyl-Mazzega
est directeur
du centre Énergie
et climat de l’Institut
français des relations
internationales



L'état des réserves mondiales de pétrole fait-il débat ?

Aucunement. Il est très bien connu, il n'y a aucune discussion là-dessus. D'après le dernier World Energy Outlook (2022) de l'Agence internationale de l'énergie, les réserves avoisinent les 1 750 milliards de barils de pétrole – le baril de 159 litres est l'unité sur ce marché –, soit *grosso modo* ce qui a été extrait du sous-sol depuis le début de l'ère du pétrole. Elles expriment ce qui peut être exploité à un coût connu en l'état actuel des technologies et des marchés. Elles se distinguent des ressources, simple potentiel de production, qui sont trois à quatre fois plus importantes. Si le prix du baril augmente, et si les acteurs estiment qu'il s'inscrit dans une hausse durable, les ressources peuvent devenir des réserves, comme dans l'Arctique et en offshore profond. Plus les acteurs anticipent une hausse de la demande et des prix élevés, plus ils ont un intérêt à financer des campagnes d'exploration, qui peuvent ensuite donner lieu à la découverte de réserves.

De grands producteurs comme le Venezuela ou l'Arabie saoudite gèrent leurs exploitations sans rendre de comptes sur les chiffres qu'ils fournissent. Sont-ils fiables ?

Ils le sont. Au Venezuela, des entreprises occidentales comme ExxonMobil, Shell ou BP ont longuement opéré avant la création de la

compagnie nationale PDVSA, elles connaissent donc bien la ressource, certaines comme Chevron y sont même encore. En Arabie saoudite, la compagnie nationale Saudi Aramco a été introduite sur le marché de Riyad en 2019 et, à cette occasion, elle a noué un partenariat avec une société d'audit de classe mondiale. Il y a donc très peu de doutes et les choses sont solidement établies.

Le pic mondial de la production est-il encore loin devant nous ?

Le pic de production marque un stade où il n'est géologiquement et techniquement plus possible de produire davantage de pétrole. Ce stade est purement hypothétique, et on ne l'atteindra sans doute jamais. C'est la demande qui va d'abord baisser et parvenir à un pic. Toutefois, on a encore une forte marge à la hausse. La production actuelle dépasse les 100 millions de barils par jour (mb/j) et l'Opep, par nature optimiste, envisage qu'elle pourrait arriver à 130 mb/j. Même une source plus mesurée comme l'Energy Information Administration, aux États-Unis, estime qu'elle pourrait dépasser 110 mb/j. Dans ces conditions, chaque pays producteur s'adapte. Je vous donne deux exemples : en Arabie saoudite, où les coûts d'exploitation sont les moins élevés du monde en raison de ressources d'excellente qualité et faciles à extraire, avec la plus faible empreinte carbone notamment du fait de la concentration des infrastructures et de leur parfait état, on investit et on

Le débat public s'est souvent résumé à l'idée qu'on n'aurait pas assez de pétrole pour alimenter le monde ; en réalité, il y en a autant qu'on en veut

produit autant qu'on peut. Inversement, la Norvège estime que la demande va baisser plus vite. Son coût de production dans l'offshore profond étant très élevé, et consciente qu'elle est des enjeux climatiques, elle préfère miser davantage sur le gaz. Vous voyez deux démarches différentes. Résultat ? Chacune anticipe l'avenir selon ses propres critères et élabore des stratégies différentes. Mais toutes écartent la possibilité d'un pic de production, car les barrières ne cessent d'être repoussées.

N'est-ce pas pourtant ce pic de la production qui hante les esprits depuis des décennies ?

En effet, le débat public s'est souvent résumé à ceci : on n'a pas assez de pétrole pour alimenter le monde, donc on aura un pic de production. En réalité, il y en a autant qu'on en veut. La question est : quel prix est-on prêt à mettre pour l'obtenir ? Quels efforts souhaitons-nous consentir pour l'exploration ? Quel degré de pollution tolèret-on ? Si vous placez la tolérance très haut pour ces trois critères-là, il y aura du pétrole pour cinq cents ans. Si, au contraire, vous baissez la barre et ne voulez pas de pétrole très cher, très polluant ou « géopolitiquement compliqué », alors les réserves se réduisent fortement. Le sujet est bel et bien celui de la demande. La limite est celle de la volonté : elle est politique.

Dans un rapport de 2021, le groupe de réflexion The Shift Project concluait que

les seize principaux fournisseurs de l'UE seraient en déclin inévitable dans la décennie 2030...

Dans le pétrole, le taux de déplétion naturelle des gisements est de l'ordre de 4% par an : dit autrement, en l'absence d'investissement, vous perdez tous les ans 4% de la production. Il est tout à fait possible qu'un certain nombre de producteurs finissent par couper leurs investissements dans « l'amont » pétrolier – la partie exploration et extraction, qui se distingue de « l'aval » où les produits sont transformés et distribués. Leurs ressources resteront alors dans le sous-sol. Mais que se passe-t-il en Arabie saoudite, aux Émirats arabes unis, au Mexique, au Brésil, aux États-Unis, en Russie, en Iran ? Les pétroliers réinvestissent dans l'amont. L'une des règles fondamentales de cette industrie est : moins on consacre d'argent à l'exploration, moins on trouve. Or, aujourd'hui, on sait extraire des huiles à des coûts beaucoup plus réduits que ce qu'on faisait il y a dix ans. On explore des zones auxquelles on n'avait jamais pensé il y a quinze ans, notamment dans les couches très profondes. Sur l'offshore en particulier, on a fait d'énormes progrès.

Le niveau erratique du cours du pétrole depuis 2007 ne dissuade-t-il pas l'investissement ?

Au moment où le Shift Project a écrit son rapport, l'idée répandue était que les pays

producteurs, en particulier les États rentiers qui en tirent l'essentiel de leurs revenus, sont condamnés dans les dix ans à venir, notamment parce que le prix des hydrocarbures resterait très bas. En fait, c'est tout le contraire. On s'oriente vers une transition énergétique avec des prix élevés pour le pétrole comme pour le gaz, même s'il y aura encore de la volatilité; de tels niveaux permettent de relancer l'exploration et de découvrir de nouvelles sources. L'Arabie saoudite est en train de s'affirmer comme un géant du pétrole, mais aussi du gaz, des engrais, des métaux, etc. Les autres pays du Moyen-Orient se disent la même chose. L'Algérie relance l'investissement dans le gaz de schiste extrait en fracturant la roche qui le contient. Les Russes continuent de placer leurs hydrocarbures sur les marchés malgré les sanctions internationales et nous sommes obligés de les laisser faire pour éviter une déstabilisation mondiale. En revanche, il est clair que l'investissement est contraint, pour les majors européennes particulièrement, qui se sont fixé des objectifs de décarbonation, et il en va de même pour les banques européennes.

La fin de la rente pétrolière ne serait-elle pas synonyme de changement géopolitique majeur pour les pays concernés ?

Soyons prudents avec ce type d'analyse, ne sous-estimons pas les États en question. D'abord, ils ne vont pas manquer de pétrole du jour au lendemain. L'horizon de leur adaptation court sur vingt ou trente ans, ce qui laisse le temps de se retourner. Dans des pays sclérosés et mal gouvernés, qui ne prennent pas au sérieux l'enjeu de la diversification économique et de l'amélioration de la gouvernance, ce sera un problème mais seulement à terme. Regardez l'Iran, sous sanctions depuis trente ans : il tient toujours. Ces pays sont résilients et il ne faut pas caricaturer leur situation en associant fin des hydrocarbures et effondrement. J'aime citer le cas des Saoudiens. Loin d'être complètement oisifs et aveugles, ils ont une force de frappe financière extraordinaire et, à la différence d'autres pays du Moyen-Orient, ils disposent d'une population très jeune, qui, si elle est formée, peut faire beaucoup.

En Europe, la lutte contre le réchauffement climatique est affichée comme une priorité. Est-ce universel ?

Vue du reste du monde, la priorité est plutôt de sortir 2 milliards de personnes de l'extrême pauvreté, de répondre au fort accroissement de la demande en énergie, et ensuite de s'adapter au changement climatique provoqué par les pays riches auxquels s'ajoutent l'Union soviétique et la Chine. Quand vous allez en Inde, en Malaisie ou en Afrique, et que vous évoquez la réduction de la demande de pétrole, on vous rétorque : du pétrole, nous en manquons et notre priorité est d'y faire accéder nos populations. Même s'ils s'intéressent aux renouvelables, tous ces pays comptent bien passer, comme nous l'avons fait, par la case pétrole et gaz pour leur développement. La seule urgence environnementale que partagent avec nous le maire de New Delhi ou de Djakarta est la dépollution de l'air dans les grandes villes, rendu irrespirable par les centrales à charbon et les carburants de mauvaise qualité.

Enfin, entre pétrole et réchauffement, peut-on vraiment choisir ?

Au fond, la question centrale est celle de la coordination entre l'accompagnement de la baisse de la demande, qu'il va falloir pousser davantage, et l'investissement dans les hydrocarbures, car il faudra continuer à investir si on veut éviter un monde très instable. Avec un baril à 150 dollars au lieu de 80, les Occidentaux s'en sortiront peut-être, mais en Afrique subsaharienne ou en Inde ce sera le chaos et ses effets ricochets peu désirables. Cet enjeu-là n'est absolument pas pris en compte. Les radicaux de la transition pensent qu'on peut changer de système en claquant des doigts, et ne comprennent pas ce qui se passe dans le reste du monde. À l'inverse, l'autre position extrême, celle des États du Golfe, consiste à dire : le réchauffement, nous le vivons déjà, pour le combattre il suffit d'installer la climatisation. Aucune de ces postures n'est tenable. Comment fait-on se rencontrer ces deux mondes-là ? Voilà le sujet de fond.

Propos recueillis par Olivier Voizeux

Les gazoducs se comptent en millions de kilomètres. Au lieu de les démanteler, pourquoi ne pas y faire circuler autre chose que du gaz fossile ?

26

Reconvertir nos usines à gaz

Michael Webber



Au milieu des années 2010, il était courant de dire que le gaz naturel serait un carburant de transition vers un futur décarboné, dans lequel le soleil, le vent et d'autres sources renouvelables combleraient nos besoins en énergie et nous débarrasseraient des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) qui réchauffent le climat. Mais si le gaz naturel est vraiment une étape obligée vers ce futur, comment éviter que nous prenions de mauvaises habitudes ?

Constitué principalement de méthane (CH₄), ce gaz d'origine fossile brûle de façon plus propre que le charbon, et il fournit un soutien immédiat aux centrales solaires et aux parcs éoliens dont la production est intermittente. Deux atouts en faveur de son utilisation, à ceci près que brûler du gaz naturel dégage du CO₂. En outre, le méthane présent dans les puits s'échappe parfois dans l'atmosphère et amplifie le réchauffement global. En somme, lorsque la dernière centrale à charbon fermera, les centrales au gaz naturel deviendront à leur tour les sources d'électricité les plus sales.

Les partisans des énergies propres craignent donc, à juste titre, que tout investissement dans des infrastructures gazières dont la durée de vie se compte en décennies ne retarde la transition énergétique. Mais il est possible de résoudre ce problème grâce à une alternative au gaz naturel : des gaz à faible teneur en carbone circulant dans les pipelines, les réservoirs et les centrales électriques existants, ce qui permettrait ainsi de profiter de l'infrastructure de gazoducs dans laquelle des sommes colossales ont déjà été investies.

En bref

- > Le gaz naturel est l'une des principales sources d'énergie, mais sa combustion dégage du dioxyde de carbone.
- > Cette énergie d'origine fossile est donc incompatible avec l'objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre.
- > En conservant les infrastructures gazières existantes, il est possible d'exploiter des gaz dont le bilan en carbone est plus favorable, comme le biométhane ou l'hydrogène.
- > On profiterait ainsi d'infrastructures dans lesquelles des sommes considérables ont déjà été investies.

Le substitut au gaz naturel le plus avancé est le biométhane, c'est-à-dire du méthane d'origine biologique. Comment est-il fabriqué ? À l'intérieur de grands réservoirs appelés « méthaniseurs », des bactéries digèrent de façon anaérobie (qui ne requiert pas d'oxygène), des matières organiques telles que déchets agricoles, fumier, eaux usées, détritiques alimentaires... Ces « dispositifs », à la technologie déjà mûre, transforment les déchets des élevages industriels (notamment le lisier), véritables plaies environnementales, en produits valorisables dont les municipalités et les agriculteurs pourraient tirer des revenus.

À LA RECHERCHE DE L'HYDROGÈNE BLANC

Le biogaz peut servir de substitut direct au gaz naturel, mais les quantités émises, à l'échelle mondiale, sont faibles. Si une ferme, une décharge ou une station d'épuration ne peut pas utiliser le gaz pour produire de l'électricité ou si elle n'est pas située à proximité du réseau gazier, le biométhane devra peut-être être liquéfié et transporté par camion ailleurs, d'où un bilan de carbone moins intéressant. Néanmoins, le biométhane est une technologie prête sur le plan commercial à aider à décarboner une partie de l'industrie gazière.

Le gaz naturel est aussi remplaçable par de l'hydrogène. Les turbines des centrales sont adaptées à brûler de l'hydrogène afin de produire de l'électricité pour le réseau, et même les moteurs à combustion des véhicules utilitaires lourds

Les partisans des énergies propres craignent qu'investir dans des infrastructures gazières ne retarde la transition énergétique. Mais nous pouvons résoudre ce problème grâce à une alternative au gaz naturel

savent s'en satisfaire. Dans les piles à combustible, l'hydrogène génère de l'électricité pour les voitures, les maisons ou les bureaux. Et il est déjà l'un des ingrédients de nombreux produits chimiques. Sa combustion, comme sa transformation dans les piles à combustible, n'émet pas de CO_2 . Dernier avantage: en cas de fuite, l'hydrogène a un effet de serre inférieur à celui du méthane, même si son potentiel de réchauffement a récemment été réévalué à la hausse.

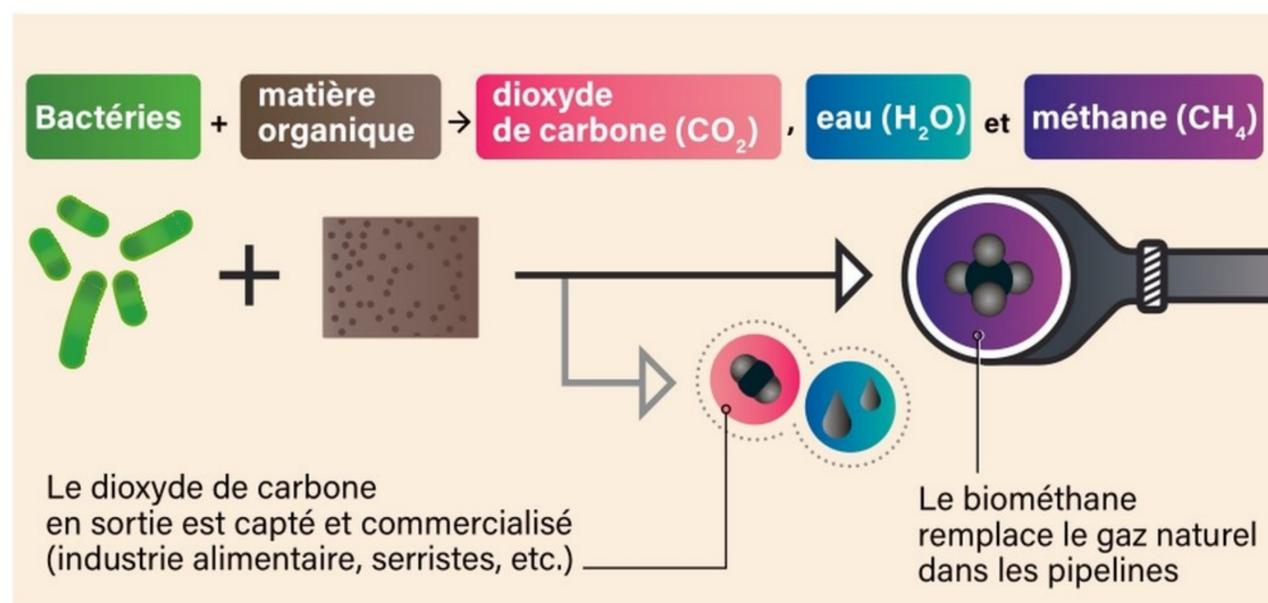
Où trouve-t-on de l'hydrogène dans la nature? Ce gaz s'échappe naturellement du sol dans de nombreux bassins situés dans des cratons – d'anciens morceaux de plaques terrestres

situés au cœur des continents. Les scientifiques connaissent ces suintements depuis plus d'un siècle. Les compagnies pétrolières et gazières ont toutefois considéré cet hydrogène dit «blanc» comme une nuisance lorsqu'elles en trouvaient à proximité des réservoirs souterrains, car il peut prendre feu et endommager les canalisations métalliques. Mais aujourd'hui, les ingénieurs et les chercheurs forent à titre expérimental des puits à hydrogène et lancent des programmes pluriannuels pour prospecter le sous-sol. En France, dans le cadre du projet Regalor 2 conduit avec la société La Française de l'énergie, des chercheurs du CNRS et de

29

STRATÉGIE 1 - REMPLACER LE GAZ NATUREL PAR DU BIOMÉTHANE

Pour réduire les émissions de CO_2 dues à la consommation de gaz naturel (du méthane pour l'essentiel), une option est de remplacer le gaz transporté dans les pipelines par du biométhane produit par des bactéries en décomposant la matière organique (déchets agricoles, fumier, eaux usées, débris alimentaires...). La décomposition libère aussi de la vapeur d'eau et du CO_2 (l'ensemble prend le nom de «biogaz»), qu'il faut filtrer pour ne conserver que les 50 à 70% de biométhane.



On pourrait choisir de retirer le carbone au bout du tuyau, directement chez l'utilisateur

STRATÉGIE 2 - REMPLACER LE GAZ NATUREL PAR DE L'HYDROGÈNE

30

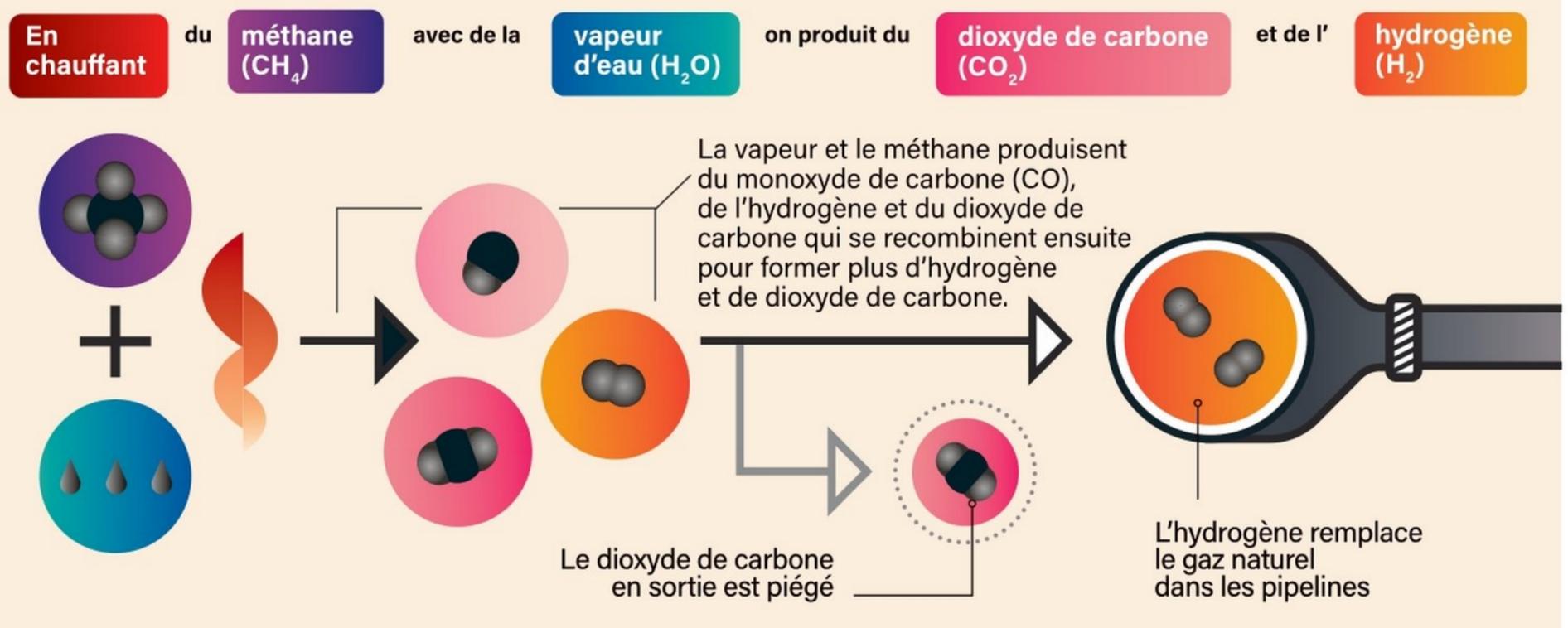
Le gaz naturel dans les pipelines est partiellement ou intégralement substituable par de l'hydrogène. Cette ressource peut servir de matière première pour l'industrie,

de carburant pour les centrales électriques et les véhicules lourds... La combustion de l'hydrogène n'émet pas de carbone. Des pipelines faits d'un alliage spécial seraient nécessaires

pour transporter un gaz composé de moins de 20% d'hydrogène. Ci-dessous, l'emploi possible d'hydrogène bleu, c'est-à-dire avec capture du CO₂ émis.

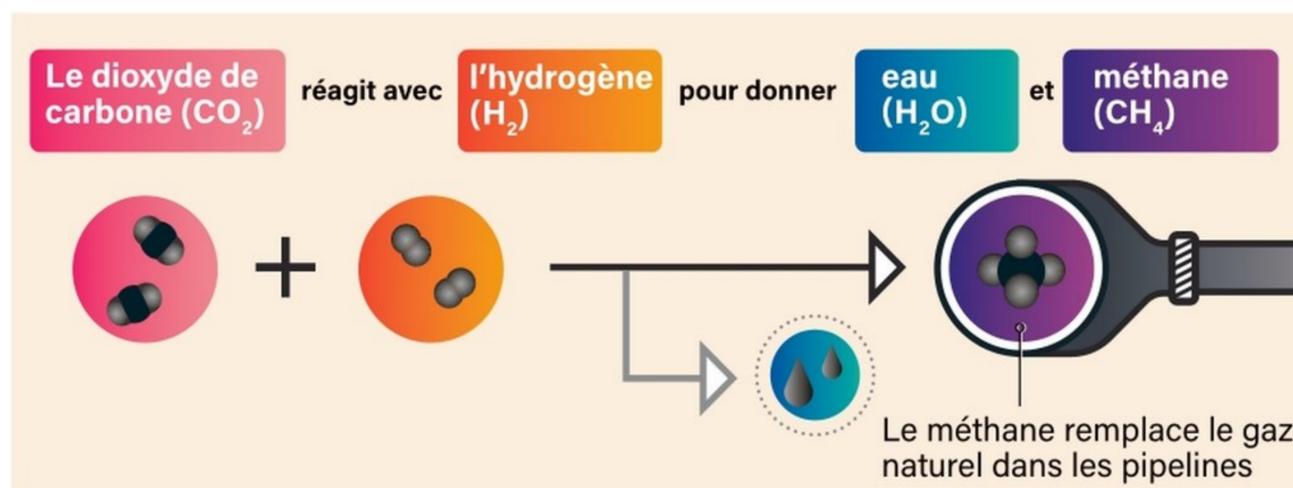
Reformage à la vapeur du méthane, avec piégeage du carbone

L'ajout de chaleur et d'eau au méthane provenant d'un puits forme de l'hydrogène et du CO₂, que l'on peut capter et séquestrer dans un réservoir souterrain. L'industrie utilise déjà largement ce procédé pour fabriquer de l'hydrogène destiné aux raffineries et aux fonderies. Une énergie propre serait nécessaire pour produire la chaleur.



STRATÉGIE 3 - TRANSPORT D'HYDROGÈNE SOUS D'AUTRES FORMES CHIMIQUES

On capte le CO_2 de l'air, puis on le combine avec de l'hydrogène pour former un gaz porteur (méthanol, méthane...), qui est ensuite convoyé par pipeline. Sa combustion relâche du CO_2 , mais comme le carburant a été synthétisé à partir de CO_2 atmosphérique, les émissions nettes sont faibles.



l'université de Lorraine ont découvert cette année, autour du puits de Folschviller, en Moselle, ce qui pourrait être un gisement géant d'hydrogène naturel. En termes de production, les espoirs ressemblent à ceux manifestés au tout début de la fracturation des schistes : une ressource énorme est là, si les ingénieurs parviennent à trouver comment l'exploiter à moindre coût et en toute sécurité.

DU MÉTHANE DOPÉ À L'HYDROGÈNE

Il est aussi possible de synthétiser l'hydrogène, moyennant néanmoins d'importantes quantités d'énergie (voir *Les promesses colorées de l'hydrogène*, par D. Castelvechi, page 34). Autre inconvénient : le transport et le stockage de l'hydrogène gazeux sont délicats. En raison de la faible densité de l'hydrogène, son acheminement par pipeline réclame lui aussi beaucoup d'énergie, par rapport à des gaz plus denses comme le méthane ou des liquides comme le pétrole. L'opération est si peu efficace qu'après plusieurs centaines de kilomètres le coût de son transport dépasse largement la valeur de l'énergie qu'il véhicule. De plus, l'hydrogène est susceptible de fragiliser les pipelines en acier, sauf si l'on y incorpore des alliages coûteux ou si l'on modifie les conditions d'exploitation.

Une façon de résoudre ces problèmes est, dans les conduits, de mélanger de l'hydrogène au méthane. Cette astuce permet de décarboner une partie du système en troquant une portion du gaz naturel contre de l'hydrogène. Des expériences menées au Royaume-Uni et en France montrent

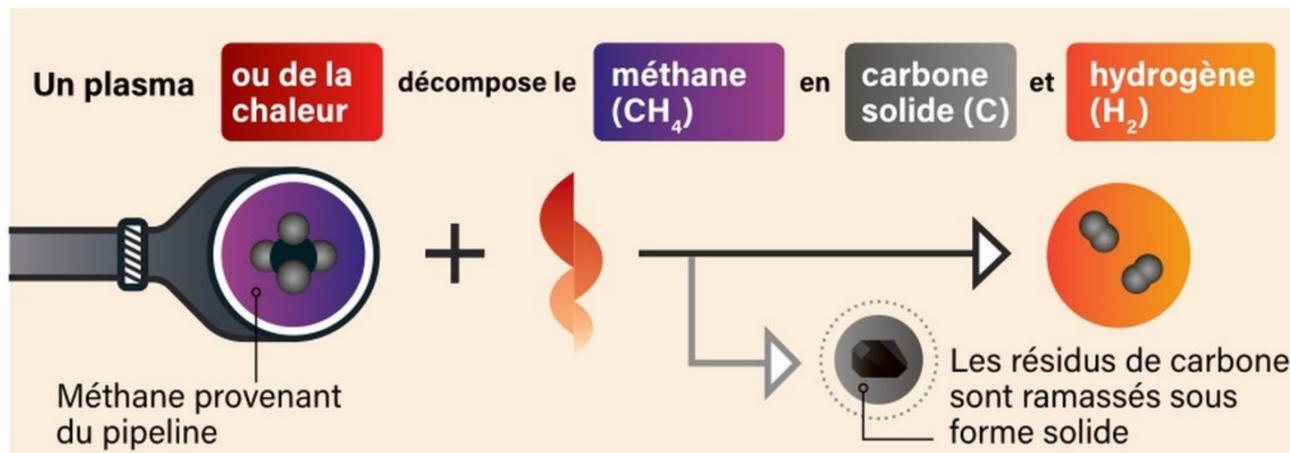
que l'on peut transporter efficacement dans un gazoduc un mélange de 80% de méthane et de 20% d'hydrogène. Dans le cadre d'une étude menée de mi-2018 à mars 2020, la ville de Dunkerque a utilisé un tel mélange pour alimenter 100 foyers et la chaudière d'un hôpital, sans ajouter le moindre équipement le long du gazoduc ou dans les bâtiments.

Les raccords des tuyaux d'alimentation en gaz des fours et des cuisinières, ainsi que les embouts de brûleurs, devront vraisemblablement être modifiés ou remplacés pour les mélanges contenant plus de 20% d'hydrogène car, à l'instar de l'hydrogène pur, ce mélange brûle à des températures et des vitesses différentes. Il faut également tenir compte du fait qu'en raison de la faible densité énergétique de l'hydrogène, un mélange à 20% en volume fournit 14% d'énergie en moins que le gaz naturel.

Une parade possible aux problèmes de coût et de sécurité consiste à intégrer l'hydrogène sous une autre forme chimique que nous savons manipuler, comme l'ammoniac (NH_3). De tels composés contenant des atomes d'hydrogène sont des « porteurs d'hydrogène ». Sur le lieu d'extraction ou de production, l'hydrogène est intégré à son porteur, puis convoyé par pipeline. À destination, on peut l'utiliser sous cette forme ou le reconvertir en hydrogène.

Les porteurs classiques (l'ammoniac, l'acide formique et le méthanol) sont liquides dans les conditions ambiantes, ce qui rend leur transport plus facile que l'hydrogène gazeux. Bien que l'ammoniac soit caustique (c'est-à-dire qu'il attaque

STRATÉGIE 4 - EXTRAIRE LE CARBONE CHEZ LE CONSOMMATEUR



Et si l'on extrayait le carbone du gaz naturel chez l'utilisateur, plutôt que chez le fournisseur ? Grâce au procédé de pyrolyse, un appareil transforme le méthane en hydrogène gazeux pour le chauffage, les cuisinières et les machines industrielles, tandis que les résidus de carbone sont collectés et revendus comme matière première.

les tissus organiques), on le transporte déjà dans le monde entier en tant qu'ingrédient d'engrais, et il brûle sans émettre de CO₂. Le méthane serait l'option la plus efficace, car il transporte quatre atomes d'hydrogène par atome de carbone et est déjà compatible avec les tuyaux, compresseurs, réservoirs, turbines et appareils existants.

32

Les projets de démonstration se multiplient. Le constructeur industriel finlandais Wärtsilä est en train de concevoir un nouveau navire pour 2024, baptisé *Viking Energy*, qui fonctionnera à l'ammoniac avec des piles à combustible et s'épargnera les émissions de gaz à effet de serre et autres polluants dont est responsable le secteur maritime. La compagnie Air France et l'aéroport de Paris-Charles-de-Gaulle s'intéressent de près à l'hydrogène comme moyen de décarboner l'aviation. Cependant, comme les porteurs d'hydrogène n'en sont encore qu'aux premiers stades de la recherche, il est difficile de prédire leur avenir.

Des centrales électriques qui brûlent de l'hydrogène sont également à l'étude. À Delta, dans l'État de l'Utah, la centrale électrique Intermountain Power Plant, l'une des plus grandes centrales à charbon des États-Unis, alimente en électricité Los Angeles, située à des centaines de kilomètres. Pour répondre aux exigences à long terme de la ville en matière d'énergie renouvelable et à bas carbone, l'exploitant de la centrale remplacera en 2025 les chaudières à charbon par des turbines fonctionnant à l'hydrogène. Celles-ci commenceront par utiliser un mélange de 30% d'hydrogène et de gaz naturel, avant de passer à 100% d'hydrogène. L'hydrogène

Vertueux, le biogaz ?

3 questions à... **Daniel Chateigner**, professeur à l'université de Caen Normandie et coordonnateur du Collectif scientifique national sur la méthanisation (CSNM).

Du biogaz circule-t-il déjà dans nos tuyaux ?

Oui. En France, 30% des installations productrices de biogaz par méthanisation injectent leur biométhane, une fois purifié, dans le réseau gazier. Les agriculteurs en fournissent un gros tiers.

Jusqu'où la géographie des exploitations agricoles coïncide-t-elle avec celle des infrastructures de transport ?

Réinjecter le biogaz dans un réseau exige de tirer des canalisations supplémentaires jusqu'aux fermes : on ne se contente donc pas de « reconverter » l'existant, on l'agrandit ! C'est un choix politique à assumer en raison des fuites possibles (jusqu'à 1% de pertes), lesquelles s'ajoutent à celles des méthaniseurs, en moyenne 4,8% sur le site de production.

Le biogaz est-il plus vertueux que le gaz fossile ?

Non, car au-delà du lisier on utilise des plantes, comme le maïs, spécialement cultivées pour la méthanisation – le rendement est bien meilleur. Quand on comptabilise toute la chaîne de production, y compris les émissions associées aux cultures qui y sont consacrées, produire du biogaz est 2 à 6 fois plus émetteur qu'employer du gaz fossile. Le tout subventionné par les pouvoirs publics, donc le contribuable !

Propos recueillis par O.V.

sera produit sur place par électrolyse, avec de l'électricité d'origine éolienne et solaire, et sera stocké dans plus de 100 cavités souterraines existantes, comparables en taille à l'Empire State Building, qui avaient été creusées lors de l'exploitation du sel.

DÉCARBONER... CHEZ VOUS!

Autre possibilité: retirer le carbone au bout du tuyau, chez le consommateur. Le méthane, par exemple, peut être décomposé chez l'utilisateur en hydrogène et en carbone solide, qui ressemble à une fine poussière noire. Le procédé – la pyrolyse du méthane – est efficace et élimine les émissions de CO₂. Chaque kilogramme d'hydrogène produit selon cette technique engendre 3 kilogrammes de carbone solide au lieu des 9 kilogrammes de CO₂ qui seraient émis si le méthane était brûlé.

On évacuerait une fois par mois environ le tas de poussière de carbone qui s'accumule à l'intérieur d'un collecteur dans une chaudière ou une cuisinière. Ce carbone constituerait une matière première pour la fabrication du graphite, du caoutchouc, de revêtements, de batteries...

Bien que les ingénieurs étudient la pyrolyse du méthane depuis des décennies, la technique n'a été mise en œuvre que dans le cadre de petits projets de démonstration. Il sera indispensable de modifier certains équipements en bout de canalisation pour séparer le carbone, mais aucun pipeline coûteux ne devra être construit, ce qui simplifie grandement les choses. La pyrolyse du

gaz naturel usuel amènerait l'ensemble du réseau gazier à un taux d'émissions de carbone quasi nul. Avec l'ajout de méthane provenant de biodigesteurs ou produit à partir du CO₂ présent dans l'atmosphère à l'aide d'électricité d'origine renouvelable, le bilan des émissions en carbone pourrait même devenir négatif.

Imaginer l'un ou l'autre de ces futurs décarbonés peut faire peur et laisser penser que de grands complexes industriels ou des millions de petits équipements individuels chez les consommateurs seront nécessaires. Mais l'électrification de chaque chauffage, cuisinière et véhicule obligerait aussi à un aussi un remplacement généralisé de technologie. Le gaz décarboné nous permettrait au moins de tirer parti des appareils existants et, plus encore, d'une infrastructure gazière massive qui deviendrait un atout pour bâtir un avenir à bas carbone.

— L'auteur —

> **Michael Webber**
est professeur d'ingénierie mécanique à l'université du Texas, à Austin (États-Unis). Il a été directeur scientifique et technologique de la société Engie, à Paris.

— À lire —

> **C. Kemfert et al.**, The expansion of natural gas infrastructure puts energy transitions at risk, *Nature Energy*, 2022.

> **C. Gürsan et V. de Gooyert**, The systemic impact of a transition fuel: Does natural gas help or hinder the energy transition?, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 138, 2021.

> **J. Mertens et al.**, Why the carbon-neutral energy transition will imply the use of lots of carbon, *Journal of Carbon Research*, vol. 6, 2020.

Aujourd'hui essentiellement gris, car peu vertueux en matière d'environnement, l'hydrogène serait à même de soulager l'industrie de ses démons émetteurs, à condition de passer au vert.

34

Les promesses colorées de l'hydrogène

Davide Castelvechi



Remplacer, dans les hauts-fourneaux, le charbon par du dihydrogène aiderait grandement à décarboner la sidérurgie... à condition que le gaz ne soit pas lui-même d'origine fossile.

En bref

- | | | | |
|---|--|---|--|
| > Porté par un large soutien politique, l'hydrogène est promis à un véritable boom d'ici au milieu du siècle. | > Il peut aider l'industrie lourde, la sidérurgie en particulier, à devenir moins émettrice de dioxyde de carbone. | > La condition <i>sine qua non</i> est que sa propre production, aujourd'hui massivement tirée du gaz fossile, devienne « propre ». | > L'électrolyse de l'eau est le procédé le plus vertueux, mais il nécessite de grosses quantités d'électricité elle-même peu carbonée. |
|---|--|---|--|

36

Chauffé à blanc, le fer liquide coule jour et nuit. Dans cette usine du Grand Nord suédois, propriété du sidérurgiste SSAB, le flot se déverse depuis une ouverture à la base du haut-fourneau de 90 mètres. En continu fuse aussi un flux de dioxyde de carbone, déchet de la combustion du charbon ajouté au minerai de fer. Pour chaque tonne de fer transformée en acier, 1,6 tonne de CO₂ est libérée. Des hauts-fourneaux de ce type, le monde en compte des centaines, la plupart encore plus émetteurs. Si l'on y ajoute d'autres étapes très énergivores, on comprend pourquoi la fabrication d'acier est à l'origine de 7% des émissions mondiales de gaz à effet de serre, soit l'équivalent, selon certaines estimations, du parc de véhicules particuliers.

Pourtant, à quelques centaines de mètres de là, un four plus modeste s'avère bien plus propre. Sa technologie pilote remplace le charbon par du dihydrogène (molécule H₂, que par commodité nous baptiserons «hydrogène» dans cet article.) Seule de la vapeur d'eau est alors relâchée. En 2021, ce site de Luleå, codétenu par trois entreprises suédoises (SSAB, Vattenfall et LKAB), a sorti le premier «acier vert» du monde grâce aussi à l'électricité faiblement carbonée de la Suède, produite à partir d'énergie hydraulique, nucléaire et éolienne (*voir l'infographie page 38*). «C'est la nouvelle façon de faire de l'acier, et elle élimine en principe tout le CO₂», se réjouit Martin Pei, directeur de la technologie chez SSAB.

L'acier à l'hydrogène n'est pas totalement exempt de pollution; dans la conversion du fer en acier, d'autres étapes émettent encore du CO₂, sans

compter que le minerai de fer doit toujours être extrait. Néanmoins, «verdir» l'acier est un des moyens par lesquels l'hydrogène devrait contribuer à la décarbonation de l'économie mondiale. Bien plus que comme carburant ou comme fluide de chauffage, ce gaz aiderait à assainir les lourds processus industriels, de la production de plastiques et d'engrais jusqu'au raffinage des hydrocarbures – des secteurs difficiles à décarboner et qui, pour cette raison, attirent moins l'attention des médias, des investisseurs et des décideurs politiques.

« LA RÉVOLUTION EST EN MARCHÉ »

Soucieux de réduire leur empreinte carbone, un grand nombre de gouvernements ont lancé une campagne massive en faveur de l'hydrogène, notamment aux États-Unis et dans l'Union européenne. Quand le prix de l'hydrogène à faible teneur en carbone n'est pas subventionné, ce sont des crédits d'impôt qui sont accordés aux producteurs ou aux industries concernées. On comprend dès lors pourquoi le secteur vit un véritable boom. Selon les données du Hydrogen Council, les centaines de projets rendus publics représentent déjà un investissement potentiel de 240 milliards de dollars d'ici à 2030 – même si, jusqu'à présent, seul un dixième d'entre eux sont vraiment bouclés. La même source estime que, d'ici à 2050, le marché de l'hydrogène et ses technologies pèsera 2300 milliards d'euros par an.

«La révolution de l'hydrogène est en marche, cette fois pour de bon», résume avec conviction Oleksiy Tatarenko, économiste à l'institut des

Centrales électriques, construction, transports : la plus grande contribution de l'hydrogène contre le réchauffement pourrait être de servir de pont entre ces activités

Rocheuses, un groupe de réflexion aux États-Unis. Les analystes prévoient une multiplication par cinq à sept de la production d'ici au milieu du siècle. Selon eux, la transition énergétique ne nécessite aucune technologie nouvelle : ce qui est éprouvé suffira, même si des progrès scientifiques l'accélèrent. De quoi enfin réduire l'empreinte carbone du monde... à condition bien sûr que l'hydrogène soit obtenu sans augmenter les émissions de CO₂, comme c'est le cas en Suède, à Luleå.

Car produire ce gaz est fortement émetteur. Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), environ 94 millions de tonnes sont fabriquées chaque année, dont 95% à partir de combustibles fossiles. La méthode du reformage, majoritairement appliquée, consiste à faire réagir le méthane (CH₄) présent dans le gaz avec l'oxygène de l'air pour donner de l'hydrogène moléculaire (H₂) et du CO₂. Ce dernier est ensuite rejeté dans l'atmosphère à hauteur de 900 millions de tonnes par an, soit plus de 2% des émissions mondiales. Cet hydrogène peu vertueux est qualifié de « gris ».

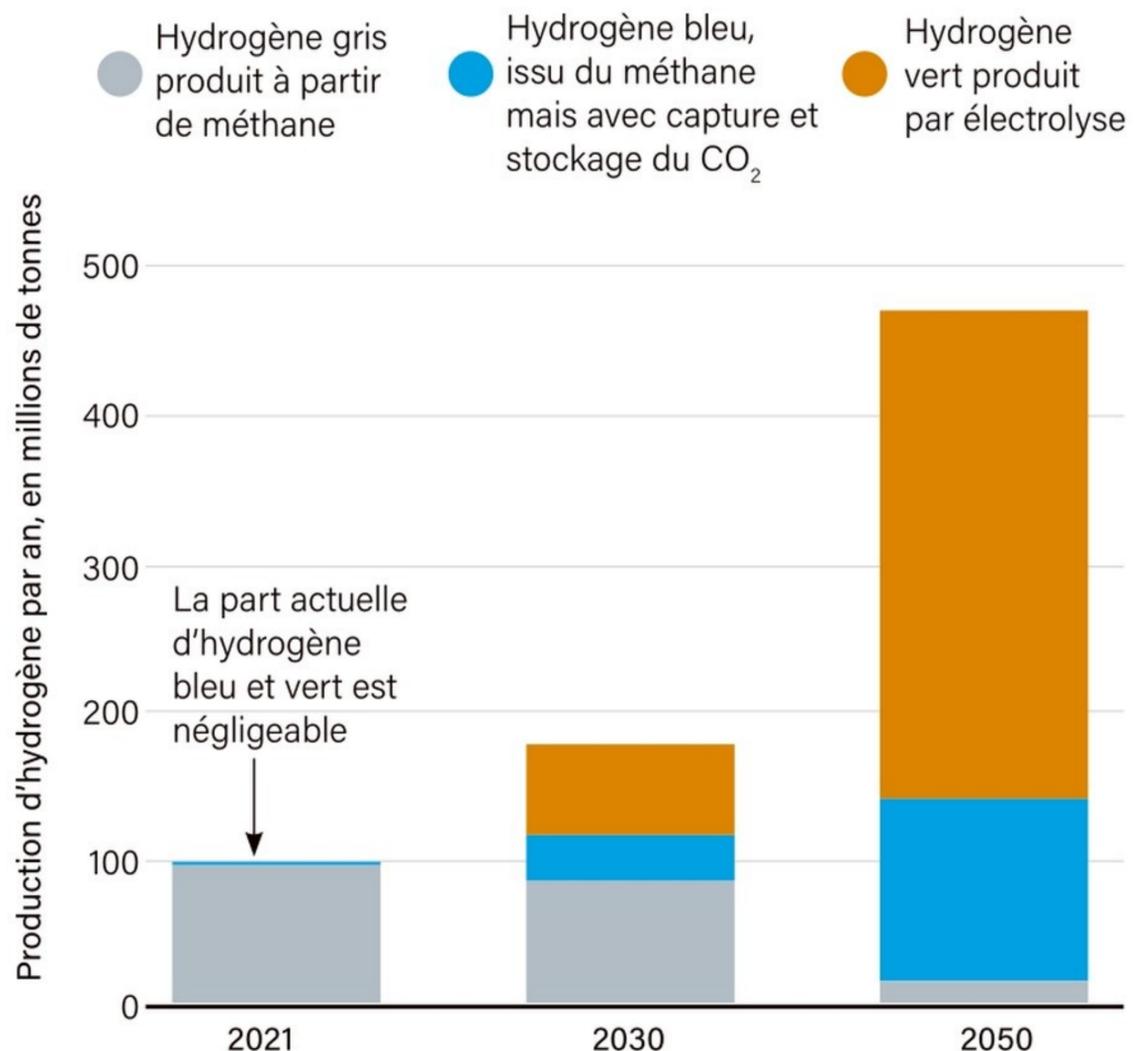
Les clients ? Toutes les industries essentielles. Mélangé à l'azote de l'air, il sert à produire de l'ammoniac (NH₃), le composant essentiel des engrais. Les raffineries pétrochimiques l'utilisent pour éliminer le soufre dans le pétrole brut ou pour décomposer les plus gros hydrocarbures. Dans l'industrie chimique, l'hydrogène sert aussi à fabriquer en masse des molécules comme le méthanol, lui-même indispensable à la synthèse d'innombrables produits chimiques de base.

Avant d'être une solution au changement climatique, l'hydrogène doit donc cesser d'être un

VOIR L'AVENIR EN VERT

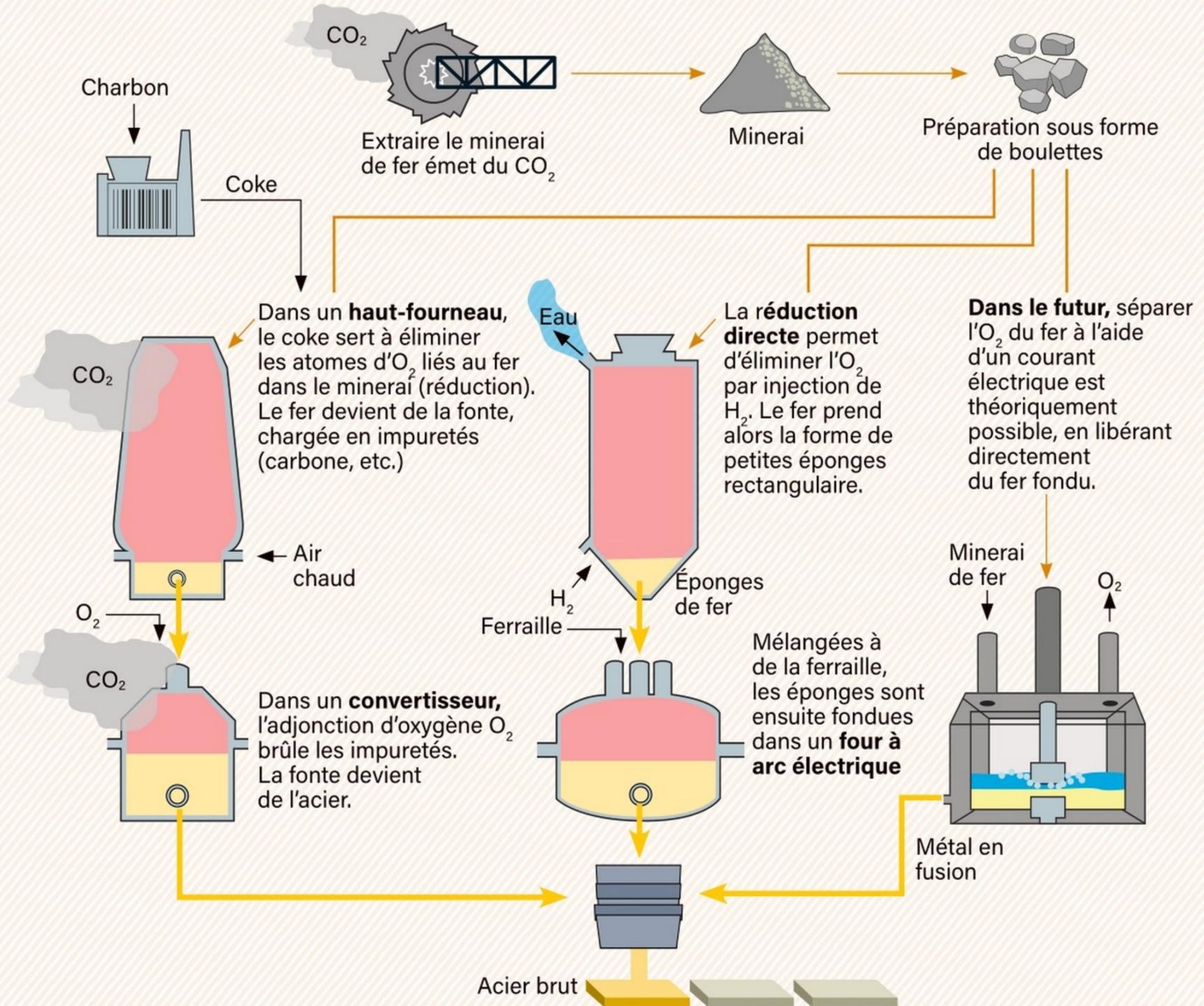
Dans son scénario « idéal » conduisant à des émissions nulles de CO₂ en 2050, l'AIE prévoit une production d'hydrogène (sans donc tenir compte de l'hydrogène « blanc », car émis naturellement) multipliée par cinq, avec une part prépondérante peu carbonée car issue d'électrolyseurs.

37



UNE INDUSTRIE EN PLEINE REFONTE

À elle seule, la sidérurgie est responsable de 7% des émissions mondiales de CO₂. En utilisant l'hydrogène pour réduire le minerai de fer, une baisse drastique des émissions serait possible.



problème. Si une partie du CO₂ était capturée et séquestrée sous terre, dans des réservoirs géologiques profonds, l'hydrogène ainsi décarboné serait alors «bleu». Mais les détracteurs de ce procédé soulignent qu'il n'empêche pas toutes les émissions de CO₂ et que sa production implique de continuer à extraire du gaz fossile, lequel est loin d'être un ami de l'environnement.

Dans un monde idéal, on puiserait dans des gisements d'hydrogène «blanc», c'est-à-dire présents naturellement dans le sous-sol (*voir Reconvertir nos usines à gaz, par M. Webber, page 26*). À défaut, un autre procédé est presque totalement exempt d'émissions de carbone: l'électrolyse de l'eau. Connue depuis deux siècles, elle consiste à extraire le «H» de H₂O dans un électrolyseur, en faisant passer un courant électrique entre des électrodes revêtues d'un catalyseur. Si l'énergie utilisée pour alimenter ce processus est d'origine renouvelable, l'hydrogène est alors «vert». Il a le potentiel «zéro émission», ou du moins de s'approcher de ce stade.

L'évolution du coût des électrolyseurs conditionnera la rapidité du passage au vert. Des analystes prévoient une baisse rapide (de plus de deux tiers d'ici à 2030), car ces machines sortent désormais de chaînes de montage de plus en plus automatisées. Le coût de fabrication de l'hydrogène vert par kilogramme passerait alors d'environ 5 à 1 dollar, même en l'absence d'allègements fiscaux. Il deviendrait compétitif par rapport au «gris», qui peut déjà être produit à moins de 1 dollar (lorsque les guerres n'augmentent pas le prix du gaz naturel...). Même si cela advient, de nombreuses études prévoient qu'en raison de l'explosion de la demande, une grande partie de celle-ci devra être satisfaite par de l'hydrogène bleu pendant des décennies.

Un tel procédé nécessitera d'énormes quantités d'énergie renouvelable. Si les électrolyseurs étaient efficaces à 100%, il faudrait plus de 3000 térawattheures (TWh) d'origine renouvelable chaque année pour «simplement» remplacer

l'hydrogène gris par du vert; en réalité, les besoins risquent de dépasser 4500 TWh, soit l'équivalent de... la production électrique annuelle des États-Unis! Dans son scénario d'un monde à zéro émission nette d'ici au milieu du siècle, l'AIE estime même les besoins annuels en électricité de l'hydrogène propre à 14800 TWh. Le triple!

Pourtant, les énergies propres se développent à un rythme remarquable. D'ici à 2024, par exemple, BloombergNEF prévoit que le monde aura la capacité de tirer près de 1 TWh des panneaux photovoltaïques chaque année, ce qui satisferait un septième de la demande annuelle d'électricité actuelle. Selon l'AIE, l'offre mondiale d'électricité à faibles émissions devrait plus que tripler d'ici au milieu du siècle – même si parvenir à un monde zéro émission en 2050 exige un rythme bien plus soutenu.

LE MINÉRAI DE FER VA DÉROUILLER

De toutes les industries, la sidérurgie est l'une des plus émettrices, et c'est le secteur où l'hydrogène aurait le plus d'impact. Depuis des années, on essayait d'intégrer ce gaz dans le processus, explique Martin Pei, mais sans y parvenir à grande échelle. En 2016, au moment où la plupart des pays ont signé l'accord de Paris sur le climat les engageant à maintenir le réchauffement climatique à moins de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels, il a commencé à mener des recherches chez SSAB. Pour que la Suède respecte ses engagements sur le climat, la décarbonation de l'acier était jugée cruciale. SSAB n'est pas un producteur d'acier majeur, mais il représente à lui seul 10% des émissions de CO₂ du pays. «Chacun savait que si SSAB ne maîtrisait pas ses émissions, c'était toute la Suède qui échouerait», reconnaît Mia Widell, porte-parole de l'entreprise.

Le plus difficile dans la fabrication de l'acier est qu'il faut extraire le fer du minerai, lequel est

“CETTE TRANSITION EST TOUT À FAIT
À LA PORTÉE DE NOS CAPACITÉS
TECHNIQUES ET ÉCONOMIQUES,
TANT DANS LES PAYS À REVENU ÉLEVÉ
QUE DANS LES ÉCONOMIES ÉMERGENTES”

REBECCA DELL, FONDATION CLIMATEWORKS

40

essentiellement composé de «rouille» piégeant le métal sous une forme oxydée. Dans un haut-fourneau, les atomes d'oxygène sont séparés de cette gangue, laissant place à du fer liquide. La fonction principale du combustible, coke ou charbon de bois, n'est donc pas de fondre le minerai, mais d'en extraire l'oxygène, dans un processus de réduction chimique au coût thermodynamique six fois supérieur à celui de la fusion de la roche – d'où les quantités de CO₂ libérées.

SSAB a d'abord envisagé la capture du CO₂ et son stockage souterrain, mais le coût a été jugé dissuasif. Elle a donc opté pour la voie de l'hydrogène qui se diffuse à l'intérieur du minerai de fer et élimine l'oxygène par un processus appelé «réduction directe du fer» (DRI, pour *direct reduced iron* en anglais), à 600 °C au lieu des 1500 °C usuels. Le procédé lui-même n'est pas nouveau: une partie de l'acier actuel est déjà fabriquée de cette façon en utilisant du gaz fossile, donc avec des émissions que l'emploi d'hydrogène propre, lui, permettrait d'éviter.

Les essais à Luleå furent si concluants que SSAB a avancé la date de fermeture de ses hauts-fourneaux de 2045 à 2030, explique Martin Pei. Étant donné la durée de vie des fonderies – plusieurs dizaines d'années –, les analystes jugent d'ailleurs que pour atteindre les objectifs de l'accord de Paris, la sidérurgie devrait immédiatement arrêter la construction de nouveaux hauts-fourneaux et commencer à les passer en réduction directe. Même si la plupart d'entre eux utilisent d'abord du gaz fossile, ils les convertiront à mesure que l'approvisionnement en H₂ augmentera au

cours des trois prochaines décennies. La tâche est cependant tellement immense que certaines organisations, dont BloombergNEF, prévoient que dans les années 2050, les hauts-fourneaux et la capture du carbone seront encore d'actualité.

UN PONT NOMMÉ « HYDROGÈNE »

Centrales électriques, construction, fabrication, transports...: à long terme, il est possible que la plus grande contribution de l'hydrogène au ralentissement du réchauffement climatique soit de servir de pont entre ces activités disparates, ce qui rendrait la décarbonation complète de toutes ces activités moins coûteuse que secteur par secteur, explique Christian Breyer, analyste des systèmes énergétiques à l'université de technologie de Lappeenranta-Lahti, en Finlande.

Dans cette intrication d'usages, la plus cruciale sera la production d'électricité. L'hydrogène aiderait à compenser une carence bien connue des énergies renouvelables: bien qu'abondantes, leur flux est inégal selon les heures et les saisons, et par conséquent souvent imprévisible. Planifier sur de longues durées est alors particulièrement ardu. Les chercheurs qui travaillent sur des simulations visant à équilibrer l'offre et la demande dans les futurs réseaux électriques doivent prévoir, par exemple, comment fournir de l'électricité lorsque les vents ne soufflent pas, qu'il n'y a pas de soleil et que l'hiver est glacial. Les scientifiques emploient un néologisme allemand pour qualifier ces moments compliqués: *Dunkelflaute* (*grosso modo*, «sombre encalminage»). Les

batteries aideront à équilibrer l'offre et la demande d'une heure à l'autre, mais une fois que la part de l'éolien et du solaire dépasse 80% du mix électrique d'un réseau, il devient extrêmement coûteux de le rendre résistant aux *Dunkelflauten*.

L'une des solutions envisagées consiste alors à construire assez d'éoliennes supplémentaires pour satisfaire la demande lors des hivers doux, puis à y recourir pendant la majeure partie de l'année pour produire de l'hydrogène mobilisable en cas de grand froid. Le volume de gaz inutilisé serait ensuite revendu à des clients industriels. En cas de météo dégradée, il servirait à produire du courant par combustion dans des turbines semblables à celles qui fonctionnent au gaz naturel, bien que ce soit un gaspillage considérable: le réseau ne récupérerait qu'un tiers, voire moins, de l'électricité initialement consommée pour fabriquer l'hydrogène.

Malgré sa polyvalence, l'hydrogène n'est pas pour autant la meilleure solution à tous les problèmes. Pour les voitures particulières, les batteries, plus efficaces et moins chères, ont déjà largement gagné la partie. Autre domaine d'application sans doute peu judicieux: le chauffage des habitations. Selon Rebecca Lunn, ingénieure civile à l'université de Strathclyde, à Glasgow, au Royaume-Uni, si l'hydrogène est gris (fabriqué, rappelons-le, à partir de gaz fossile), il ne fait qu'aggraver le réchauffement de la planète. Même vert, il serait jusqu'à six fois plus efficace d'utiliser l'électricité pour chauffer directement les maisons à l'aide, par exemple, de pompes à

chaleur. Pour réduire les émissions le plus rapidement possible, priorité devrait être donnée à l'amélioration de l'isolation des habitations.

Le boom annoncé n'est pas non plus sans poser de sérieuses questions. Par exemple, des besoins non satisfaits en hydrogène vert stimuleraient forcément la production de gaz aux couleurs moins vertueuses, avec comme effet pervers l'augmentation des émissions de CO₂.

Réorganiser l'économie autour de l'hydrogène aura aussi des répercussions sociales difficiles à éviter. Même avec des subventions et des investissements massifs, l'industrie lourde restera désavantagée dans certaines régions. L'hydrogène étant plus coûteux et plus délicat à transporter que le charbon, les usines, en particulier dans la sidérurgie, risquent d'être amenées à se rapprocher des sites où il sera produit à moindre coût, lesquels se trouvent parfois dans des pays différents. Bien que cette question et d'autres puissent ralentir le rythme de la transition, il n'y a plus de défis insolubles, selon Rebecca Dell, qui pilote le programme Industries à la fondation ClimateWorks. «Cette transition est tout à fait à la portée de nos capacités techniques et économiques, tant dans les pays à revenu élevé que dans les économies émergentes.» L'hydrogène a donc tout le potentiel d'une révolution universelle.

— L'auteur —

> **Davide Castelvechi** est reporter spécialisé en physique à la rédaction de *Nature*.

Cet article est la traduction de «*How the hydrogen revolution can help save the planet — and how it can't*», paru sur Nature.com le 16 novembre 2022.

— À lire —

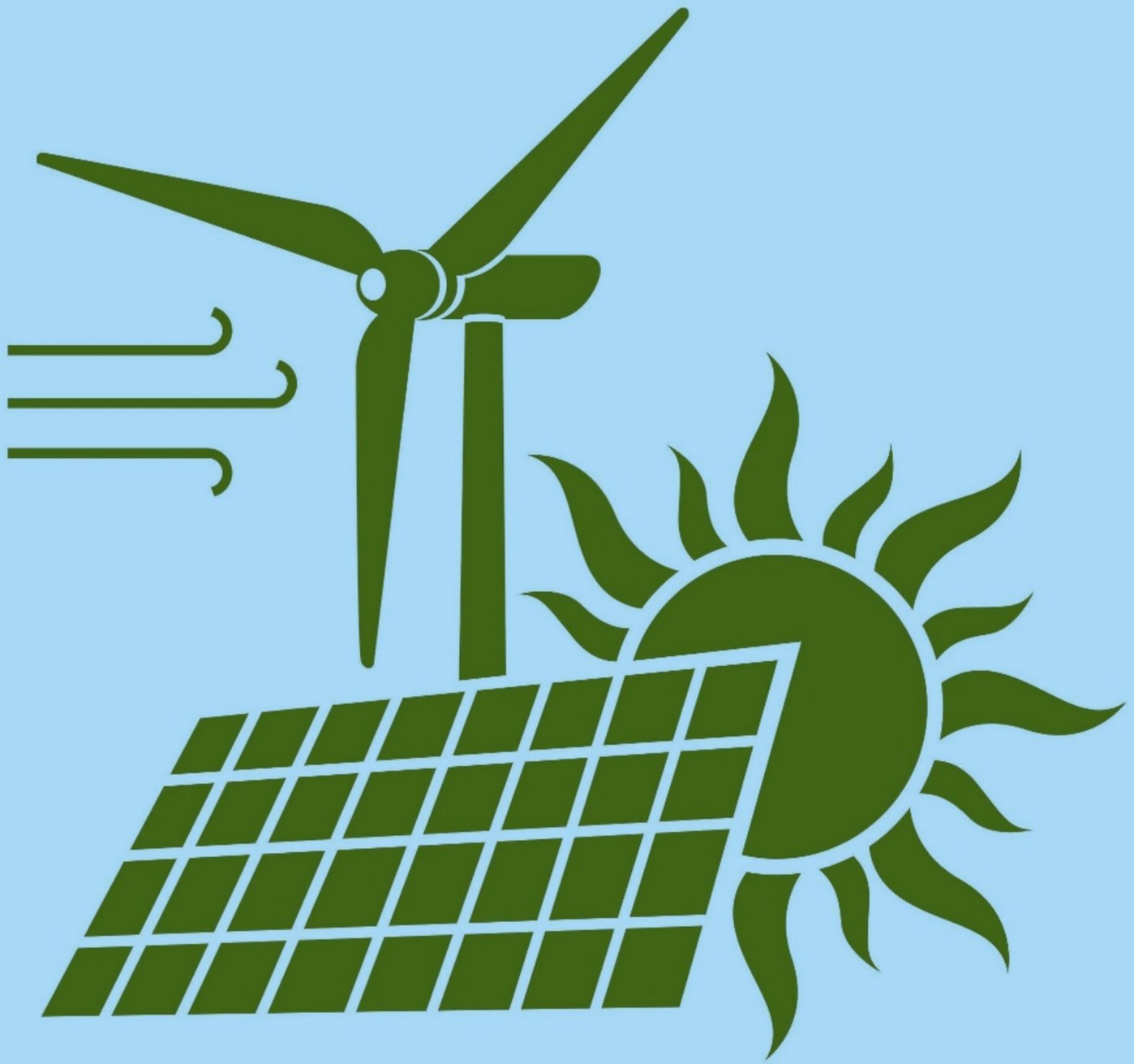
> **S. Griffiths et al.**, Industrial decarbonization via hydrogen: A critical and systematic review of developments, socio-technical systems and policy options, *Energy Research & Social Science*, vol. 80, 2021.

> **Agence internationale de l'énergie**, *Global Hydrogen Review 2021*, <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>

> **D. Kushnir et al.**, Adopting hydrogen direct reduction for the Swedish steel industry: A technological innovation system (TIS) study, *Journal of Cleaner Production*, vol. 242, 2020

L'avenir des renouvelables

Le soleil et le vent : ces ressources qui furent longtemps celles de nos ancêtres incarnent désormais le futur. Tous les scénarios élaborés pour 2050 voient la part de l'électricité s'envoler, et en particulier celle d'origine renouvelable. Peut-on encore en améliorer les rendements ? Dans le monde académique comme dans la recherche et le développement, on y travaille. Des minéraux très répandus, les pérovskites, donnent déjà des panneaux photovoltaïques plus performants – et ils le seraient encore davantage si on les déployait... dans l'espace ! Les éoliennes explorent la voie du gigantisme et de la pleine mer, cette mer dont le potentiel énergétique est si vaste. Mais tout cela n'arrivera-t-il pas trop tard ? Comme les climatologues l'ont démontré, c'est notre action dans les trente ans à venir qui déterminera le climat du reste du siècle.



02

Des matériaux récemment entrés en lice, les pérovskites, sont peut-être la clé de cellules photovoltaïques moins coûteuses et de meilleur rendement que les cellules au silicium d'aujourd'hui.

44

Photovoltaïque : la fin du silicium ?

Varun Sivaram, Samuel Stranks et Henry Snath



Des électrodes en or ornent une cellule photovoltaïque à pérovskite rouge, fabriquée par l'institut de technologie du Massachusetts. Cette cellule, moins épaisse que du papier, fait quelques millimètres.

À la nuit tombante, dans un bar japonais, l'étudiant Michael Lee griffonne une liste d'ingrédients sur un coin de nappe. Plus tôt dans cette journée de 2011, des scientifiques de l'université Toïo de Yokohama, au Japon, avaient généreusement fait part de leur recette pionnière pour fabriquer des cellules photovoltaïques à partir d'un matériau nouveau, la « pérovskite », en lieu et place de l'habituel silicium. Ces cellules convertissaient la lumière solaire en électricité avec un rendement énergétique de 3,8 % seulement, et personne n'y avait vraiment prêté attention, sauf Michael Lee...

De retour à l'université d'Oxford, où nous travaillions à l'époque, après quelques ajustements, il obtint la première cellule à pérovskite dont le rendement dépassait 10 %. Son succès déclencha l'équivalent, pour les énergies propres, d'une ruée vers le pétrole : une course aux records de rendement. Le dernier en date, pour de la pérovskite seule, établi en juin 2023 par l'université des sciences et technologies chinoises, est de 26,1 % ! Une multiplication par presque 7 en quelques années. Par comparaison, après des décennies de développement, le rendement des meilleures cellules photovoltaïques au silicium commercialisées plafonne autour de 20 % et atteint 47,1 % pour des systèmes destinés au spatial dits « multijonctions » et constitués d'un empilement de différents types de semi-conducteurs.

Les pérovskites sont intéressantes pour plusieurs raisons. Les ingrédients en sont abondants, et les chercheurs peuvent les combiner facilement et à bon marché, à basse température, pour produire des films. Ces derniers ont une structure

En bref

- > Des cellules photovoltaïques produites à partir de pérovskites concurrencent en matière de rendement des cellules au silicium.
- > Fabriquée à plus basse température, et moins chère, la pérovskite a de nombreux atouts.
- > Il reste néanmoins de grands défis à relever : empêcher l'eau de pénétrer dans la pérovskite, garantir le confinement du plomb utilisé, passer à des tailles très supérieures...
- > La solution est peut-être d'associer pérovskite et silicium en des cellules tandem.

cristalline proche de celle des couches de silicium obtenues, elles, au terme d'un coûteux traitement à haute température. Qui plus est, depuis 2013 et les travaux d'Olga Malinkiewicz, à l'université de Valence, en Espagne, une cellule en pérovskite est obtenue aisément par un processus proche d'une impression à jet d'encre qui s'évapore ensuite.

LA COURSE AU RENDEMENT

Mais pour concurrencer le silicium, les cellules à pérovskite devront surmonter certains obstacles notables, notamment gagner en stabilité et en résistance à l'eau, aux hautes températures et aux ultraviolets.

Les meilleures cellules au silicium ont aujourd'hui, en laboratoire, un rendement de 27,6 %. Pourquoi les cellules photovoltaïques ne peuvent-elles pas convertir 100 % de la lumière solaire ? Et en vertu de quoi les pérovskites feraient-elles mieux que le silicium ?

Les réponses se trouvent du côté de l'électron. Quand une cellule est dans le noir, les électrons du matériau restent liés à leurs atomes. Aucune électricité ne circule. Mais quand de la lumière frappe une cellule, elle libère certains des électrons. « Excités » car dotés d'énergie supplémentaire, ils traversent chaotiquement le réseau cristallin de la cellule jusqu'à en ressortir à une extrémité (par une électrode sous forme de courant utile), ou bien rencontrer un obstacle ou un piège, leur énergie se perdant alors sous forme de chaleur.

Plus la qualité du cristal est élevée, moins il y a de défauts susceptibles d'entraver l'électron. Les

Les ingrédients des pérovskites sont abondants, bon marché, façonnables à basse température...

cellules au silicium sont généralement chauffées jusqu'à 900 °C pour éliminer les défauts dont les pérovskites sont largement dépourvues, alors même qu'elles sont traitées à bien plus basse température, autour de 100 °C. Il en résulte que les électrons excités par la lumière réussissent aussi bien à sortir des cellules à pérovskite. La puissance électrique d'une cellule étant le produit du flux d'électrons sortant de cette cellule (l'intensité du courant) et de l'énergie que transportent ces électrons (la tension), les pérovskites ont un rendement qui rivalise avec celui du silicium, tout en étant plus facile à produire.

Mais il y a une limite à la quantité d'énergie solaire qu'une cellule constituée de semi-conducteurs comme le silicium ou les pérovskites est capable de convertir en puissance électrique. C'est essentiellement parce que les semi-conducteurs ont une bande d'énergies interdites aux électrons, ou « gap », dont la hauteur (en énergie) correspond à l'énergie minimale nécessaire pour libérer les électrons. Le rayonnement solaire réunit toutes les longueurs d'onde, mais seules certaines correspondent à des photons d'énergie supérieure au gap, qui peuvent donc être absorbés et exciter un électron. Les photons des autres longueurs d'onde traversent simplement le matériau sans aucun effet, ce qui explique le faible rendement.

La bande interdite varie selon le semi-conducteur et définit un compromis fondamental : plus le gap est étroit, plus la cellule est en mesure d'absorber de lumière solaire susceptible d'exciter les électrons, mais plus l'énergie de chaque électron sera basse. Comme la puissance électrique dépend à la

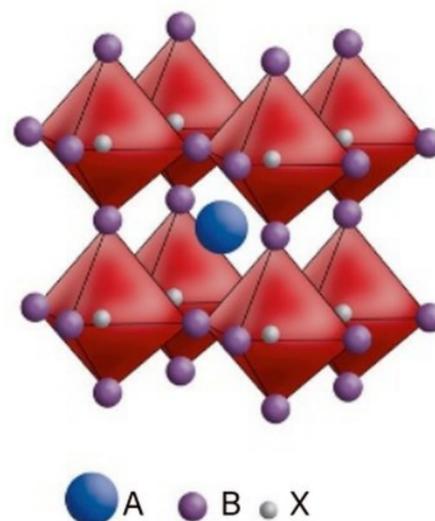
fois du nombre et de l'énergie des électrons, même une cellule photovoltaïque ayant la bande interdite idéale ne convertira que 33,7% environ de l'énergie solaire : c'est la limite de Shockley-Queisser.

Le silicium a une bande interdite fixe qui n'est pas idéale, mais il domine l'industrie de l'énergie solaire parce que les processus de fabrication associés sont bien compris et efficaces. Toutefois, avec des pérovskites, les chercheurs ont la possibilité d'ajuster la bande interdite en jouant sur le mélange des ingrédients. Une autre option est de superposer des pérovskites dotées de bandes interdites différentes et ainsi de crever le plafond des 33,7 % ; selon certaines projections, le rendement pourrait atteindre 46 %.

LE MATÉRIAU MIRACLE ?

Les minéralogistes connaissent depuis le XIX^e siècle les formes naturelles de pérovskite présentes dans la croûte terrestre. De tels matériaux ont fait leur entrée dans le domaine de la supraconductivité à haute température en 1988. Ces dernières décennies, les ingénieurs ont également fait de l'électronique expérimentale avec des pérovskites artificielles, mais d'abord sans penser à l'utilisation potentielle de ce matériau dans des cellules photovoltaïques.

Enfin, en 2009, l'équipe de Tsutomu Miyasaka, à l'université Toin, a transformé une pérovskite à base d'halogénure de plomb, synthétisée pour la première fois en 1978, en cellule photovoltaïque. Les chercheurs ont étalé une solution de diverses substances chimiques sur une lame de verre avant de la sécher. Le processus laisse une pellicule nanométrique de cristaux



La structure cristalline d'une pérovskite cubique. Dans les pérovskites intéressantes pour les cellules photovoltaïques, le cation (ion positif) A est généralement l'ion méthylammonium CH_3NH_3^+ , le cation B est du plomb (Pb^{2+}) et l'anion X est un ion halogénure (en général un iodure, I^- , mais parfois aussi un chlorure, Cl^- , ou un bromure, Br^-).

Une solution pour rendre compétitives et plus performantes les pérovskites consiste à les associer au... silicium

de pérovskite à la surface de la lame. Ce film mince libérait des électrons quand il absorbait de la lumière, mais peu efficacement. Ils ont alors ajouté de minces couches de matériau de part et d'autre des cristaux de pérovskite afin d'améliorer le transfert des électrons.

Les premières de ces cellules minuscules n'avaient, nous l'avons dit, qu'un rendement de 3,8 % et se détérioraient en quelques heures. Depuis, grâce notamment aux travaux des équipes de Michael Grätzel, de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), et de Nam-Gyu Park, de l'université Sungkyunkwan, en Corée, les progrès sont constants sur les deux plans.

48

S'INSCRIRE DANS LA DURÉE

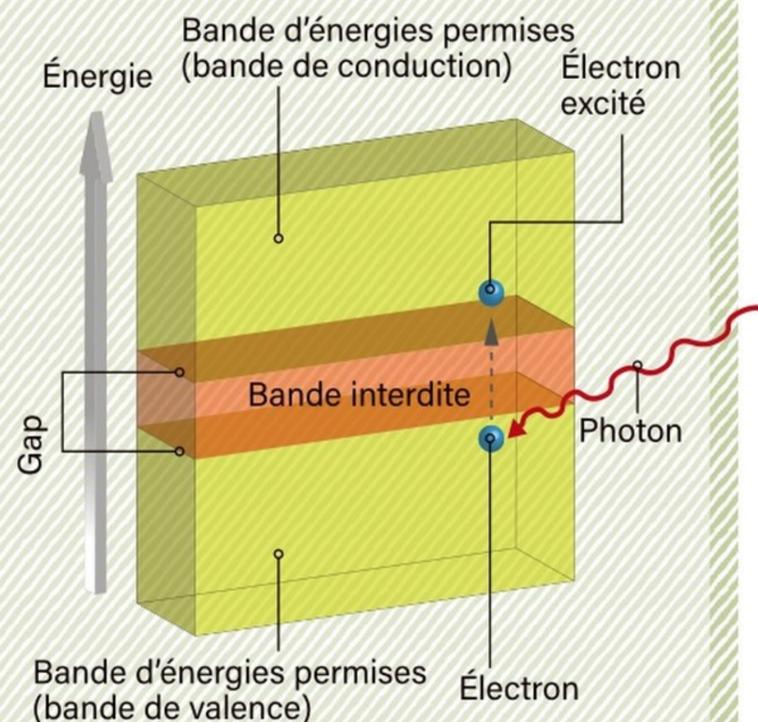
Ils ont en particulier été réalisés grâce à quelques innovations astucieuses dans le processus de dépôt et la création d'une pellicule cristalline sans défauts. Dès 2014, une équipe dirigée par Sang Il Seok, de l'Institut coréen de recherche en technologie chimique, avait ainsi conçu une méthode, fondée sur l'utilisation de solvants particuliers, qui produit une pellicule cristalline de haute qualité. En optimisant le traitement, le groupe a battu successivement plusieurs records de rendement !

Depuis, des techniques différentes ont vu le jour, certaines fonctionnant à température ambiante, d'autres recourant à des composés à l'état de vapeur. L'un des enjeux était également d'obtenir des cellules de plus en plus étendues, sans en réduire les performances.

Des chercheurs ont simplifié l'arrangement en couches des matériaux, ou bien ont chauffé la solution et la lame de verre sur laquelle elle est

Franchir un gap

Dans un semi-conducteur, les électrons les plus énergétiques remplissent la bande de valence, séparée de la bande de conduction par un « gap ». En absorbant un photon d'énergie supérieure au gap (donc de longueur d'onde suffisamment petite), un électron de la bande de valence peut passer dans la bande de conduction. Il devient ainsi mobile et peut participer à un courant électrique. C'est sur ce principe que fonctionnent les cellules photovoltaïques.



déposée, formant ainsi des cristaux beaucoup plus gros que ceux des cellules initiales. D'autres encore mettent au point de nouvelles caractéristiques. En faisant varier les proportions des éléments chimiques, on peut fabriquer des cellules avec une légère nuance jaune ou une touche de pourpre. En déposant la pérovskite sur le verre en îlots plutôt qu'en une seule couche mince, on parvient à des pellicules opaques ou transparentes, ou entre les deux.

Toutes ces options (un éventail de choix bienvenu après les cellules au silicium rigides, opaques et invariablement bleu-noir) aideront les architectes à concevoir des lucarnes, fenêtres et façades qui intègrent des films photovoltaïques à pérovskite.

La stabilité des cellules à pérovskite reste sans doute leur talon d'Achille. En effet, les pérovskites sont sensibles notamment à l'humidité. C'est souvent le fait de la partie organique du composé, car elle est soluble. Il faut donc les enchâsser de façon étanche. Les cellules que nous avons produites en atmosphère inerte et encapsulées dans une résine époxy contenant des nanotubes de carbone ont fonctionné de manière stable pendant plus de 1000 heures sous une exposition continue à la lumière. En 2017, le groupe de l'EPFL a réussi à construire une cellule qui est restée stable pendant une année, dans des conditions d'utilisations particulières. En 2019, une cellule à pérovskite de l'équipe de l'Institut japonais des sciences des matériaux, à Ibaraki, a fonctionné en continu pendant 4000 heures éclairée par un simulateur de soleil au xénon, ce qui constitue un record de stabilité.

En 2023, à nouveau le groupe de l'EPFL, en collaboration avec Edward Sargent, de l'université de Toronto, et Kenneth Graham, de l'université

du Kentucky, le groupe de Michael Grätzel a trouvé un moyen d'augmenter considérablement la stabilité à haute température des cellules à pérovskites. Leur idée ? Incorporer des halogénures d'aniliniums fluorés, une classe de composés utilisés dans les produits pharmaceutiques et agrochimiques. Ces molécules, en réduisant l'apparition de défauts entre les différentes couches ou matériaux de la cellule, améliorent l'efficacité et la stabilité globales. Les scientifiques ont obtenu un rendement certifié presque constant de 24,09 % pendant 1560 heures (environ 65 jours) à une température de 85 °C, avec une humidité relative de 50 % et une illumination équivalente à celle du soleil par ciel clair à midi.

Mais la norme industrielle pour les panneaux solaires, basée sur la technologie au silicium, est une garantie de vingt-cinq ans. Cela équivaut à 54000 heures sous un soleil intense et constant. Il reste du chemin à parcourir...

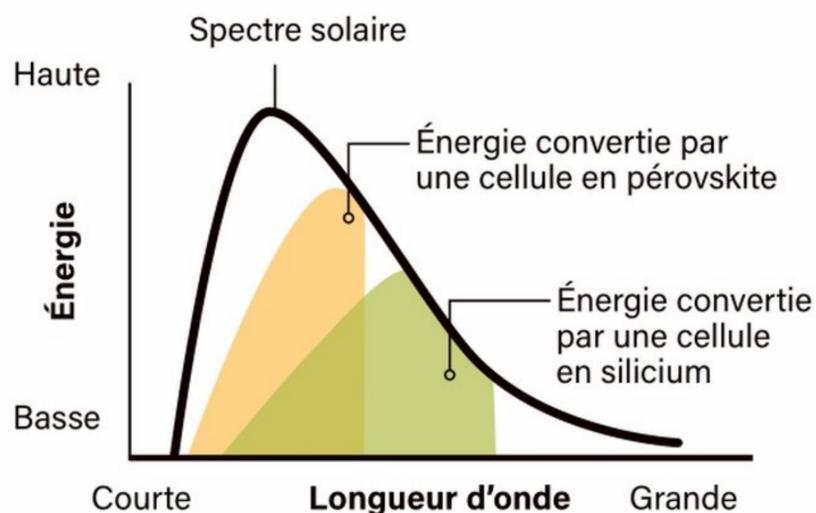
ÉVITER LE PLOMB DANS LE PANNEAU

Par ailleurs, il ne faut pas seulement empêcher l'humidité de pénétrer dans la cellule. On doit aussi empêcher le contenu de celle-ci d'en sortir, en raison de la petite quantité de plomb qu'elle contient. Cet élément est toxique, et il importe que ces cellules soient sans danger. Pour trouver l'inspiration, les chercheurs peuvent là encore se tourner vers un matériau solaire alternatif, le seul en dehors du silicium à s'être taillé un succès commercial sérieux : le tellurure de cadmium (CdTe).

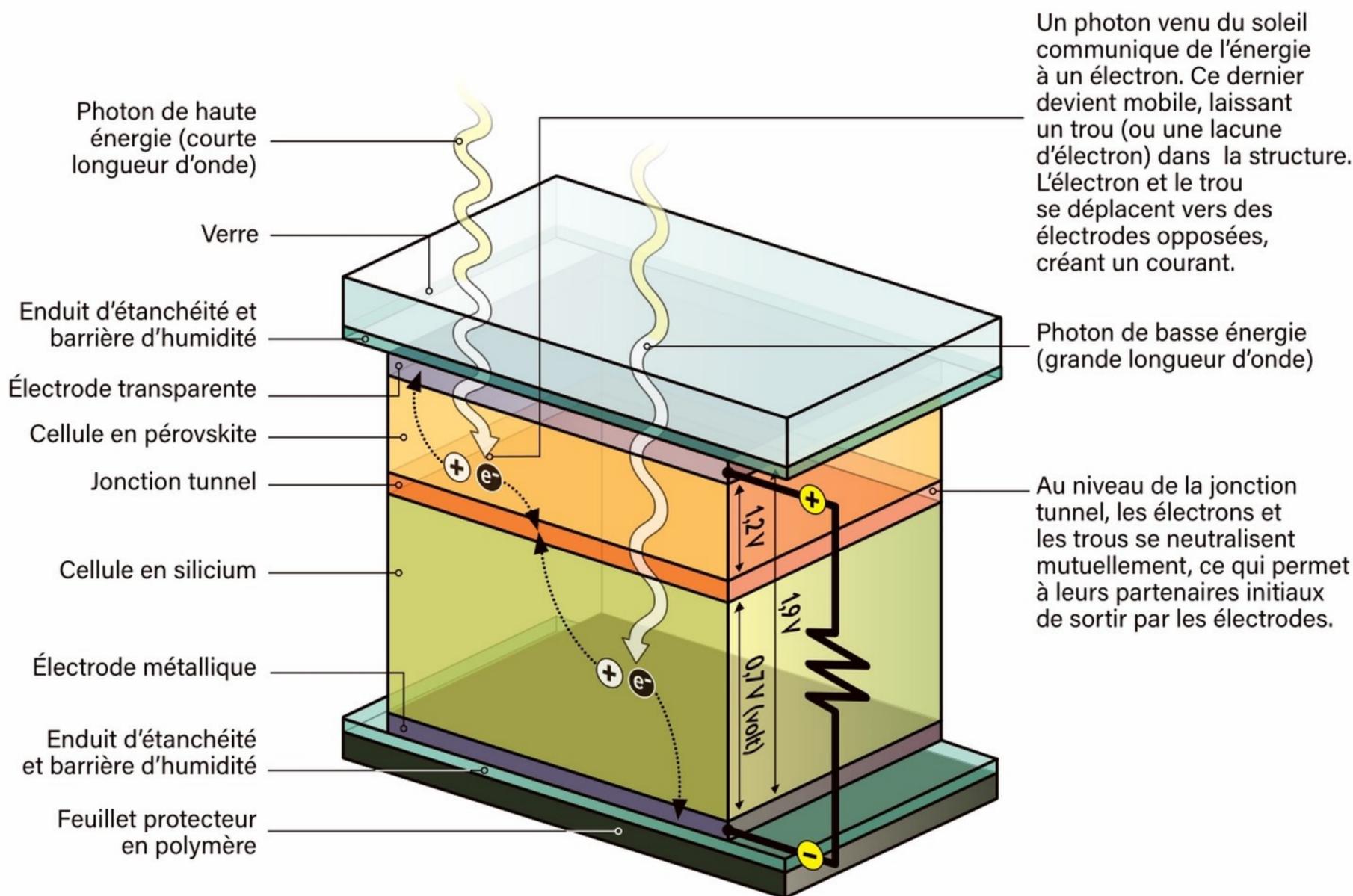
Fabriqués par la société américaine First Solar, les panneaux à CdTe ont été déployés dans le monde entier et ont largement satisfait aux normes

**POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DU PLOMB
DANS LES CELLULES, UNE IDÉE
CONSISTE À UTILISER DES POLYMÈRES
« AUTOCICATRISANTS »,
CES COMPOSÉS SYNTHÉTIQUES QUI
SE RÉPARENT AUTOMATIQUÉMENT APRÈS
AVOIR SUBI DES DOMMAGES**

EN TANDEM, C'EST PAS IDEM



Plutôt que de se concurrencer commercialement, les cellules photovoltaïques au silicium et à pérovskite auraient à gagner en se complétant afin de convertir la lumière du soleil en électricité avec un meilleur rendement que celui atteint séparément par ces technologies. Dans une cellule en tandem (*ci-dessous*), une couche de pérovskite et une autre de silicium sont connectées. La pérovskite et le silicium convertissent des longueurs d'onde différentes de la lumière solaire (*ci-contre*), et leur association exploite donc une plus grande plage du spectre.



Un photon venu du soleil communique de l'énergie à un électron. Ce dernier devient mobile, laissant un trou (ou une lacune d'électron) dans la structure. L'électron et le trou se déplacent vers des électrodes opposées, créant un courant.

Photon de basse énergie (grande longueur d'onde)

Au niveau de la jonction tunnel, les électrons et les trous se neutralisent mutuellement, ce qui permet à leurs partenaires initiaux de sortir par les électrodes.

de sécurité malgré la présence de cadmium, élément plus toxique que le plomb. C'est que les panneaux proposés seraient tellement étanches qu'aucun atome de cadmium ne s'en échapperait, même en cas d'incendie à 1000 °C. Toutefois, ils utilisent un substrat de verre, qui exclut la flexibilité et la légèreté promises par les pérovskites.

On doit un autre développement relatif au plomb à Angela Belcher, de l'institut de technologie du Massachusetts (MIT). Avec ses collègues, elle a montré que le plomb des batteries automobiles, lors d'une phase de recyclage, est exploitable pour faire des cellules à pérovskites. Ce pourrait être un atout environnemental important.

Et en 2022, Hong Zhang, de l'EPFL, a quant à lui proposé un nouveau protocole de fabrication de cellules à pérovskite qui réduit de 70 % les quantités de plomb libérées lors de la production.

L'idéal reste d'éliminer le plomb, et plusieurs équipes s'y emploient. La nôtre, ainsi qu'une autre de l'université Northwestern, dans l'Illinois, étudie le remplacement du plomb par de l'étain. Mais le rendement et la stabilité sont moins bons, parce qu'avec le temps l'étain, en s'oxydant, a tendance à faire perdre à la pérovskite sa structure cristalline, ce qui freine la circulation des électrons.

D'autres tentatives ont été faites avec du germanium, sans guère de succès. En revanche, l'association de l'étain et du germanium semble plus prometteuse, comme l'ont montré en 2019 Nitin Padture, de l'université Brown, à Providence, aux États-Unis, et ses collègues. D'autres travaux portent sur le couple bismuth/antimoine.

L'encapsulation, déjà évoquée, est une autre piste pour résoudre le problème du plomb. Ici, il s'agirait d'utiliser des polymères dits « autocicatrisants », ces composés synthétiques qui se réparent automatiquement après avoir subi des dommages. C'est ce qu'a fait l'équipe de Yabing Qi, de l'université d'Okinawa, dans une étude publiée en 2019.

LA SOLUTION TANDEM

Une autre solution pour rendre compétitives et plus performantes les pérovskites consiste à les associer au... silicium. L'idée initiale revient à des chercheurs de l'université Stanford et du MIT qui ont imaginé de superposer une couche de pérovskite à une couche de silicium pour former une cellule dite « en tandem » qui profite des avantages des deux matériaux. On distingue les

cellules dites « 4 terminaux », lorsque les couches sont disjointes et reliées séparément à un circuit électrique, et celles « 2 terminaux », quand les couches se touchent et sont montées en série sur le même circuit. De fait, les pérovskites sont performantes pour exploiter les couleurs de plus haute énergie de la lumière solaire, tels le bleu et l'ultraviolet, que le silicium ne capture pas, ce qui permet d'obtenir une tension plus élevée. Selon des estimations, le rendement d'une telle cellule en tandem est susceptible de dépasser les 30 %, sans changement radical de l'une ou l'autre technologie. Et en effet, en 2020, l'équipe d'Edward Sargent a obtenu un rendement de 28,2 % avec une cellule « 4 terminaux ». La même année, notre groupe a atteint 29,52 % !

La recherche sur ces produits innovants n'en est qu'à ses débuts, et les records vont se succéder. Avec les pérovskites, les scientifiques sont comme des enfants : ils ont trouvé un matériau dont les propriétés remplissent presque toutes les exigences de leur cahier des charges, notamment le haut rendement, le bas coût, la légèreté, la flexibilité et l'esthétique. Mais seul un effort concerté et mondial de la recherche, de l'industrie et des gouvernements aidera à concrétiser pleinement le potentiel des pérovskites et à nous emmener au-delà du silicium. Le jeu en vaut la chandelle étant donné l'enjeu, une énergie propre, bon marché.

— Les auteurs —

> Varun Sivaram

ancien membre du cercle de réflexion américain Council on Foreign Relations, est vice-président et chef de la stratégie et de l'innovation de la société Ørsted, au Danemark.

> Samuel Stranks

est professeur d'optoélectronique à l'université de Cambridge, au Royaume-Uni.

> Henry Snaith

est professeur de physique à l'université d'Oxford, au Royaume-Uni, et fondateur, entre autres, d'Oxford PV.

— À lire —

> **A. Caiazza et al.**, 3D perovskite passivation with a benzotriazole-based 2D interlayer for high-efficiency solar cells, *Acs Applied Energy Materials*, 2023.

> **S. Min Park et al.**, Engineering ligand reactivity enables high-temperature operation of stable perovskite solar cells, *Science*, 2023.

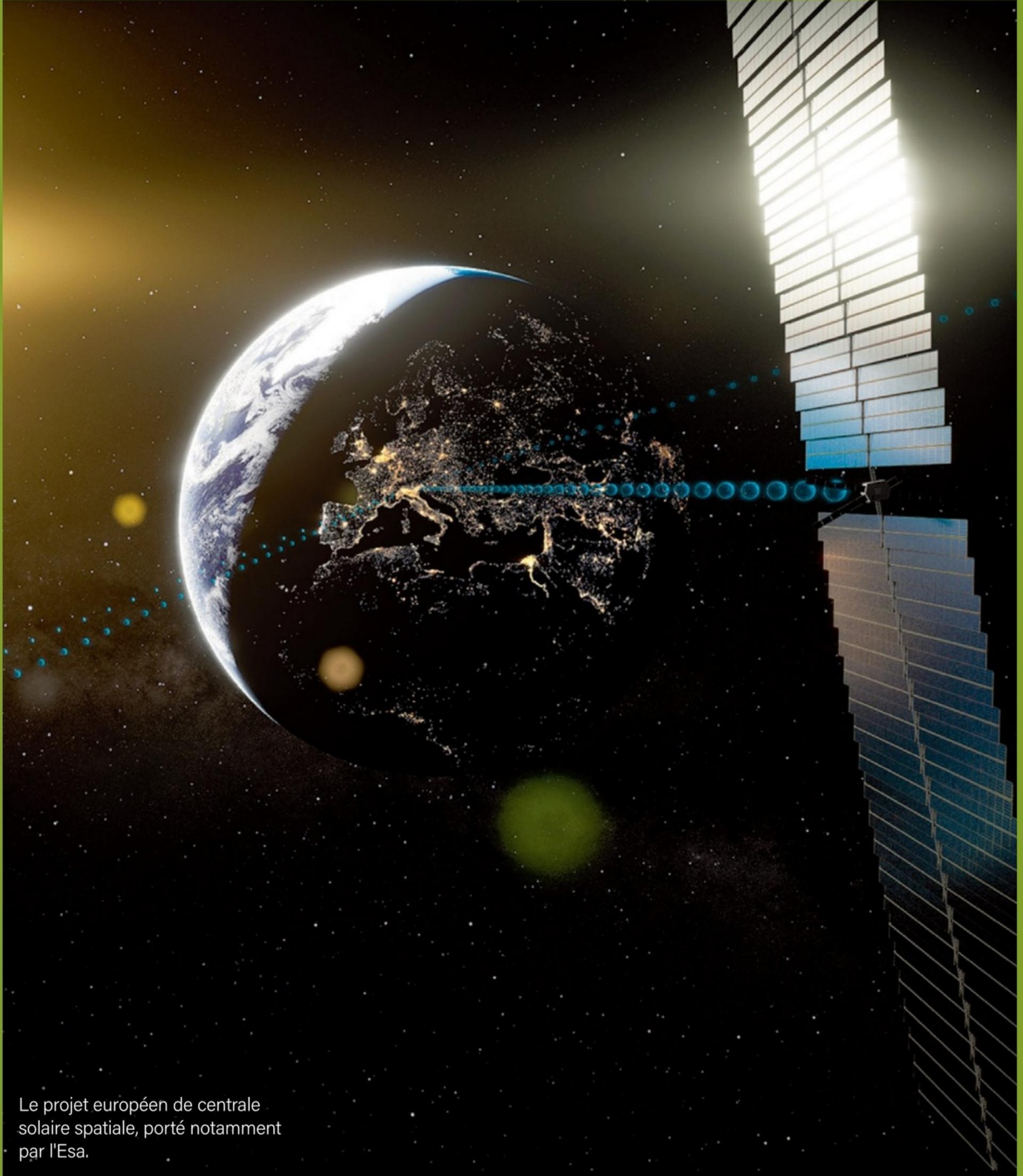
> **A. Al-Ashouri et al.**, Monolithic perovskite/silicon tandem solar cell with > 29 % efficiency by enhanced hole extraction, *Science*, 2020.

Récupérer l'énergie solaire dans l'espace plutôt que sur Terre, c'est le pari de nombreux chercheurs partout dans le monde. Projet fou ou solution d'avenir?

52

Le solaire prend de la hauteur

Leonard David



Le projet européen de centrale
solaire spatiale, porté notamment
par l'Esa.

En bref

> Les centrales solaires spatiales consistent en des satellites qui récupérerai-ent l'énergie solaire et la transmettraient sur Terre, ou ailleurs, sous la forme de microondes.

> De nombreux projets de démonstration sont en cours dans divers pays: États-Unis, Chine, Japon, Europe...

> Une question demeure: une telle énergie sera-t-elle un jour compétitive, notamment comparée au solaire « classique » ?

54

Lorsque Charles Fritts inventa les premières cellules photovoltaïques dans les années 1880, on aurait pu s'attendre à une révolution dans la production mondiale d'électricité. Après tout, il n'existe pas de source d'énergie moins chère, plus propre et plus universelle que la lumière du Soleil. Pourtant, malgré des progrès considérables (et continus) qui rendent l'énergie solaire toujours plus performante et abordable, quelque cent quarante ans plus tard, elle ne fournit toujours qu'à peine 5% de l'électricité mondiale... C'est que l'énergie solaire souffre tout de même de quelques inconvénients qui freinent son expansion, à commencer par le fait qu'en permanence la moitié de la planète est plongée dans l'obscurité.

En 1968, peut-être inspiré par la nouvelle *Raison*, publiée en 1941 par Isaac Asimov, l'ingénieur américain Peter Glaser proposa une solution qui sortait totalement des sentiers battus: placer les cellules photovoltaïques sur des flottes de satellites en orbite! Là-haut, au-dessus des nuages et libérée des cycles nyctéméraux, la lumière du Soleil est disponible à foison. Il suffirait de la récolter, puis de la convertir en une énergie transmissible, en l'occurrence sous la forme de microondes ou de lasers, vers des «antennes redresseuses» (en anglais *rectennas*, pour *rectifying antennas*) installées sur Terre et capables de transformer de l'énergie des rayonnements électromagnétiques en courant continu. De là, l'électricité serait acheminée vers les réseaux électriques du monde entier.

Pendant longtemps, le coût des lancements spatiaux et les performances des systèmes

photovoltaïques ont empêché que l'idée lumineuse de Peter Glaser devienne réalité. Ce n'est plus le cas et, désormais, le concept de centrales solaires spatiales (CSS, ou en anglais SBSP, pour *Space-Based Solar Power Project*) connaît un nouvel élan qui se traduit par de nombreux projets aux États-Unis, en Chine, au Japon, en Europe...

VERS L'AVENIR ET AU-DELÀ

Aux États-Unis, motivée par l'essor de l'industrie spatiale et par les menaces liées au changement climatique, la Nasa examine de près les CSS. Nikolai Joseph, analyste à l'agence américaine et auteur principal d'un rapport sur le sujet, après avoir rappelé les coûts longtemps prohibitifs du concept, confirme qu'aujourd'hui «la donne a changé. Il est important de revisiter régulièrement les bonnes idées et de garder ouvertes toutes les options. La Nasa doit étudier ce qu'il est possible de faire, car l'avènement des CSS recouperait bon nombre de ses autres intérêts. Nous devons suivre attentivement tous les aspects de la technologie spatiale et toujours être tournés vers l'avenir».

Pour la Nasa, cet avenir impliquera peut-être l'utilisation de CSS au-delà de la Terre, en soutien au programme *Artemis* d'exploration lunaire avec équipage. Ainsi, une centrale solaire autour de la Lune aiderait à alimenter en énergie les avant-postes habités et les diverses activités d'exploration de notre satellite. Plus ambitieux encore, l'énergie rayonnée serait à même de remplacer le propergol des vaisseaux spatiaux

pour les envoyer vers des destinations interplanétaires, voire interstellaires.

Sur Terre, certains voient dans les CSS le moyen idéal de réduire à zéro les émissions de gaz à effet de serre tout en bénéficiant d'une alimentation électrique régulière, durable et abondante. Contrairement à l'énergie solaire et éolienne au sol, intermittentes par définition, les CSS fonctionneraient vingt-quatre heures sur vingt-quatre tout en permettant une distribution souple et réactive de l'électricité à travers et entre les réseaux électriques.

C'est ce qui en fait «une nouvelle technologie d'énergie propre très précieuse» aux yeux de Martin Soltau, coprésident de la britannique Space Energy Initiative (SEI). Autre avantage selon lui, «cette source d'énergie ne nécessite aucun réaménagement des réseaux électriques. Nous envisageons de placer des rectennas à proximité des interconnexions de réseau existantes, potentiellement à côté des parcs éoliens offshore». La SEI est un partenariat entre le gouvernement, l'industrie et le monde universitaire dont l'objectif est une flotte de CSS reliée au réseau électrique du Royaume-Uni d'ici aux années 2040. Chacun des engins produirait à peu près autant d'électricité qu'une centrale à charbon ou nucléaire.

Cependant, il y a loin de la coupe aux lèvres, et, avant toute chose, de nombreux essais sont indispensables. C'est pourquoi la SEI a l'intention de lancer d'abord un démonstrateur orbital d'ici à 2030. «Les deux technologies principales à tester dans l'espace sont l'assemblage robotique

autonome de ces grandes structures et la transmission d'énergie vers la Terre à des niveaux significatifs, explique Martin Soltau. Mais de nombreuses autres questions restent importantes, notamment sur la réglementation et le spectre de rayonnements à adopter», ajoute-t-il.

ESSAIS DE HAUTE TECHNOLOGIE

La SEI n'est pas la seule sur le chemin des CSS. De nombreux projets sont en cours, et certains sont plus avancés. Ainsi, l'université Xidian, en Chine, et l'Académie de technologie spatiale du pays s'intéressent aux technologies de concentration de la lumière du Soleil et de transmission d'énergie sans fil dans le cadre du projet *Zhuri*, que l'on peut traduire par «À la poursuite du Soleil». Il consiste en une tour d'acier de 75 mètres de hauteur équipée en son sommet d'un dispositif de collecte d'énergie solaire, l'Orb-Shape Membrane Energy Gathering Array (Omega), destiné à être placé un jour en orbite géostationnaire.

Citons également l'initiative *Solaris*, de l'Esa, approuvée par le Conseil de l'Agence spatiale européenne au niveau ministériel en novembre 2022. Ce programme de recherche et de développement sur trois ans a pour but d'explorer en détail le concept de CSS. En juillet 2023, la société Thales Alenia Space a été sélectionnée pour mener l'étude de faisabilité et de viabilité du projet *Solaris*.

De leur côté, les chercheurs de l'Agence japonaise d'exploration aérospatiale (Jaxa) étudient

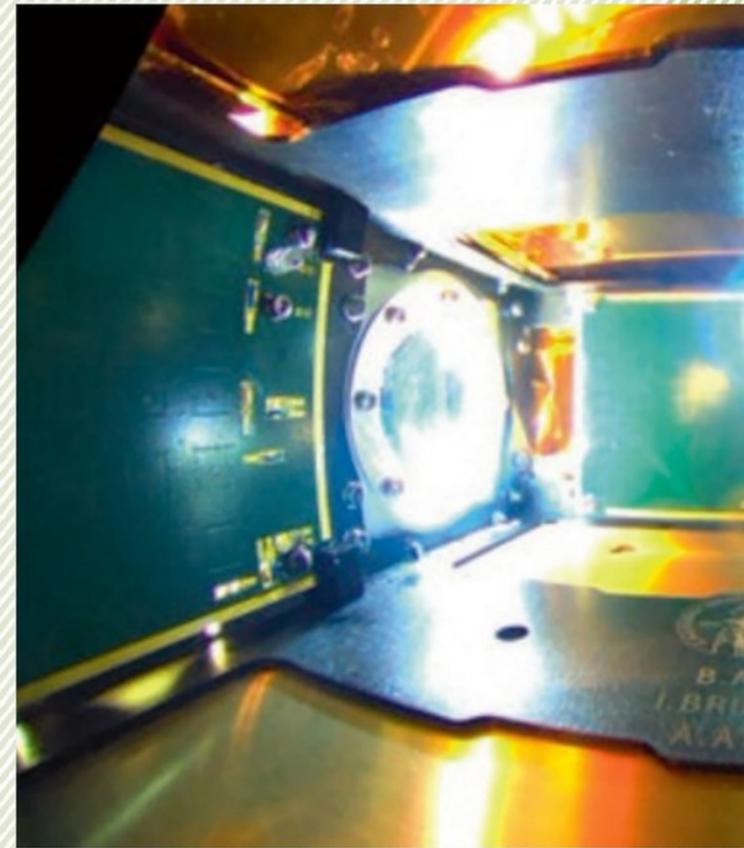
Une centrale solaire autour de la Lune
aiderait à alimenter en énergie les installations
habitées et les diverses activités
d'exploration de notre satellite

Un test grandeur nature

En juin 2023, l'équipe du *Space-Based Solar Power Project*, de l'institut de technologie de Californie, a démontré pour la première fois la faisabilité du concept de CSS. En effet, ils ont réussi à récupérer sur Terre de l'énergie d'origine solaire, envoyée par l'instrument Maple (pour Microwave Array for Power-transfer Low-orbit Experiment).

Le dispositif est l'un des trois composants du *Space Solar Power Demonstrator (SSPD-1)* placé en orbite le 3 janvier 2023. L'enjeu a surtout consisté, d'une part, à coordonner les différentes

antennes émettrices souples de Maple et, d'autre part, à composer avec les interférences des ondes envoyées vers la Terre, de façon que la majeure partie de l'énergie transmise atteigne bien le récepteur au sol (sur le toit de l'un des bâtiments du laboratoire) en une quantité suffisante pour être détectable. Les deux autres instruments sont Alba et Dolce. Le premier est un ensemble de différents types de cellules photovoltaïques afin de les tester dans l'espace. Le second est destiné à évaluer la possibilité d'une grande centrale orbitale modulaire de l'ordre du kilomètre. Les résultats de ces deux expériences sont attendus dans les prochains mois.



56

les CSS depuis les années 1980 et espèrent voir aboutir leurs travaux d'ici à une ou deux décennies. Ils ont déjà à leur actif une technologie qui améliore la précision des faisceaux d'énergie émis vers la Terre et quelques vols suborbitaux destinés à recueillir des données techniques sur des composants des CSS.

Aux États-Unis, outre la Nasa, le ministère de la Défense s'intéresse aussi de près aux CSS pour alimenter les opérations militaires et les forces expéditionnaires dans le monde entier. Ainsi, le laboratoire de recherche de l'armée de l'air, en coopération avec la société aérospatiale Northrop Grumman et le laboratoire de recherche navale (NRL), a récemment effectué le premier test au sol de l'équipement Arachne. Celui-ci, dont le lancement est prévu pour 2025, a notamment pour mission de démontrer la capacité de former et de focaliser un faisceau de radiofréquences en orbite terrestre basse. Toujours aux États-Unis, une équipe de l'institut de technologie de Californie a réussi en juin 2023 le premier test grandeur nature d'une CSS (voir l'encadré ci-dessus).

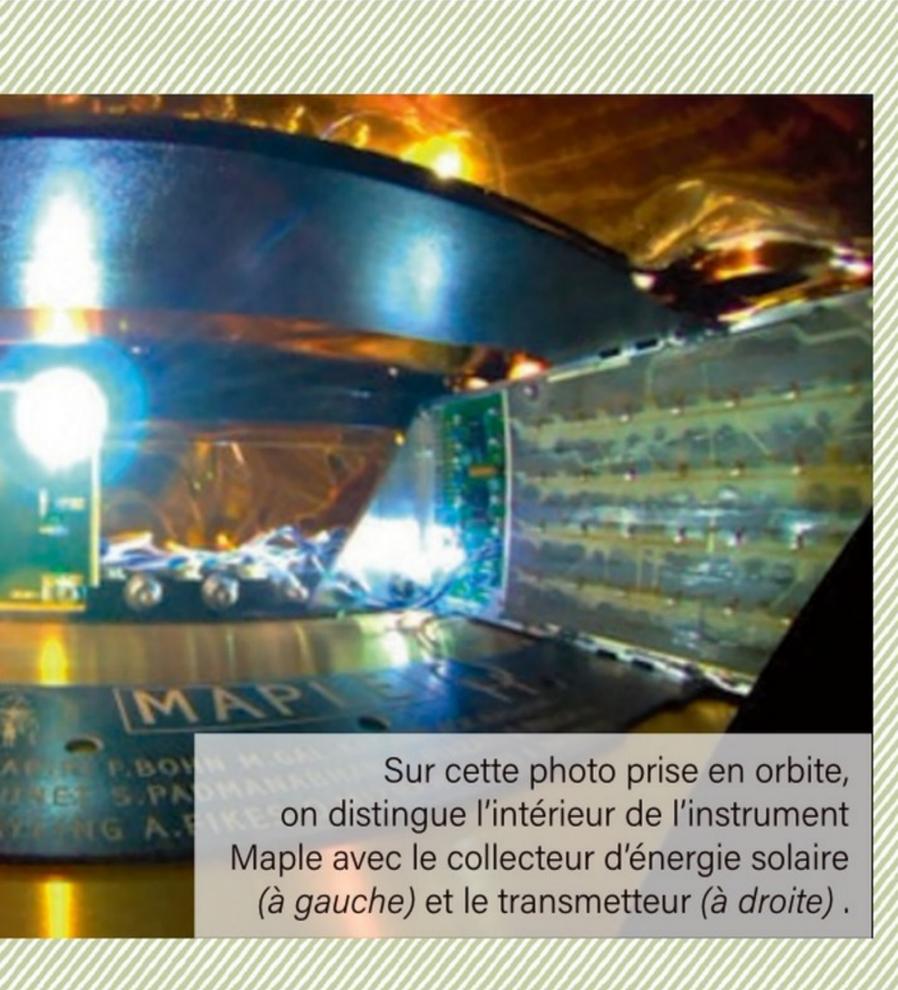
Entre-temps, le NRL a mis au point des modules spécialisés conçus afin d'accroître

l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire en microondes. Un appareil intégrant ces modules a même passé plus de neuf cents jours dans l'espace à bord de l'avion spatial robotisé X-37B, de l'armée de l'air américaine.

FLUX ET REFLUX

Selon Paul Jaffe, du NRL, l'intérêt pour le sujet a fluctué au fil des ans. «L'objection historique aux CSS est d'ordre économique, explique-t-il. Je pense que le verdict n'est pas encore tombé sur le bien-fondé de cette idée. Il reste encore beaucoup à faire en termes de développement, d'essais... pour le prouver.»

Aussi les expérimentations actuelles sont-elles justifiées et judicieuses, avant de s'engager plus avant dans le développement de systèmes complets. Ces essais, note-t-il, coûteront probablement des centaines de millions de dollars et, même avec un tel financement de départ, les CSS nécessiteront un fort soutien politique inscrit dans la durée. «En fin de compte, résume-t-il, il s'agit de faire en sorte que les coûts soient compétitifs par rapport aux autres solutions.»



Sur cette photo prise en orbite, on distingue l'intérieur de l'instrument Maple avec le collecteur d'énergie solaire (à gauche) et le transmetteur (à droite).

Militant de longue date des CSS, John Mankins, ancien de la Nasa et actuel coprésident du comité permanent sur l'énergie solaire spatiale de l'Académie internationale d'astronautique, reste néanmoins optimiste.

Par le passé, les projets de CSS ont été freinés par trois obstacles financiers: le coût de la construction du matériel, celui de son adaptation à l'environnement spatial et enfin celui de sa mise en orbite. Mais ces obstacles sont en passe d'être levés veut croire John Mankins pour qui la réduction drastique des investissements nécessaire a fait entrer les CSS dans une nouvelle ère de viabilité économique. Ce serait suffisant pour susciter l'intérêt et l'engagement des multinationales.

Tout le monde n'est pas de cet avis. Amory Lovins, fondateur du RMI (Rocky Mountain Institute), un centre de recherche et d'études américain sur l'énergie, et professeur à l'université Stanford, est l'un des principaux critiques des CSS. Il pense que les coûts de lancement «restent un obstacle redoutable», même si le prix du lancement par kilogramme de charge utile vers l'orbite terrestre basse a été divisé par vingt, notamment depuis l'arrivée sur le marché de SpaceX.

La sécurité reste encore problématique explique-t-il également, en se souvenant des questions soulevées durant la première vague d'enthousiasme pour les CSS à la fin des années 1960: «À l'époque, certains se demandaient si des armes spatiales à microondes n'étaient pas à l'ordre du jour. Aujourd'hui, nous sommes peut-être plus préoccupés par l'ajout d'une nouvelle source d'énergie supercentralisée à un réseau de distribution déjà vulnérable et fragile.»

Le concept de CSS reste selon Amory Lovins attrayant, mais il estime que le développement des énergies renouvelables terrestres comme le solaire et l'éolien, devenus très compétitifs, interrogent sa viabilité. L'avantage tant vanté des CSS, à savoir leur disponibilité permanente, ne présente au bout du compte qu'un faible intérêt. «En bref, résume-t-il, une cellule photovoltaïque fournira toujours une énergie moins chère installée sur votre toit plutôt que sur un satellite.»

Pourquoi se donner tant de mal et dépenser tant d'argent pour recueillir la lumière du Soleil au-delà de l'atmosphère terrestre, se demande Amory Lovins, «alors qu'elle est déjà distribuée gratuitement, tombant sur la Terre comme la pluie?»

— L'auteur —

> Leonard David

ancien consultant pour la Nasa, est spécialiste des questions spatiales. Il collabore à de nombreux titres, comme le *Financial Times*, *Sky and Telescope*, *Astronomy*...

Cet article est une traduction de «Is space-based solar power ready for its moment in the Sun?», paru sur le site *Scientificamerican.com* le 4 novembre 2022.

— À lire —

> A. Fikes et al.,

The Caltech Space Solar Power Demonstration One Mission, 2022 IEEE International Conference on WISEE, 2022.

> Le site du programme

Solaris, de l'ESA:

www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/SOLARIS

> Le site du SSPP du Caltech:

www.spacesolar.caltech.edu/

“ Le profil d’une pale d’éolienne est aussi complexe que celui d’une aile d’Airbus! »

François Cauneau

est professeur de mécanique des fluides à l’École des mines de Paris, spécialisé en énergétique.



Une éolienne fonctionne-t-elle comme un moulin à vent ?

C'est bien le cas. Les moulins à vent convertissent l'énergie cinétique de l'air en une autre énergie mécanique, qui s'exerce sur une meule. Dans une éolienne, la conversion est juste un peu plus sophistiquée puisqu'on ajoute à l'axe du moulin à vent un générateur électrique, ce dont le nom technique de ces objets, « turbine éolienne » ou « aérogénérateur », rend bien compte. En fait, il existe deux grandes familles d'éoliennes : les plus simples sur le plan de la physique fonctionnent avec les « forces de traînée », autrement dit la face de la pale est mise en mouvement par le souffle qui appuie dessus. Historiquement, cette architecture vient d'Iran, et dans le domaine de la production d'énergie, on parle de « rotor de Savonius », du nom de l'officier finlandais qui en a redécouvert le principe durant la Seconde Guerre mondiale. Mais les éoliennes que nous connaissons en Europe, elles, dérivent plutôt du moulin anglais du Moyen Âge. Elles sont dites « à force de portance ». Le profil de la pale (sa section) est celui d'une aile d'avion. Il est formé par la réunion de deux courbes, l'une cintrée, l'autre plus rectiligne, qui dessinent ensemble comme une virgule. Ici, la pale offre son bord dit « d'attaque » au vent qui s'écoule le long des deux courbes. La conformation induit une différence de vitesse d'écoulement entre la courbe la plus cintrée (*extrados*) et celle qui est plus plane

(*intrados*) ; cela engendre d'une part des forces de pression inégales, mais surtout une circulation de l'air autour du profil, nommé « tourbillon de portance », qui « aspire » le rotor. Une section de pale d'éolienne, laquelle varie entre l'axe du rotor et l'extrémité, est aussi complexe à concevoir et à réaliser qu'une aile d'Airbus !

Le diamètre des pales a été multiplié par quinze en quarante ans. Pourquoi cette course au gigantisme ?

Les ingénieurs ont répondu aux demandes du marché et des industriels, en partant du principe bien ancré dans les sciences de l'ingénieur selon lequel plus grande est une machine, meilleur est son rendement, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie fournie et celle restituée – c'est bien éprouvé dans les moteurs, par exemple celui d'un drone a un rendement bien inférieur à celui d'un paquebot. Mais il y a un diable dans le détail. Ce raisonnement heuristique tient le coup tant qu'on reste en soufflerie, où les conditions sont parfaitement contrôlées. En revanche, quand vous plantez votre machine dans un vrai paysage, avec des dunes au Danemark ou du bocage en France, le vent interagit avec le relief et la végétation. Il est tout sauf uniforme. Pour les ingénieurs, l'apprentissage fut rude. À partir de 1972 et du premier choc pétrolier, qui a marqué le

Les éoliennes à trois pales et rotor horizontal (à gauche) dominent le marché, faisant de l'ombre aux modèles à rotor vertical, dits Darrieus (à droite).



60

redémarrage de l'industrie éolienne en Europe, les pays du Nord les plus exposés au vent comme l'Allemagne, le Danemark et la Norvège ont lancé des programmes en se tournant vers les fabricants d'éoliennes agricoles. Leur demande était double: ajoutez-y un générateur électrique et augmentez les tailles pour atteindre des puissances d'abord de 10 kW, puis de 100 kW, enfin de 1 MW. Les ingénieurs de l'époque ont payé leur méconnaissance de la physique des basses couches de l'atmosphère. Plus les rotors grandissaient, plus les phénomènes expérimentés par ces grandes ailes tournantes étaient complexes. Et les rendements escomptés n'ont pas été au rendez-vous.

Une éolienne ne s'adapte-t-elle pas aux changements de vent ?

Seulement en partie. Quand le vent est constant et régulier, de grandes éoliennes sont très adaptées – je pense par exemple au cas simple des alizés tropicaux, stables en mer sur des périodes de plusieurs semaines. Le vent dans nos régions est plus complexe. De plus, dans des zones vallonnées ou boisées, il va avoir tendance à tourner, s'arrêter, repartir. À partir de 2 MW de puissance, l'éolienne est équipée d'un anémomètre couplé à un ordinateur qui analyse en permanence l'état du vent. Quand la machine n'est plus alignée avec le vent vrai, une alarme retentit au bout de vingt minutes. L'ordinateur lance une procédure de rotation, mais une pale de 30 à 50 mètres de long, qui pèse entre 3 et 5 tonnes

et tourne à quelques dizaines de tours par minute, présente une inertie énorme. Pas question de piler net au risque de tout casser! Le frein à disque dans la nacelle va donc prendre vingt minutes pour mettre à l'arrêt. Puis l'automate fait tourner la nacelle pour aligner l'éolienne sur le nouveau vent: comptez encore vingt minutes. Et vingt de plus pour relancer le rotor. Total: une heure! Si le vent change toutes les trente minutes, votre machine passe son temps à tourner en rond... mais pas comme il faudrait.

Comment les éoliennes ont-elles gagné en performance ?

Jusqu'aux années 2010, des générations de machines, conçues en soufflerie à partir de modèles aéronautiques, étaient inadéquates pour les vents variables ou turbulents. Puis les éoliennes de deuxième génération ont été dotées de profils plus épais, qualifiés de «permissifs». Les équipementiers se focalisent dès lors moins sur la notion de puissance que sur celle de productible annuel, c'est-à-dire la quantité d'électricité produite sur une année. Si le vent souffle à 8 mètres par seconde et que j'atteins mes 2 MW, la machine fait ce pour quoi elle a été conçue. Mais si avec 15% de turbulences je fais encore 2 MW, la performance est bien plus intéressante. Aujourd'hui, pour ses très grandes machines, General Electric en est à envisager des pales avec un intrados plat et cintré sur une seule face. L'extrémité de leurs pales de 150 à 200 mètres voyage entre presque le niveau du sol et jusqu'à

300 mètres d'altitude, presque la hauteur de la tour Eiffel! Là-haut, elles se heurtent non seulement à des variations d'intensité, mais aussi à des rotations du vent: il tourne avec l'altitude. Peaufiner le profil d'une pale n'est plus pertinent. Heureusement, certains s'étaient déjà confrontés à ce genre de questions en aéronautique: les concepteurs d'hélicoptères. Dans la mécanique du vol stationnaire, on incline la pale durant son cycle, si bien que la direction du vent apparent change constamment. Les fabricants d'éoliennes ont pu profiter de leurs leçons.

Mieux anticiper le vent serait-il un progrès?

Absolument. L'aéronautique de navigation utilise déjà des lidars pour permettre aux équipages de visualiser les turbulences à l'avance. La technologie est disponible pour les éoliennes, mais elle est encore fort coûteuse. Le lidar fonctionne comme un radar, mais au lieu d'ondes radio, il émet des faisceaux de lumière (un laser) calés sur une raie d'absorption du dioxyde de carbone (CO₂) présent dans l'air à l'état de trace. En somme, il «voit» le CO₂ se déplacer avec l'atmosphère, et par une mesure de l'effet Doppler sur ces molécules et un bon traitement du signal le système reconstitue en trois dimensions, avec une très grande précision, les volumes d'air déplacés. Pour l'heure, le prix oblige les industriels à se contenter d'un seul lidar par ferme, pour détecter à l'avance des conditions météo qui seraient préjudiciables à la sécurité des machines.

Les plus longues
pales voyagent entre
le niveau du sol et
jusqu'à 300 mètres
d'altitude

Quelle partie de l'éolienne vieillit le plus vite?

Les pales, sans aucun doute. Une pale d'éolienne est conçue comme une aile d'avion. Il s'agit de deux demi-coques en polyester renforcées par des couches de toiles en fibres de verre, le tout rigidifié, suivant les modèles, par une poutre en acier à l'intérieur. Elles sont fabriquées séparément dans des fours de 100 ou 150 mètres de long, puis elles sont soudées avec des résines. Le premier point faible est que la combinaison fibres de verre-polyester n'a pas du tout les mêmes propriétés thermiques que l'âme en acier, elles ne se déforment pas de la même manière au soleil le jour ou au froid la nuit – sans parler de toutes les flexions imposées par le vent en cours de fonctionnement. Autre talon d'Achille: le collage des coques, réalisé à la main sur de très grandes longueurs. C'est la partie la plus vulnérable, celle où se produit le délaminage, c'est-à-dire le décollement des couches de fibres de verre sous l'effet du temps. Aujourd'hui, on ne sait pas faire des polymères qui encaissent les rayons solaires ultraviolets sur la très longue durée; ils deviennent cassants.

La durée de vie d'une éolienne ne dépasse pas vingt ans. Est-il possible de l'augmenter en remplaçant les pales, par exemple?

C'est techniquement faisable, mais ça ne se pratique pas pour une raison de coût. Il faudrait mobiliser une grue, voire un hélicoptère, pour lever à 100 mètres d'altitude, parfois plus, une pale qui mesure elle-même au moins 100 mètres de long... Il n'y a pas de solution économique. Soit l'exploitant qui gère l'éolienne avait souscrit une assurance et, dans ce cas-là, c'est le constructeur qui prend en charge cette opération. Soit l'exploitant préfère laisser la machine à l'arrêt au lieu de la réparer. Cela explique les quelques machines qui rouillent parfois aujourd'hui dans les champs...

Les éoliennes sont-elles des gouffres à matières rares?

Les besoins en terres rares ne concernent que des machines très récentes. La course à l'innovation technologique n'est pas ce qui anime les

industriels de l'éolien, ils auraient plutôt tendance à se défier de la sophistication. Le rotor d'une éolienne accomplit 10 à 60 rotations par minute, alors que la génératrice électrique a besoin de tourner à plusieurs milliers de tours par minute: en général, la multiplication est assurée par un train d'engrenages disposé dans la nacelle. Les éoliennes de troisième génération disposent de génératrices à attaque directe: un dispositif électrotechnique leur confère un bon rendement à la vitesse de rotation de l'arbre du rotor, sans multiplication. Pour cela, des aimants massifs à base de néodyme ou de samarium sont nécessaires. En réalité, plus que la consommation de matières critiques, c'est le niveau d'émission de gaz à effet de serre qu'il est difficile de comprimer. L'analyse de leur cycle de vie révèle qu'un engin de plus de 2 MW émet 55 grammes de CO₂ par kWh, soit l'équivalent d'une centrale nucléaire et un peu mieux que le photovoltaïque: c'est bien, mais pas une panacée. La raison en est que la fabrication de l'acier de la tour et du béton des fondations est très énergivore, donc émettrice de CO₂. Au cours actuel des matières

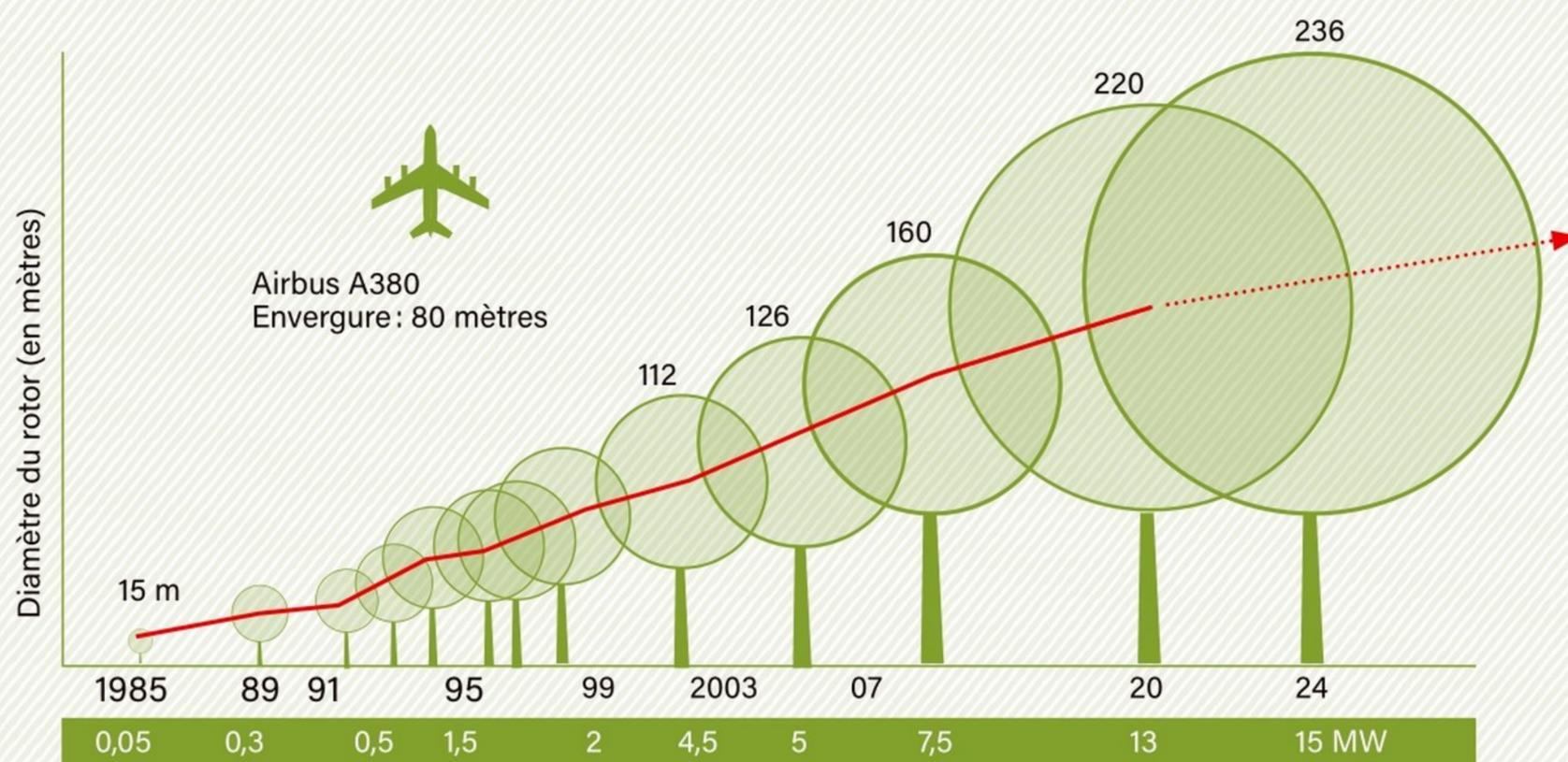
premières et de l'énergie, ils sont aussi coûteux à produire. D'ailleurs, les équipementiers proposent des options de tour en béton, ce qui diminue le coût, mais pas le niveau d'émissions.

Aller chercher le vent à 10 000 mètres, quand il est abondant, est-il une piste pour le futur ?

Suspendre une génératrice à une voile ou un système de portance à 10 000 mètres d'altitude, comme un cerf-volant, pose moins un défi technique que de sécurité. Avec un câble courant, l'emprise au sol pour capter des vents tournants équivaut à un cercle de 30 kilomètres de diamètre, qu'il faut entièrement sécuriser. Même chose au niveau des couloirs aériens. Bref, même s'il y a un gain énergétique, les coûts sont prohibitifs. Mais je vais vous surprendre en vous confiant que les éoliennes captent déjà les vents en altitude. Sur un parc d'éoliennes comme celui de Lyngby, au Danemark, douze rangées de machines se succèdent, espacées les unes des autres de l'équivalent de 5 diamètres de rotors.

62

Évolution de la puissance des éoliennes en fonction du diamètre de leurs pales



Quand on mesure, on découvre que la douzième rangée reçoit exactement la même quantité de vent que la première. Comme si l'électricité avait été produite sans modifier la vitesse du vent: le premier principe de la thermodynamique serait alors violé! Il a fallu quelques centaines d'études pour comprendre. Avec leurs hélices, les éoliennes de la première rangée perturbent le vent et y injectent de la turbulence. L'effet de cette turbulence est d'aller chercher de l'énergie cinétique en altitude pour la ramener au niveau du sol. Tout se passe comme si cette deuxième rangée avait été installée en altitude au-dessus de la première, et ainsi de suite.

Selon l'Agence internationale de l'énergie, malgré ses nombreux avantages, l'éolien en mer, ou offshore, ne représente que 7% des 900 GW de capacité éolienne installée dans le monde. Qu'est-ce qui coince ?

Pas de voisinage, des vents beaucoup plus réguliers qu'à terre, donc un productible annuel supérieur... Il est vrai que l'«offshore» est très avantageux. Mais on se trompe souvent sur le sens de ce mot. Une éolienne offshore est soit posée, soit ancrée sur le fond de la mer. Pour des raisons techniques, nous ne sommes pas en mesure d'installer des machines au-delà de 200 mètres de profondeur, ce qui concerne surtout les grands plateaux continentaux et les mers avec des hauts-fonds comme la mer du Nord. Non seulement ces zones sont en quantité

limitée, mais on y trouve des zones de pêche et des écosystèmes sensibles. Nous ne sommes donc pas loin d'avoir équipé tout ce qui pouvait l'être avec les technologies actuelles. Mais le gros des gisements est en pleine mer, au-delà des 200 mètres de fond, où des concessions pourraient se chiffrer en centaines de kilomètres carrés. Ce serait un vrai saut psychologique et technique. Les pétroliers sont, naturellement, sur les rangs, car ils comptent utiliser leur technologie et leur savoir-faire. Pour l'heure, le coût de l'industrie sous-marine se compare à celui du spatial. Visser un boulon sur la *Station spatiale internationale* revient au même prix qu'à 200 mètres de fond.

La recherche offre-t-elle l'espoir de changer la donne ?

Les équipementiers s'intéressent beaucoup à des machines à axe vertical, pas très puissantes (2 à 5 MW) mais qui ont une production annuelle possible bien plus intéressante. Ces «éoliennes Darrieus» (*voir la figure page 60*) ne sont pas exactement une nouveauté, car elles tirent leur nom de l'ingénieur français qui les a conçues... dans les années 1920. Cette architecture a connu un beau succès en Amérique du Nord, car leur rotor ne s'arrête jamais, même lorsque le vent change de direction en permanence. Néanmoins, en mer, ce qui fait la force de ces engins est aussi une faiblesse. Chacune des pales remonte le vent à tour de rôle, vire de bord face au vent, redescend avec le vent arrière, puis reprend un cycle – sans parler du fait qu'elle croise à deux reprises le sillage du mât en passant une fois devant et une fois derrière. Toutes ces contraintes les font vibrer beaucoup plus que les éoliennes à rotor horizontal, ce qui les use précocement. La recherche s'efforce donc de tester des architectures, des formules de matériaux composites, des procédés de fabrication et d'assemblage, et surtout de les évaluer dans la durée, sur dix ou vingt ans. La difficulté de connaître l'état de l'art sur ce sujet tient au fait que, si la recherche publique fonctionne par la publication, l'industrie, elle, cultive, pour des raisons vitales, le secret. Partager des informations dans le domaine est donc toujours très compliqué.

Propos recueillis par Olivier Voizeux

Le potentiel est à l'image
des océans: immense.
Mais la rudesse et la complexité
du milieu marin obligent ingénieurs
et investisseurs à avancer pas à pas.

64

Un océan d'énergie

Olivier Voizeux



À leur passage, les vagues compriment l'air contenu dans les vastes cellules en caoutchouc du mWave, de la société Bombora. Le fluide s'écoule par un conduit, entraîne une turbine, puis revient aux cellules.

En bref

> En théorie, le potentiel des énergies marines renouvelables pourrait satisfaire deux fois la demande mondiale en électricité.	> En réalité, l'écrasante majorité de la puissance installée repose sur une poignée de centrales marémotrices.	> Les diverses technologies sont à des stades de développement très contrastés, où prototypes et démonstrateurs dominent.	> En matière de technologies, l'avance européenne acquise depuis vingt ans tend à se réduire.
---	--	---	---

66

«Je dois tout à l'Océan; il produit l'électricité, et l'électricité donne au *Nautilus* la chaleur, la lumière, le mouvement, la vie en un mot.» S'il avait été moins misanthrope, le capitaine Nemo aurait pu ajouter: au *Nautilus*... et possiblement à une bonne partie de l'humanité. En misant sur les océans, Jules Verne avait eu du flair. Néanmoins, un siècle et demi après la parution de *Vingt Mille Lieues sous les mers*, les énergies marines renouvelables (EMR) restent encore largement à conquérir. Selon l'Irena, l'Agence internationale pour les énergies renouvelables, grâce aux seules technologies aujourd'hui disponibles, le potentiel est de 45 000 à 130 000 térawattheures (TWh) par an, soit, dans le pire des cas, de quoi satisfaire deux fois la demande mondiale en électricité. La même source estime que la puissance installée pourrait atteindre 350 gigawatts (GW) d'ici à 2050. Néanmoins, les capacités actuelles ne dépassent pas les 535 MW, soit l'équivalent d'une grosse centrale thermique à gaz française. Et encore: 97,5% de ce total est concentré sur quelques centrales marémotrices...

D'un potentiel quasi illimité, les EMR sont beaucoup plus prévisibles que les autres ressources, comme le photovoltaïque ou l'éolien. L'essentiel de cette ressource est lié à la présence et au déplacement de la lune et du soleil, que l'on sait prévoir avec précision. Abondance et fiabilité sont fermement attendues. Auparavant, les technologies devront atteindre une maturité après laquelle la plupart courent encore, avant d'être déployées à des échelles bien supérieures.

1 ÉNERGIE MARÉMOTRICE: LES HAUTS ET LES BAS DE LA MARÉE

Historiquement, c'est la première des EMR à avoir été exploitée en Europe, et plus particulièrement en France. Dès 1966, le barrage de la Rance (Ille-et-Vilaine) exploite la différence de hauteur (ou marnage) entre la pleine mer et la basse mer grâce à un barrage nanti de turbines – en moyenne, le marnage y atteint 6 mètres. Avec ses 240 MW, la centrale marémotrice de la Rance est à la fois la plus ancienne et la plus puissante d'Europe, seulement dépassée dans le monde par celle de Sihwa, en Corée du Sud, et ses 254 MW. Ce pays caresse d'ailleurs un projet plus ambitieux encore dans la baie de Garolim (520 MW), tout comme la Russie et les Philippines. L'Inde, après avoir songé à équiper le golfe de Kutch, y a renoncé: les coûts ont été jugés dissuasifs. Les conditions exigeantes pour ce type d'installation (marnage supérieur à 5 mètres, présence d'un substrat en grande partie rocheux pour les fondations...) et ses effets majeurs sur l'environnement (*voir l'encadré page 68*) en limitent forcément l'expansion.

2 ÉNERGIE HYDROLIENNE: CAPTER LES COURANTS MARINS

Immergez une éolienne, et vous obtenez une hydrolienne. Ces machines utilisent l'énergie cinétique des courants de marée, non loin des côtes, mais aussi les courants océaniques plus profonds et plus au large. L'engin est posé ou ancré sur les fonds marins, voire, dans le cas des

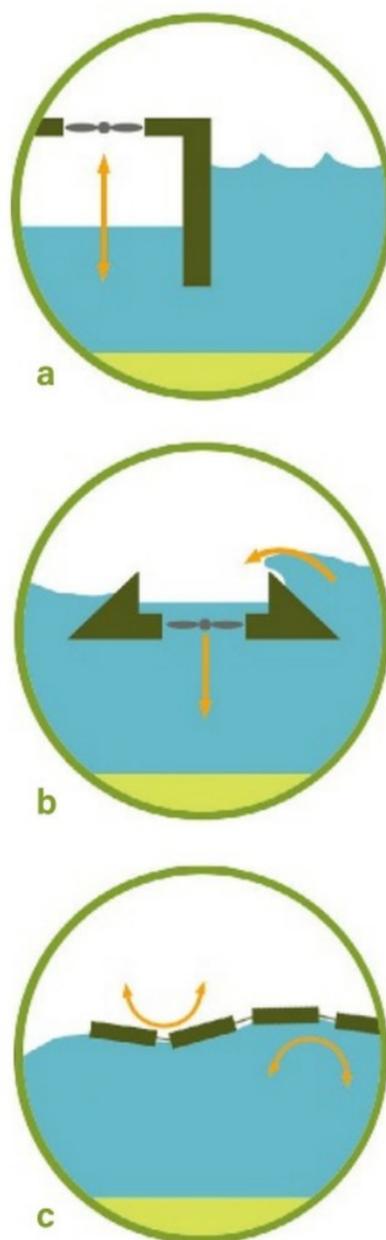
hydroliennes flottantes (plus adaptées aux courants de marée), arrimé sous une plateforme. À puissance égale, une hydrolienne est bien plus petite qu'une éolienne pour la simple raison que la masse volumique de l'eau est 833 fois supérieure à celle de l'air. Bénéfice collatéral de cette taille modeste, l'impact visuel est limité, tout comme la gêne à la navigation.

L'Irena recense une quarantaine de projets dans quinze pays. Le potentiel des hydroliennes est considérable, autant pour de très gros équipements que pour des plus modestes. Côté colosse, le projet MeyGen, en Écosse, vise à déployer 398 MW de puissance d'ici à 2024 grâce à quatre turbines de grande capacité. L'exploitation commerciale a démarré dès 2017. À l'inverse, aux Pays-Bas, la turbine à axe vertical testé par la start-up Water2Energy est conçue pour équiper des écluses à moindres frais.

Comme dans l'éolien (voir l'entretien avec F. Cauneau, page 58), on croise des architectures à axe vertical ou horizontal. Parmi ces dernières, le modèle O2, de la société écossaise Orbital Marine Power, est l'hydrolienne flottante la plus puissante du monde. Ancrée aux Orcades, elle comporte deux rotors de 20 mètres de diamètre, développant 1 MW chacun. Même si un consensus se dessine en faveur des rotors horizontaux (une évolution déjà vécue par l'industrie du vent), les technologies en lice sont encore nombreuses pour ces engins dont le développement oscille entre prototype et version commerciale en petite série.

La réalisation la plus surprenante est sans doute celle que le suédois Minesto, émanation du constructeur aéronautique Saab, a installée dans les îles Féroé. Ses deux hydroliennes de 0,1 MW en forme d'aile sous-marine sont retenues au fond par un câble le long duquel transite l'électricité. Munies d'une turbine à l'avant couplée à un générateur, elles se déplacent dans la mer en formant des huit... comme un cerf-volant! Ces loopings permettent aux appareils de se déplacer plus vite que le courant et d'accélérer le mouvement de l'eau sur la turbine. Ambition de l'entreprise: déployer jusqu'à 80 MW au pays de Galles.

Ce genre d'installation conviendrait parfaitement à des sites insulaires. Le concepteur français de turbines Sabella procède à la troisième campagne de tests de son hydrolienne connectée au réseau de l'île d'Ouessant. D'une puissance



Quelques dispositifs houlomoteurs :
 (a) Les colonnes d'eau oscillantes emploient de l'air, comprimé et décomprimé par les vagues, pour actionner une turbine.
 (b) Les dispositifs à débordement utilisent l'énergie de l'eau qui se déverse dans un réservoir.
 (c) Les convertisseurs de corps oscillants exploitent le mouvement des vagues sur des corps immergés.

maximale de 1 MW, elle affiche un rotor de 10 mètres de diamètre, une hauteur de 17 mètres et une masse de 450 tonnes.

3 ÉNERGIE HOULOMOTRICE: UNE VAGUE À PRENDRE

Récupérer l'énergie de l'eau mise en mouvement par le vent sous forme de vagues: le défi n'est pas mince. Comme il ne «suffit» pas de tirer parti d'un flux, il faut rivaliser d'ingéniosité. Les technologies mobilisées sont diverses, on peut les classer grossièrement en trois grands principes (voir la figure ci-dessus). Du point de vue industriel, le niveau de maturité n'est pas jugé très élevé. Les projets, souvent à petite échelle, sont pour la plupart en phase d'essai et de démonstration.

Le prototype le plus attendu est certainement le houlomoteur mWave, de l'Australien Bombora, sur la côte de Pembrokeshire, au pays de Galles (Royaume-Uni). Avec 1,5 MW de puissance, il sera le convertisseur d'énergie des vagues le plus puissant du monde. Son poids est de 900 tonnes, ses dimensions de 75 mètres de long, 15 mètres de large et 6 mètres de haut. mWave est une succession de cellules en caoutchouc (15 mètres x 6 mètres) remplis d'air, ancrés sur le fond de la mer (voir la figure page 65). À mesure que la vague passe, elle exerce une pression sur chaque cellule, ce qui chasse l'air par une conduite centrale reliée à un générateur. L'air retourne à la cellule qui, regonflée, peut de nouveau se déformer.

QUELS RISQUES POUR L'ENVIRONNEMENT ?

De toutes les techniques conçues pour exploiter l'énergie des mers, les centrales marémotrices sont les plus perturbantes pour les écosystèmes. La construction d'un barrage est bruyante. Sur la Rance, le chantier a contraint à fermer l'estuaire pendant trois ans, ce qui a abaissé la teneur en sel.

Nourriceries et frayères ont été détruites, certaines espèces comme le lançon et la plie ont disparu – mais d'autres sont revenues. Concernant les houlomotrices et les hydroliennes, turbines et pièces mobiles peuvent aussi produire des sons, qui jusqu'à présent n'ont pas paru nocifs pour le milieu. Le même

constat a été établi pour les champs électromagnétiques des câbles sous-marins. Pour les mammifères marins, le risque de collision avec les engins immergés paraît faible. La rotation des pales est assez lente pour ne pas réduire la faune en hachis. Toutefois, bien des études restent encore à conduire.

68

Parmi les engins déjà en exploitation commerciale, on distingue le Penguin WEC 2, du Finlandais Wello Oy, déployé à Biscay, sur la côte du Pays basque espagnol. D'une puissance de 600 kW, il est conçu pour capturer l'énergie de rotation engendrée par le mouvement de sa coque. Wello Oy a élaboré une coque de 44 mètres intrinsèquement instable. Elle se soulève et tangue en permanence sous l'impulsion des vagues; à l'intérieur, une énorme masse en rotation autour d'un axe pivote en permanence et produit du courant. Le dispositif a été testé avec succès lors d'une tempête avec des creux de plus de 18 mètres.

En France, l'entreprise Legendre, avec l'Ifremer et la société d'ingénierie Geps Techno, a mis au point la première digue à énergie

L'hydrolienne flottante O2, de la société Orbite Marine Power, récupère l'énergie des courants de marée grâce aux deux rotors de 20 m situés sous la ligne de flottaison.

positive. Nommé Dikwe, ce prototype à l'échelle un quart a été mis à l'eau en 2022 sur un site d'essais. Avec près de 4,5 mètres de haut et de large, et 6 mètres de profondeur, il s'apparente à un caisson équipé d'un volet oscillant avec la houle, dont les mouvements sont convertis en électricité. La digue est installée sur un support fixe et est complètement immergée à marée haute. L'objectif premier de ce projet est de protéger les ports et le littoral dans un contexte de hausse attendue du niveau des mers, tout en produisant de l'énergie. Un test final à l'échelle 1 de 1 MW, incorporé à une construction en béton, est prévu pour 2024.

Même si la recherche progresse lentement, les ressources en énergie houlomotrice sont mieux réparties dans le monde que les ressources marémotrices, d'où un potentiel considérable (29 500 TWh par an), concentré entre 30° et 60° de latitude.



4 ÉNERGIE OSMOTIQUE: UN PROCÉDÉ QUI NE MANQUE PAS DE SEL

Phénomène naturel, l'osmose se caractérise par le mouvement de l'eau, à travers une membrane perméable, depuis le milieu où elle est le moins concentrée en sel (eau douce) vers celui où elle est le plus concentrée (eau de mer), et cela jusqu'à l'équilibre des concentrations de part et d'autre de la membrane. Ce transfert s'accompagne d'une pression dans le compartiment d'eau salée (jusqu'à

25 bars) qui peut actionner une turbine pour produire de l'électricité.

Cette osmose à pression retardée, la start-up française Sweetch Energy compte bien l'exploiter grâce à un prototype implanté d'ici à 2025 dans le delta du Rhône. Le système reposera sur une nouvelle génération de membranes nanométriques, qui ne laisse passer que les molécules d'eau, fabriquées avec des matériaux biosourcés respectueux de l'environnement. Sweetch Energy vise le marché des usines de dessalement qui, en produisant une partie de leur électricité, réduiraient nettement leurs coûts d'exploitation.

Un dispositif osmotique est déjà en exploitation aux Pays-Bas. La société néerlandaise REDstack gère depuis 2014 une centrale osmotique pilote en Frise, installée sur une digue avec d'un côté la mer et de l'autre l'eau douce. Le dispositif utilise une technologie d'électrodialyse inverse dont les membranes, cette fois, ne laissent passer que le sel et ses ions. Ions positifs et négatifs sont captés par des membranes différentes, ce qui revient à créer une sorte de batterie fournissant directement du courant. À partir de sa puissance actuelle de 50 kW, REDstack ambitionne de monter jusqu'à 1 MW.

5 ÉNERGIE THERMIQUE DES MERS: NÉE DU CHAUD ET DU FROID

Vers 1000 mètres de profondeur, la température océanique est relativement constante autour

de 4 °C. Si la différence avec les eaux de surface excède 20 °C, alors il est possible d'exploiter cet écart pour produire du courant à partir des changements d'état d'un fluide de travail. Sur le papier, ce procédé est silencieux, discret visuellement (la tuyauterie est immergée) et d'une grande régularité: il fonctionne jour et nuit, quelle que soit la météo. Explorée dès les années 1930, cette énergie thermique des mers (ou ETM) donne du fil à retordre aux ingénieurs. En 2018, un projet de centrale de 10,7 MW, porté par les Français Naval Energies et Akuo Energy, a été abandonné. Raisons invoquées: le coût, le risque environnemental, mais aussi des difficultés techniques à pomper l'eau froide à une telle profondeur.

Un autre projet mené par le Britannique Global Otec vise à installer d'ici à 2025 une plateforme ETM flottante de 1,5 MW, reliée à l'île de Sao Tomé. En effet, l'ETM serait un mode idéal pour non seulement rendre autonomes en électricité les îles tropicales mais aussi éviter les émissions de CO₂ liées à l'emploi des groupes électrogènes au gazole. Plus la température de la source froide est basse, plus le rendement est satisfaisant. Voilà pourquoi, en Espagne, Enagás tire parti de son terminal portuaire de regazéification de gaz naturel à Huelva. Le fournisseur y exploite une centrale ETM de 4,5 MW, qui profite de la différence de température entre l'eau de mer et le gaz naturel maintenu liquide dans les navires méthaniers à -160 °C. La construction annoncée de nouveaux ports méthaniers dans l'Union européenne ouvre d'ailleurs un marché de niche pour ce type de centrale.

— L'auteur —

> **Olivier Voizeux**
est journaliste scientifique.

— À lire —

> **Le rapport de l'Irena : Innovation Outlook - Ocean Energy Technologies 2020, sur le site** <https://www.irena.org>

> **Le rapport d'Ocean Energy Europe : Key Trends and Statistics 2022, sur le site** <https://www.oceanenergy-europe.eu>

> **Baromètre énergies Marines 2022, sur le site** <https://www.eurobserv-er.org>

Depuis des années, les batteries au lithium équipent véhicules électriques, téléphones portables... Mais leurs performances restent en deçà des besoins. Comment les améliorer? Tour d'horizon.

Quelles batteries pour demain?

Jean-Marie Tarascon

Depuis les années 1990, les batteries au lithium-ion, ou Li-ion, (ici des batteries de type « bouton ») se sont beaucoup répandues, grâce à leur capacité relativement élevée par rapport aux batteries plus anciennes.



Aujourd'hui, omniprésentes dans notre quotidien, les batteries apparaissent comme l'un des moyens les plus performants et les plus flexibles pour stocker de l'énergie. De plus, ces dispositifs électrochimiques accumulateurs d'électricité et rechargeables, dont le premier (au plomb-acide) a été mis au point en 1859 par le Français Gaston Planté, joueront un rôle clé dans la transition énergétique et la diminution des émissions de CO₂.

Parmi les technologies existantes, celle dite «lithium-ion» (Li-ion) s'est imposée depuis 1991 et équipe par exemple les voitures électriques, dont le marché est en forte progression, et leur procure à ce jour une autonomie de quelque 300 à 400 kilomètres. Pour que ces véhicules séduisent une majorité d'automobilistes, une autonomie nettement plus grande sera nécessaire. Dans ce domaine comme dans bien d'autres, on attend donc des batteries aux performances améliorées. À quoi ressembleront donc les batteries de demain?

Avant de donner des éléments de réponse, voyons de quoi on parle (*voir la figure page 74*). Une batterie est un assemblage de plusieurs accumulateurs, ou «cellules», identiques fournissant chacun une tension électrique qui dépend des propriétés électrochimiques des matériaux utilisés. Chaque cellule est composée d'une électrode positive, la cathode, et d'une négative, l'anode, les deux étant séparées par un milieu liquide ou solide, l'électrolyte, où des ions se déplacent. Lorsque les deux électrodes sont connectées à un circuit électrique externe, les réactions électrochimiques (réversibles) au niveau des électrodes conduisent à un stockage ou à une libération de charges

En bref

- > Les batteries sont des systèmes, rechargeables, qui convertissent de l'énergie chimique en énergie électrique.
- > Les batteries «lithium-ion», apparues dans les années 1990 après de longues recherches, offrent une densité d'énergie élevée et se sont ainsi imposées dans un grand nombre d'applications.
- > Les scientifiques explorent plusieurs voies afin d'améliorer les performances de ces batteries ou d'autres et de diminuer leur empreinte écologique.

électriques (processus de charge ou décharge), selon le sens de circulation des électrons.

Prenons une cellule Li-ion. Ses deux électrodes agissent comme des éponges à lithium. La cathode est généralement constituée d'un oxyde métallique, et l'anode de graphite (feuillet de carbone). En décharge, les atomes de lithium liés au carbone de l'anode se dissocient en ions Li⁺ et en électrons (Li_xC₆ → xLi⁺ + x e⁻ + C₆); les électrons partent dans le circuit externe, tandis que les ions Li⁺ se déplacent en sens inverse à travers l'électrolyte jusqu'à la cathode, où ils s'insèrent dans le matériau et se recombinaient avec les électrons provenant du circuit électrique externe (MO₂ + xLi⁺ + x e⁻ → Li_xMO₂, où MO₂ désigne l'oxyde métallique). En charge, c'est l'inverse.

L'ENTRÉE EN SCÈNE DU LITHIUM

La différence entre les potentiels électrochimiques des matériaux des deux électrodes détermine la tension électrique fournie par la cellule. L'étendue des réactions (traduite par le facteur x dans les réactions ci-dessus) caractérise quant à elle la capacité de stockage, c'est-à-dire la charge électrique maximale accumulée (exprimée en ampèreheures par gramme). L'énergie stockée est le produit de la tension par la capacité; elle s'exprime en wattheures par litre (Wh/L) ou par kilogramme (Wh/kg), la puissance (énergie fournie par unité de temps) se mesurant en watts (W).

Vers le milieu du xx^e siècle, les scientifiques se sont intéressés au lithium, métal qui a l'avantage d'être très léger. Dans les années 1970, des chercheurs ont

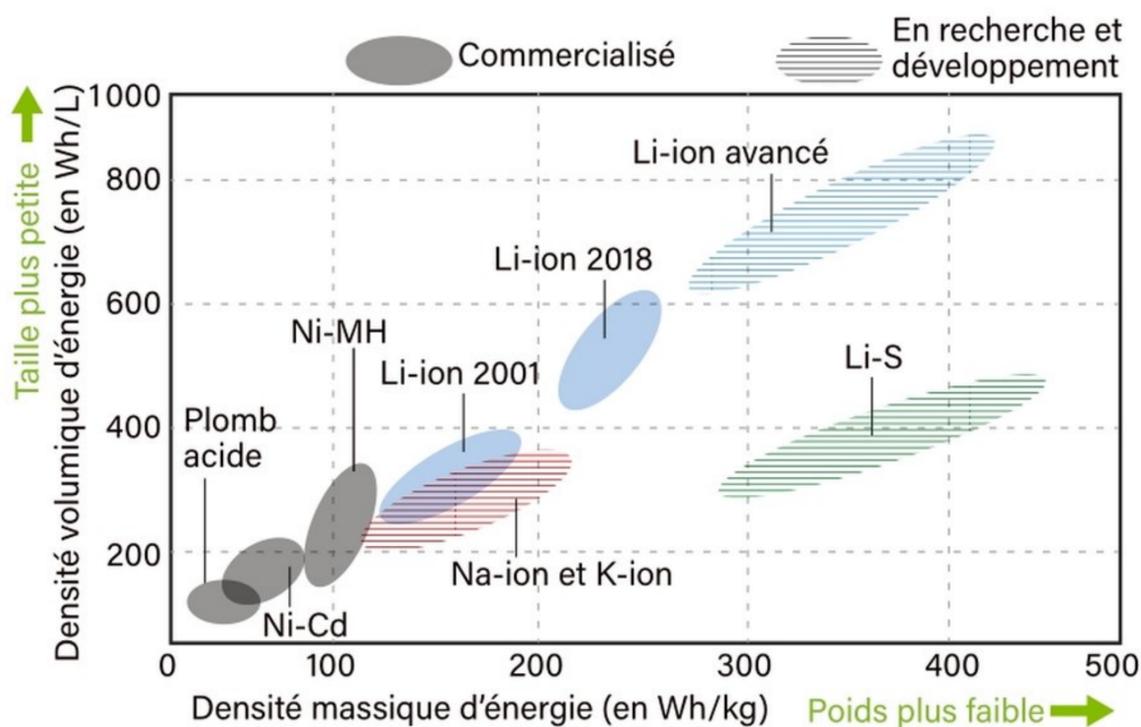
remarqué que certains matériaux intégraient, de façon réversible, des ions Li^+ dans leur structure sans que celle-ci se déstabilise. Cette propriété, associée au fort pouvoir réducteur du lithium, c'est-à-dire la propension à céder un électron, promettait des densités d'énergie deux à trois fois supérieures à celles des batteries de l'époque.

Ainsi, en 1976, Stanley Whittingham, chez Exxon, fit la démonstration d'une batterie lithium-métal, avec une anode métallique en lithium et une cathode constituée d'un matériau dit « d'intercalation » à structure lamellaire, le disulfure de titane (TiS_2), où les ions Li^+ s'insèrent aisément; l'eau étant incompatible avec le lithium, on a remplacé l'électrolyte aqueux des anciennes techniques par un autre, organique (du sel de lithium, LiPF_6 , dissous dans un mélange de carbonates cycliques et acycliques). Malheureusement, lors de la charge et décharge des accumulateurs, des dendrites de lithium (amas arborescents de cristaux) se formaient sur

l'anode jusqu'à atteindre la cathode et ainsi provoquer un court-circuit. Les batteries risquaient alors de prendre feu, voire d'exploser.

Face à ce défi, les scientifiques ont adopté deux stratégies. L'une est d'interposer entre l'anode de lithium métallique et la cathode une barrière matérielle; c'est le principe des batteries lithium-métal-polymère de Blue Solutions, filiale du groupe Bolloré. L'autre consiste à diminuer l'activité du lithium métallique de l'anode en le remplaçant par un matériau d'intercalation pour les ions Li^+ , généralement du graphite: le concept des batteries Li-ion était né et a rendu possible leur commercialisation par Sony, en 1991.

Ce graphique compare les différentes technologies de batteries quant à la densité d'énergie en volume et en masse. Ne sont prises en compte ici que les technologies pour lesquelles des prototypes fonctionnels ont été démontrés (d'où l'absence, par exemple, de la technologie Li-air).



lamellaire LiCoO_2 , où des atomes de lithium s'insèrent entre les feuillets de dioxyde de cobalt, CoO_2 . Une décennie plus tard, les composés polyanioniques, en particulier le LiFePO_4 , identifiés par la même équipe, constituaient une alternative crédible, quant à l'écocompatibilité et la sécurité, au LiCoO_2 . Cependant, la compétitivité des batteries à base de ces composés s'est effritée du fait de leur faible densité d'énergie (150 Wh/kg) par rapport à celles utilisant des oxydes lamellaires (240 Wh/kg). Ces derniers ont en effet été améliorés en substituant le cobalt par du manganèse et du nickel, ce qui a donné des matériaux de formules $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z)\text{O}_2$, notés NMC. La phase dite «622» (pour 60% de nickel, 20% de manganèse et 20% de cobalt) est aujourd'hui une référence.

On cherche désormais à augmenter le taux de nickel tout en abaissant celui du cobalt, dont l'extraction en Afrique se fait dans des conditions contestables. Ainsi, ont été récemment commercialisées des batteries dont les cathodes sont constituées de NMC 811 (10% de cobalt), qui plus est à plus forte densité d'énergie (275 Wh/kg). Les scientifiques travaillent désormais à des NMC 90-05-05...

Une autre piste suivie, outre celle des composés riches en lithium tels $\text{Li}(\text{Li}_{0,13}\text{Ni}_{0,3}\text{Mn}_{0,54}\text{Co}_{0,13})\text{O}_2$ qui présentent de bonnes capacités pour des teneurs en cobalt faibles, est celle des composés

$\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Al}_{1-x-y})\text{O}_2$. Ils résultent de la substitution partielle du cobalt et du nickel par de l'aluminium et sont utilisés dans les cellules des Tesla. D'ailleurs, sous l'impulsion de cette entreprise, le LiFePO_4 , pour des raisons de sécurité, d'écocompatibilité et de coûts liés à l'expiration des brevets, devient une solution attrayante pour le véhicule électrique bas de gamme, si bien qu'en 2030 il correspondra à 50% du marché des cathodes.

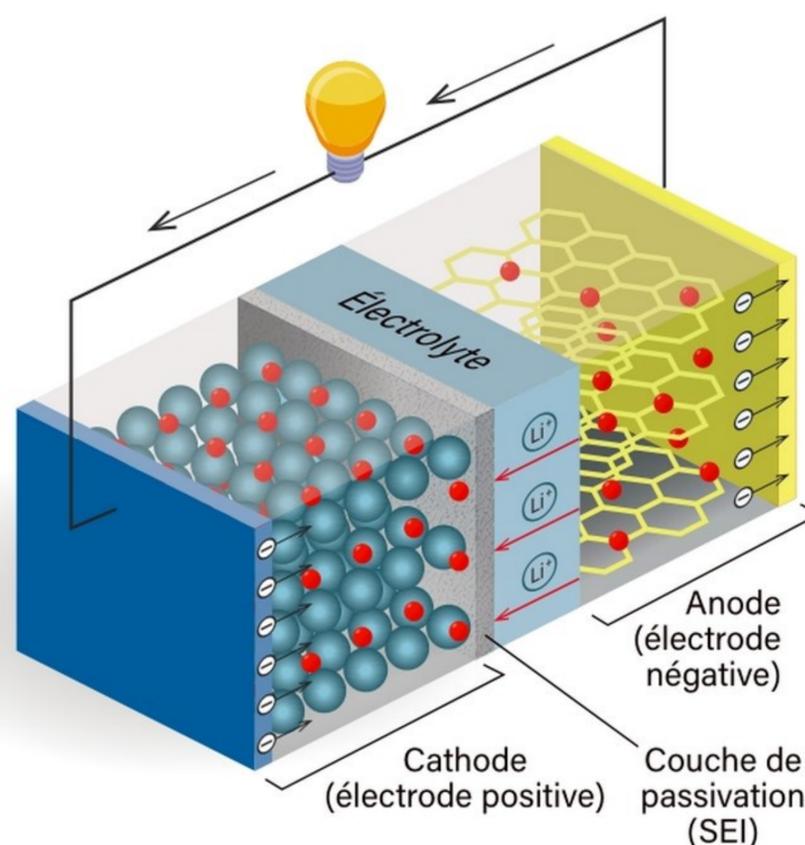
DES ANODES SANS CARBONE ?

Pour ce qui est de l'anode, elle reste encore essentiellement à base de carbone. Elle a néanmoins connu des améliorations avec le passage du carbone désordonné, d'une capacité de 270 milliampèreheures par gramme (mAh/g), au carbone dur ou au graphite, d'une capacité de 372 mAh/g.

Autre possibilité, remplacer le graphite par des oxydes de silicium ou par du silicium, dont la capacité théorique est dix fois supérieure. Cependant, le développement d'une telle anode au silicium se heurte à l'instabilité de la «couche de passivation» ou SEI (pour *solid electrolyte interface*), une couche cruciale pour les performances de la batterie et sa durée de vie, constituée de composés organiques et inorganiques qui se forment à l'interface anode-électrolyte.

74

Une batterie est un assemblage de cellules électrochimiques, chacune comportant une cathode, un électrolyte et une anode. Quand la batterie alimente un appareil électrique, c'est-à-dire décharge (*ci-contre*), l'anode fournit des électrons (e^-) au circuit externe, tandis que la cathode en reçoit; simultanément, l'anode apporte des ions positifs au circuit interne, ions qui vont de l'anode à la cathode *via* l'électrolyte. Ainsi, lors de la décharge d'une batterie Li-ion, l'oxyde lamellaire de la cathode est le siège de réactions de «réduction» avec insertion d'un certain nombre x d'ions de lithium Li^+ et d'autant d'électrons, tandis que l'anode est le siège de réactions d'«oxydation» libérant x ions Li^+ et autant d'électrons. En situation de charge, les réactions sont inversées.



Ces recherches sur les électrodes vont de pair avec celles sur l'électrolyte. Son choix (mélange de solvants et de sels de lithium) est complexe car, dans le cas de la technologie Li-ion, l'électrolyte fonctionne en dehors de sa fenêtre de stabilité thermodynamique. Par chance, la formation d'une SEI limite fréquemment la dégradation de l'électrolyte. Néanmoins, cette SEI est difficile à maîtriser tant sa nature dépend fortement de l'électrode et de l'électrolyte. En un mot, bien que partie la plus importante de la batterie, la SEI, objet d'intenses recherches, reste la moins comprise.

Quoi qu'il en soit, depuis les années 1990, on utilise des électrolytes semblables à ceux de Whittingham. Ils ont de bonnes propriétés de dissolution des sels de lithium et de solvatation des ions Li^+ , caractéristiques essentielles pour une conduction ionique optimale. De plus, pour des performances optimales, ils contiennent une multitude d'additifs dont la composition exacte relève du secret industriel.

UN NOBEL MÉRITÉ

Tous ces travaux ont ainsi conduit à des batteries Li-ion performantes qui sont devenues le nerf de la guerre pour le développement rapide de véhicules électriques et, à plus long terme, pour le stockage – et donc l'utilisation massive – des énergies renouvelables. Quant à l'impact sur nos sociétés, l'invention des batteries Li-ion est sans doute comparable à celles du transistor, de la fibre optique..., et l'on comprend que John Goodenough et Stanley Whittingham, avec Akira Yoshino, de l'entreprise japonaise Asahi Kasei, qui a notamment mis au point le premier prototype de batterie Li-ion vers 1985, se soient vu décerner le prix Nobel de chimie en 2019.

Outre des chercheurs, des entrepreneurs ont fortement dynamisé le domaine. Parmi eux, Elon Musk, le bouillonnant d'idées et visionnaire fondateur de Tesla et de SpaceX, s'est lancé dès 2010 dans l'aventure du stockage de l'énergie. Son but: mettre à la disposition de chaque humain de l'énergie propre en grande quantité et à bas coût grâce aux batteries. Pour l'atteindre, il a créé dans le Nevada, aux États-Unis, la première *gigafactory*, usine géante de fabrication de batteries qui, alimentée principalement par des panneaux photovoltaïques, peut produire jusqu'à 5 milliards de cellules par an.

Les batteries Li-ion sont devenues le nerf de la guerre pour le développement rapide des véhicules électriques

Grâce aux économies d'échelle, le prix du kilowattheure (kWh) stocké a été divisé par dix durant la dernière décennie. L'objectif est de passer sous la barre des 100 euros le kWh d'ici à 2025 et, à plus long terme, au-dessous de 60 euros. Pour ce faire, Tesla mise notamment sur un accroissement de la capacité de ses cellules en augmentant le taux de nickel à la cathode et en intégrant des composites C/Si à l'anode, ou encore sur un nouveau procédé industriel de fabrication d'électrodes par voie sèche.

Le dynamisme d'Elon Musk a bousculé l'industrie automobile et a permis l'essor actuel des véhicules électriques. Des entreprises concurrentes comme CATL, Panasonic ou Volkswagen prévoient elles aussi la construction de gigafactories pour satisfaire la demande. Pour le «stockage stationnaire» d'énergie (par exemple les sources renouvelables), la capacité installée dans le monde devrait passer de 3-4 gigawattheures (GWh) à 1300 GWh dans les années à venir, ce qui laisse présager une expansion spectaculaire de la production annuelle de batteries. Pour répondre à la demande, il importe d'améliorer la technologie Li-ion. Quelles sont les pistes explorées?

Afin d'accroître la densité d'énergie d'une batterie, donc son autonomie, on peut augmenter soit la tension de la cellule, soit la capacité spécifique des deux électrodes. En dehors des phases lamellaires riches en nickel déjà présentées, la découverte en 2002 par l'équipe de Jeff Dahn, de l'université Dalhousie, au Canada, et en 2007 par celle de Michael Thackeray, du laboratoire

américain d'Argonne, de composés riches en lithium, dont l'archétype est la phase $\text{Li}_{1,2}\text{Ni}_{0,13}\text{Co}_{0,13}\text{Mn}_{0,54}\text{O}_2$, soulève de grands espoirs: ils ont une capacité exacerbée, due au cumul d'activités liées à la fois aux cations et aux anions.

Mon groupe a prédit ce phénomène en 1999 et l'a démontré expérimentalement en 2013. Ces matériaux remettent ainsi en cause une idée vieille de trente ans qui postulait que l'activité d'un matériau d'électrode était seulement rattachée aux cations. On peut ainsi obtenir des densités d'énergie d'environ 350 Wh/kg ou 750 Wh/L.

Malheureusement, l'activité liée aux anions s'accompagne de divers phénomènes qui limitent l'efficacité énergétique et font décroître le potentiel moyen des cellules avec le nombre de cycles de charge. De plus, bien qu'impressionnantes, les densités d'énergie atteintes ne satisfont pas encore les constructeurs automobiles, qui souhaiteraient des densités supérieures à 800 Wh/L pour obtenir des véhicules à forte autonomie.

LES PROMESSES DU « TOUT SOLIDE »

76

Une telle ambition est-elle réaliste? Il y a une dizaine d'années, on a parié sur la technologie Li-air, mais l'espoir a été de courte durée. Actuellement, c'est au tour des batteries au lithium dont l'électrolyte est solide et non liquide, de susciter l'engouement. Cette technologie a été développée en 1986 par James Akridge, de la société américaine Eveready, dans une version à couches minces; mais le passage à des électrodes massives n'avait jamais pu être réalisé. Un prototype fonctionnel pourrait toutefois voir le jour grâce à la découverte en 2011, par Ryoji Kanno, de l'institut de technologie de Tokyo, et ses collègues, d'un thiophosphate ($\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$) qui a une conductivité ionique exceptionnellement élevée, comparable, voire supérieure, à celle d'un électrolyte liquide. Cette percée a déclenché la recherche de nouveaux conducteurs

**UNE BATTERIE OFFRANT
800 KILOMÈTRES D'AUTONOMIE
ET RECHARGEABLE EN DIX MINUTES
RESTE À CE JOUR UN RÊVE**



ioniques avec l'émergence de Li_3PS_4 , des argyrodites ($\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$), des halogénures (Li_3InCl_6) et récemment des oxyhalogénures (LiM_xOCl_4), autant de composés dont les stabilités électrochimiques et propriétés mécaniques diffèrent, offrant un large choix de combinaisons possibles.

De plus, cette avancée a provoqué une vague d'investissements pour faire des batteries tout solide une réalité. L'électrolyte n'étant pas liquide, ces batteries seraient potentiellement plus sûres que celles disponibles aujourd'hui, mais aussi plus intéressantes en matière de densité volumique d'énergie (supérieure de 60% à celle du Li-ion classique), notamment parce qu'elles autorisent l'utilisation d'anodes en lithium métallique, au lieu du graphite.

Cependant, de nombreux obstacles demeurent (instabilité des SEI, croissance de dendrites de lithium...), même si des progrès considérables ont été accomplis tant au niveau de l'ingénierie des interfaces par des méthodes d'enrobage, de la création d'hétérostructures, de l'assemblage des cellules pour abaisser la pression et permettre l'utilisation d'une anode de Li.

À titre d'exemple, mentionnons les travaux de Ying Shirley Meng, qui montrent la possibilité à l'échelle du laboratoire de remplacer le lithium par du silicium, mais aussi ceux de Samsung, avec la réalisation d'un prototype de cellule «tout solide» (avec une densité d'énergie d'environ 900 Wh/L) dépourvue de lithium à l'anode au moment de l'assemblage

Le marché des voitures électriques est en plein essor, mais les performances des batteries existantes restent insuffisantes pour séduire une majorité d'automobilistes. Le développement de batteries se chargeant en quelques minutes semble aujourd'hui illusoire. En revanche, l'augmentation de l'autonomie, c'est-à-dire de l'énergie stockée en une recharge, est un objectif réaliste.

et à même de dépasser 1 000 cycles de recharge sans perte notable de capacité. Précisons que ce prototype «tout solide» contenait tout de même du liquide à la cathode. D'ailleurs, face à cette complexité du tout solide, l'impatience des industriels se fait sentir. La réponse se traduit par le développement de technologies tout solide hybrides reposant sur l'utilisation de polymères, de gels, de ionogels, voire de quelques points de pourcentage de liquides afin de composer plus facilement avec les interfaces.

Que le défi des interfaces au sein des batteries tout solide soit loin d'être maîtrisé n'empêche pas des jeunes pousses comme QuantumScape et Solid Power d'annoncer la production dès 2024 de telles batteries. Et le 12 mai 2023, le président Emmanuel Macron leur emboîtait le pas en proclamant la construction à Dunkerque d'une usine de batteries «solides» contenant une fraction liquide, par le Taiwanais ProLogium, dont le démarrage est prévu en 2026. De son côté, Toyota a affirmé dès 2017 que des batteries tout solide alimenteraient en 2025 ses véhicules électriques. Le développement si rapide d'une technologie nouvelle serait une première dans l'histoire des batteries... à supposer que ces délais soient tenus.

Outre l'autonomie, les utilisateurs souhaitent une vitesse élevée de charge des batteries Li-ion. Sur ce plan, la technologie tout solide offre en théorie un avantage (car l'électrolyte solide transporte un plus grand nombre d'ions Li^+), mais qui reste à démontrer en pratique.

La vitesse de charge dépend, entre autres, de la distance que les ions ont à parcourir au sein des électrodes. Cette dernière est d'autant plus courte que les électrodes sont minces et les particules dont est constitué leur matériau sont fines, mais cette configuration a l'inconvénient d'augmenter le nombre de réactions parasites et de réduire la densité d'énergie. Cela explique la difficulté (l'impossibilité?) de combiner autonomie et puissance dans une seule batterie.

Un autre problème se pose pour le dimensionnement des bornes de recharge, en ce qui concerne la connectique: pour transférer quelques centaines de kWh en moins de dix minutes, des fils de cuivre de plus de 2 centimètres de diamètre sont nécessaires... Une batterie offrant 800 kilomètres d'autonomie et rechargeable en dix minutes reste à ce jour un rêve.

Cependant, de nombreux travaux sont en cours pour accélérer la charge. Des chimistes tentent d'identifier de nouveaux matériaux d'électrodes à conductivités ioniques et électriques plus élevées et d'en optimiser la morphologie ou la structure. En attendant, une alternative, choisie par Tesla, consiste à recourir à des recharges partielles (jusqu'à 80%) de la batterie selon des protocoles bien précis, ce qui diminue le temps de recharge à environ vingt-cinq minutes.

VERS UNE COMPATIBILITÉ ÉCOLOGIQUE

Les préoccupations écologiques sont une autre question capitale liée aux batteries. Les analyses de cycle de vie les plus récentes montrent que pour fabriquer ou recycler une batterie Li-ion stockant 1 kWh par cycle une énergie de 400 kWh, associée à l'émission de 75 kilogrammes de CO_2 , est nécessaire. L'innovation au niveau des matériaux et de leurs procédés d'élaboration s'impose, de même qu'un nouveau regard sur certaines technologies comme le Li-air, le Li-S (lithium-soufre), le Na-ion (sodium-ion)... cette dernière étant la plus avancée.

Sur la question de la densité d'énergie, le Na-ion (140 Wh/kg) ne peut pas rivaliser avec le Li-ion (240 Wh/kg), mais il offre en revanche des puissances parfois supérieures à 40 kW/kg, contre 1,5 pour le Li-ion. Il bénéficie aussi de possibilités de charge rapide. Autre avantage, l'élément clé de ces dispositifs – le sodium – est mille fois plus abondant que le lithium, donc moins cher, et uniformément

En avril 2023, Tiamat a annoncé la première commercialisation de batteries Na-ion pour alimenter des tournevis électriques vendus par Leroy Merlin

78

réparti sur la planète. Notre groupe a été pionnier dans le développement de la technologie Na-ion basée sur la chaîne électrochimique $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_2\text{F}_3/\text{Elec./C}$, qui a conduit à la création en 2018 d'une spin-off, l'entreprise Tiamat. Grâce à l'identification d'un électrolyte approprié ainsi que sur la maîtrise des interfaces, d'excellentes performances en matière de puissance et de durée de vie sur une large gamme de températures (de -20 à 55 °C) ont été obtenues. En avril 2023, Tiamat a annoncé la première commercialisation de batteries Na-ion pour alimenter des tournevis électriques vendus par Leroy Merlin. À notre connaissance, il s'agit d'une première, tandis que d'autres projets, aux États-Unis, au Royaume-Uni, en Chine... en sont encore au stade de la démonstration. La batterie Na-ion, souvent boudée, est devenue une réalité commerciale, avec de nombreuses possibilités d'applications.

Une autre voie possible pour diminuer l'empreinte écologique des batteries Li-ion est d'augmenter leur durée de vie. À cet effet, des tests menés par Jeff Dahn et son équipe ont montré qu'une batterie Li-ion dont la cathode est en NMC 532 et l'anode en graphite peut alimenter un véhicule électrique sur 3 millions de kilomètres à 20 °C, soit une durée de vie d'environ vingt-cinq ans en supposant une décharge de 100% par jour. Cependant, cette durée de vie se réduit à dix ans quand la température d'opération est de 40 °C...

Étendre la durée de vie des batteries en recueillant des informations fiables sur leur état de fonctionnement et d'usure, tel est le défi des batteries dites «intelligentes». L'idée est d'équiper la batterie

d'outils de diagnostic qui généreraient en temps réel et de façon optimale son fonctionnement et ce afin de surveiller et prévenir les phénomènes à l'origine de la dégradation prématurée des batteries actuelles. Un tel développement, en cours, repose sur l'injection de fonctionnalités de diagnostic au sein d'une batterie, grâce à l'utilisation de capteurs montés sur des fibres optiques, à l'image de ce qui se fait dans le domaine médical. On accède ainsi à des informations sur la formation de la SEI.

DES BATTERIES «INTELLIGENTES»

Il était cependant encore impossible de connaître la nature des espèces chimiques impliquées dans ce dernier processus. Ce verrou technologique a été tout récemment levé, notamment grâce au remplacement d'une fibre classique de silice par une de chalcogénure capable de transporter la lumière dans l'infrarouge afin de détecter les signatures moléculaires des espèces chimiques dans l'électrolyte et les matériaux de l'électrode. Il fut ainsi possible de révéler les mécanismes qui sous-tendent la dégradation de l'électrolyte pendant le cycle et le rôle des additifs. Cette avancée change profondément la donne. Et l'on imagine doter les batteries du futur d'un passeport électronique de santé pour une meilleure durabilité...

Cette approche de diagnostic va de pair avec l'étude de systèmes autoréparants inspirés de processus biologiques, un champ d'expérimentation de plus en plus actif. On peut ainsi citer les travaux pionniers d'Akira Harada, de l'université d'Osaka, et ses collègues. Dans les années 1990, ils ont mis

à profit l'interaction d'une cyclodextrine, une molécule circulaire, avec une chaîne polymère, pour élaborer des architectures supramoléculaires aux propriétés élastiques remarquables. En 2017, Sunghun Choi et son équipe, de l'Institut coréen avancé de science et technologie (Kaist), les ont utilisées pour améliorer considérablement les performances des anodes en silicium, qui subissent des fluctuations de volume de plus de 300% lors de l'insertion et la désinsertion du lithium. Les batteries pourvues de telles anodes supportent ainsi plus de 400 cycles de charge.

L'Europe a fait de cette approche couplant diagnostic et autoréparation le cœur de son programme de recherche *Battery 2030+*, lancé en 2019 avec pour objectif d'augmenter la durabilité et la fiabilité des batteries, et par ricochet de diminuer leur empreinte écologique.

Cette empreinte écologique des batteries dépend par ailleurs étroitement de leur recyclage, une problématique toujours plus importante du fait des millions de batteries Li-ion produites annuellement. Le recyclage reposait jusqu'à maintenant sur des procédés métallurgiques classiques, mais complexes, coûteux en solvants et en énergie. Les recherches actuelles visent à pallier ces inconvénients.

En trente ans, la technologie Li-ion est devenue incontournable pour la transition énergétique. Selon le Forum économique mondial, les batteries ont déjà entraîné une baisse colossale de 0,4 gigatonne des émissions mondiales de CO₂ dues aux transports; et ce chiffre pourrait atteindre 2,2 gigatonnes d'ici à 2030, soit 30% de la diminution

mondiale requise pour atteindre les objectifs de l'accord de Paris sur le climat conclu en 2015.

Que réserve l'avenir? La suprématie de la technologie Li-ion devrait encore durer quelques décennies et ce d'autant plus qu'elle continue de s'améliorer. Le Na-ion est devenu une réalité commerciale atténuant, du fait de la diversification des ressources, la pression actuelle sur le Li. Les batteries tout solide, version hybride, devraient suivre dans la foulée.

RATTRAPER SON RETARD

Pour aller plus loin, la chimie restera centrale et devra proposer encore et toujours de nouveaux matériaux multifonctionnels, peu coûteux et respectueux de l'environnement. Même si le temps presse, l'espoir d'atteindre un tel idéal est réel, puisqu'en plus de leur expertise, les chimistes disposent aujourd'hui de nouveaux outils de prédiction, tirant parti de l'intelligence artificielle, un véritable accélérateur de recherche.

Il reste néanmoins des défis à relever, et c'est l'ambition du programme européen *Battery 2030+*. Mais pour y parvenir, une vaste collaboration entre chercheurs de spécialités différentes s'imposera. Alors, seulement, l'Europe sera en mesure de rattraper son retard sur les géants asiatiques qui règnent aujourd'hui sur le monde des batteries.

— L'auteur —

> **Jean-Marie Tarascon** est professeur au Collège de France, où il dirige le laboratoire Chimie du solide et énergie, directeur du Réseau sur le stockage électrochimique de l'énergie (RS2E) et membre de l'Académie des sciences. Il a reçu la médaille d'or du CNRS en 2022.

— À lire —

> **B. Hennequart et al.**, Solid-electrolyte-free O3-LixTiS2 cathode for high-energy-density all-solid-state lithium-metal batteries, *ACS Appl. Energy Mater.*, 2023.

> **L. Hu et al.**, A cost-effective, ionically conductive and compressible oxychloride solid-state electrolyte for stable all-solid-state lithium-based batteries, *Nat. Commun.*, 2023.

> **T. Koç et al.**, Toward optimization of the chemical/electrochemical compatibility of halide solid electrolytes in all-solid-state batteries, *ACS Energy Lett.*, 2022.

Une nouvelle ère du nucléaire

Aucune autre source d'énergie ne divise autant. Mais à l'heure où il faut agir, et vite, pour garder le réchauffement climatique sous contrôle, l'électricité tirée de la fission nucléaire rappelle ses solides atouts : sa production est à la fois peu carbonée et pilotable. Néanmoins, si elle devait être diffusée à plus grande échelle, la technologie buterait fatalement sur la limite des ressources en uranium. Une solution existe, la régénération, tirant profit du combustible usagé, mais de lourds investissements devront y être consacrés. À plus long terme, le monde profitera peut-être un jour d'un nouveau mode à fort potentiel : celui de la fusion nucléaire. Soutenu par trente-cinq pays, le réacteur expérimental Iter annonce un démarrage de son activité dans la décennie 2030. On serait néanmoins encore loin d'une exploitation commerciale.



Décarbonée, pilotable, l'énergie nucléaire est susceptible de contribuer à la lutte contre le réchauffement climatique. Mais quel nucléaire ?

Le nucléaire à la croisée des chemins

Sylvain David, Sandra Bouneau et Adrien Bidaud



Aura-t-on assez d'uranium pour satisfaire les besoins du nucléaire tels que prévus par la transition énergétique ?

En bref

> Si l'on fait l'hypothèse que l'énergie nucléaire doit à l'avenir prendre une place plus importante dans le mix énergétique mondial, alors l'accès à la ressource en uranium posera problème.	> Or, des deux grandes familles de réacteurs innovants en développement. La première passe par l'amélioration de la technologie majoritaire aujourd'hui (la fission de l'uranium).	> La seconde est fondée sur la filière de la régénération, notamment par l'utilisation du plutonium, seule la seconde s'affranchit de cette contrainte.	> Elle n'est cependant pas la plus avancée, et exige des arbitrages en sa faveur sans plus attendre si elle devait être mobilisée largement.
--	--	---	--

84

L'énergie nucléaire de fission, développée depuis les années 1970, représente à ce jour, avec l'hydraulique, une source d'énergie décarbonée, pilotable et disponible. Elle correspond à environ 10% de la production d'électricité mondiale, et à 5% de l'énergie primaire totale. Son rôle actuel dans la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre mondiales est donc minime. Envisager le nucléaire comme un outil de lutte contre le dérèglement climatique suppose implicitement une augmentation drastique de sa contribution au mix énergétique mondial, dans un contexte où beaucoup de régions très peuplées aspirent à se développer et à consommer de plus en plus d'énergie et où de nombreux usages vont être transférés vers l'électricité.

LE SCÉNARIO COSIME

Les projets innovants s'orientent actuellement vers des petits réacteurs sans que la question des ressources en uranium soit posée. Elle est pourtant déterminante pour définir une stratégie de développement du nucléaire, car elle se présente très différemment selon les technologies considérées.

À partir d'un scénario simplifié, appelé «Cosime2050», proposé par une équipe réunie autour de l'une de nous (Sandra Bouneau), et qui consiste à bâtir un mix énergétique mondial en s'appuyant sur des hypothèses globales issues de diverses études technico-économiques, il est possible d'obtenir des tendances quantitatives pertinentes. Cette approche fait l'hypothèse d'une production d'énergie mondiale en 2050 de 20 Gtep/an (Gtep: gigatonnes équivalent pétrole), contre 10 en 2000, 14 en 2020,

et table sur une division par deux des émissions de CO₂ au niveau mondial par rapport à 2000. Elle suppose aussi une réduction des inégalités de consommation, où une part importante des populations de pays émergents et pauvres d'aujourd'hui atteindra une consommation équivalente à celle des pays riches. Les énergies renouvelables se déploieraient significativement, à hauteur de 7,5 Gtep/an. Enfin, le scénario envisage le développement massif des technologies de séquestration de carbone à hauteur de 12 GtCO₂ par an, soit un quart des émissions actuelles.

Cette approche assure l'adéquation entre les formes d'énergie fournies par les sources et les formes d'énergie utiles pour les besoins et affecte une production nucléaire uniquement aux populations les plus riches, réparties dans les pays développés actuels ainsi que dans les grandes villes des pays émergents et pauvres. On aboutit ainsi à une production nucléaire mondiale de 24000 TWh/an (TWh: térawattheures), soit plus

Le scénario Cosime2050

Ce scénario assemble plusieurs tendances pour diviser par 2 les émissions de CO₂ en 2050 par rapport à l'année 2000.

20 Gtep/an: consommation mondiale d'énergie, dont 7,4 Gtep d'énergies renouvelables.

24 000 TWh/an: production mondiale annuelle d'énergie nucléaire.

20 %: part de l'énergie nucléaire dans le mix énergétique mondial.

de 20% de l'énergie totale et près de 10 fois supérieure à celle des années 2000.

Les réacteurs commerciaux en cours d'exploitation sont, dans une très large majorité, destinés à la production d'électricité et fonctionnent à partir du seul noyau fissile naturel, l'isotope ^{235}U , présent à hauteur de 0,7% dans l'uranium naturel (99,3% d'isotope ^{238}U). La fission, induite par un neutron, libère de l'énergie et de nouveaux neutrons, créant ainsi une réaction en chaîne qui assure une production d'énergie sans apport de neutrons extérieurs.

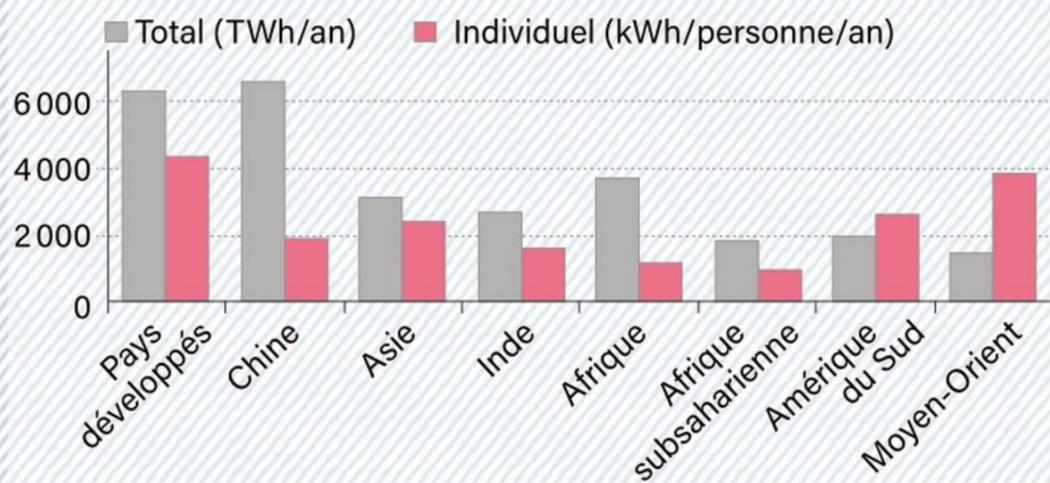
L'isotope majoritaire ^{238}U fissionne très peu lorsqu'il est soumis à un flux de neutrons et a plutôt tendance à capturer le neutron. Dans un mélange contenant peu de ^{235}U , favoriser la fission de ^{235}U par rapport à une capture par ^{238}U exige de ralentir fortement les neutrons, grâce à un modérateur, sans qu'ils soient capturés par l' ^{238}U . Ensuite, l'énergie thermique libérée par les fissions est transportée par un fluide qui la transfère à un autre, qui convertit la chaleur en énergie mécanique dans une turbine, entraînant elle-même un alternateur.

La technologie qui domine aujourd'hui est celle des réacteurs à eau ordinaire, dite « légère », et en particulier des réacteurs à eau sous pression (REP) où cette eau sert de caloporteur et de modérateur de neutrons. Le combustible est sous forme d'oxyde et préalablement enrichi en ^{235}U à hauteur de 4% environ.

Pour fixer quelques ordres de grandeur, rappelons qu'une fission libère une énergie d'environ $3,2 \cdot 10^{-11}$ J (joule), contre 10^{-18} J pour la combustion d'une molécule de méthane. La puissance

Les grandes régions du nucléaire

Selon le scénario Cosime2050, la part de l'énergie nucléaire dans le mix énergétique mondial en 2050 sera de 20%. L'Asie, en pleine croissance économique et avec une consommation d'énergie qui augmente rapidement, aura la plus forte contribution, tout en ayant une production par habitant de l'ordre de 2 000 kWh/an/hab (kWh: kilowattheure). La production nucléaire française étant passée des années 1970-1980 au début du millénaire de zéro à environ 7 000 kWh/an/hab, un déploiement significatif du nucléaire à l'échelle mondiale dans les décennies à venir correspond à une trajectoire moins ambitieuse qu'il n'y paraît.



Une transition vers des réacteurs régénérateurs réclame une anticipation sur plusieurs décennies, car il est nécessaire de leur fournir leur « dose » initiale de plutonium

ÉNERGIE NUCLÉAIRE, ÉNERGIE À TOUT FAIRE ?

Les réacteurs à neutrons lents basés sur l'uranium enrichi sont évoqués pour diversifier les usages au-delà de la seule production d'électricité. Certains projets sont consacrés à la production de chaleur à haute température pour une utilisation par l'industrie ou pour dessaler l'eau de mer, ou encore pour une production d'hydrogène couplée à un réacteur. Il est également possible d'associer une production de chaleur, d'hydrogène et d'électricité, en mode cogénération, afin par exemple de coupler le nucléaire avec des sources renouvelables intermittentes à l'échelle d'un territoire. Ces nouveaux usages sont pensés en lien avec des sites industriels proches et il y a une logique à envisager des réacteurs de faible puissance. Cependant, force est de constater que malgré les nombreuses études de concepts destinés à la production de chaleur et bien que les besoins en chaleur à haute température soient difficiles à décarboner, aucun marché de chaleur nucléaire ne s'est vraiment développé, de même que pour le dessalement d'eau de mer. Pour l'hydrogène, il faut attendre pour savoir si ce vecteur d'énergie, qui souffre encore d'un rendement énergétique global faible, se développera réellement et si le nucléaire peut contribuer à sa production directe ou par l'électricité distribuée sur le réseau.

électrique typique d'un réacteur est de 1 GW_e (gigawatt électrique), soit une puissance thermique de 3 GW_{th} (gigawatts thermiques), ce qui correspond à une masse de matière fissionnée de l'ordre de 1 tonne par an. Le cœur du réacteur contient environ 80 tonnes d'uranium enrichi sous forme d'oxyde, qui reste environ trois à quatre ans en réacteur. On obtient donc un taux d'utilisation de l'ordre de 4 à 5%. Enfin, pour obtenir les 27 tonnes de combustible chaque année, on extrait de terre environ 200 tonnes d'uranium naturel, produisant ainsi 173 tonnes d'uranium appauvri (contenant de l'ordre de 0,25% de ²³⁵U) en sortie de la phase d'enrichissement.

LA VOIE DE LA RÉGÉNÉRATION

Selon des rapports très détaillés, on disposerait de 5 millions de tonnes bien connues et exploitables. Au-delà, les ressources estimées représenteraient entre 10 et 20 millions de tonnes, sans tenir compte de l'uranium présent dans l'eau de mer à faible concentration. Au rythme actuel, de l'ordre de 60000 t/an consommées, l'ensemble des ressources terrestres assureraient quelques siècles de production en se limitant aux capacités contemporaines. Ces ressources sont en revanche insuffisantes s'il s'agit de soutenir durablement des scénarios de croissance forte du nucléaire dans le siècle à venir, comme celui retenu dans l'approche simplifiée Cosime2050.

Il existe néanmoins une façon radicalement différente de mettre en œuvre l'énergie de fission, bien moins dispendieuse en ressources,



Le plutonium, entre capture et fission

Lorsqu'un neutron interagit avec un isotope ^{239}Pu , il peut diffuser et repartir dans une autre direction avec une énergie différente. Mais il peut aussi provoquer une réaction qui change la nature du ^{239}Pu , soit par une capture neutronique, soit par une fission.

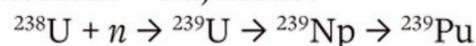
Capture: $^{239}\text{Pu} + n \rightarrow ^{240}\text{Pu}$ (non fissile)

Fission: $^{239}\text{Pu} + n \rightarrow \text{FF}_1 + \text{FF}_2 + \nu n$

Ces deux réactions libèrent de l'énergie, mais 40 fois plus pour la fission, les ν neutrons (en moyenne 2,9) émis permettant de mettre en œuvre une réaction en chaîne. Il existe toute une gamme de « fragments de fission » FF, tous radioactifs au moment de leur production.

La compétition entre ces deux réactions dépend de l'énergie du neutron incident, le rapport de probabilité capture/fission étant de l'ordre de 0,55 dans les réacteurs actuels et de 0,25 dans les réacteurs rapides.

basée cette fois sur le seul ^{238}U . Cet isotope, non fissile, produit par capture d'un neutron suivie de deux décroissances radioactives rapides le plutonium ^{239}Pu , fissile :



Dans un réacteur contenant des noyaux ^{238}U et ^{239}Pu , ce dernier est consommé par fission (production d'énergie et de neutrons) et par capture (production de ^{240}Pu , voir l'encadré ci-contre). Il est possible d'ajuster la proportion entre ces deux noyaux afin que chaque ^{239}Pu soit régénéré par capture d'un neutron par ^{238}U . La masse initiale de plutonium est ainsi maintenue constante et chaque tonne de plutonium consommée correspond à une tonne de ^{238}U consommée. La masse d'uranium est quant à elle maintenue constante par un apport extérieur régulier, lors du recyclage du combustible, d'environ 1 tonne par an (pour 1 GW_e). Un tel réacteur réduirait donc d'un facteur 200 la masse d'uranium naturel utilisée pour une même quantité d'énergie produite. Dans ces conditions, les ressources en uranium laissent envisager une production nucléaire pendant des dizaines de milliers d'années. De plus, les 330 000 tonnes d'uranium appauvri déjà disponibles sur le sol français, issues de la phase d'enrichissement de l'uranium naturel, assureraient une production nucléaire nationale pendant environ 5 000 ans.

Cependant, la régénération n'est pas toujours possible. Dans un système régénérateur, le plutonium produit en moyenne 2,9 neutrons qui doivent remplir deux fonctions: entretenir la réaction en chaîne et régénérer la matière fissile disparue par fission et par capture. Le taux de capture

des neutrons par ^{239}Pu est assez élevé quand les neutrons sont ralentis, rendant impossible la régénération dans les réacteurs de type REP. En gardant les neutrons à haute énergie, proches de leur énergie de production par la fission, cette capture est réduite comparativement à la probabilité de fission et la régénération devient possible.

Le fluide caloporteur de ces réacteurs à neutrons rapides ne peut donc être l'eau qui ralentit trop les neutrons. Le sodium fondu reste aujourd'hui la technologie la plus avancée et les autres combustibles solides envisageables se limitent au plomb fondu ou à l'hélium (gaz). Les technologies régénératrices nécessitent *de facto* un lourd investissement de recherche et développement et seront *a priori* plus chères. Elles s'imposent contre les réacteurs à eau si le prix de l'uranium augmente sensiblement du fait de sa raréfaction ou de l'incapacité à exploiter des ressources existantes pour des questions géopolitiques ou d'impacts environnementaux, par exemple. Une transition vers des réacteurs régénérateurs demande néanmoins une anticipation sur plusieurs décennies, car il est nécessaire de leur fournir leur « dose » initiale de plutonium. Cette masse initiale est dictée par

L'innovation sur l'énergie nucléaire de fission s'est déplacée vers l'Asie

88

des considérations de thermohydraulique et de physique nucléaire. La capacité d'extraire une certaine puissance d'un volume donné de combustible (environ 500 W/cm^3) fixe la masse de combustible (U + Pu) dans un réacteur de 1 GW_e à 44 tonnes avec une concentration Pu/(U + Pu) à 17% pour assurer la régénération, soit une masse de plutonium en réacteur d'environ 8 tonnes.

De plus, le combustible doit régulièrement être retraité afin d'en extraire les produits de fission qui s'accumulent et de remplacer la matière fertile consommée. Lors de ce traitement, le plutonium doit être récupéré et réinjecté dans le nouveau combustible (multirecyclage). Le combustible passe au moins sept ans hors cœur pour être retraité et cinq ans en cœur. L'inventaire total de plutonium immobilisé pour un réacteur rapide de 1 GW_e est donc de l'ordre de $8 \times 5 + 7/5 = 19,2$ tonnes. Des calculs plus précis confirment un inventaire total de plutonium de l'ordre de 20 t/GW_e et il faudrait donc environ 1 200 tonnes pour l'équivalent du parc français actuel. Cet inventaire est ensuite maintenu constant par la régénération. Celui de 20 t/GW_e correspond à ce que produit un réacteur de type REP en cinquante ou soixante ans de fonctionnement. La transition vers la régénération ne se fera qu'à puissance équivalente et il en découle que la capacité du nucléaire à contribuer à la lutte contre le dérèglement climatique est d'abord conditionnée à celle des filières actuelles, fortement consommatrices d'uranium. La régénération permet d'envisager une transition vers un système durable, mais sans effet multiplicateur significatif à l'échelle du siècle. En clair, si l'on conservait le plutonium

produit par tous les réacteurs du parc actuel jusqu'à ce que ces derniers atteignent chacun 60 ans, nous disposerions d'un stock de plutonium suffisant pour alimenter un parc équivalent (en puissance électrique) fonctionnant en régénération.

Une pénurie d'uranium limiterait la contribution des réacteurs de la génération actuelle à la transition énergétique et également, dans la même proportion, celle des réacteurs régénérateurs. Paradoxalement, les limites de disponibilité d'uranium naturel s'imposent ainsi à leur façon aux réacteurs régénérateurs qui ne devraient pas en dépendre. Il n'y a donc pas de réelle compétition entre filières actuelles et régénératrices.

DEUX STRATÉGIES INCOMPATIBLES

La France met en œuvre un premier recyclage du plutonium dans les REP, sous forme de combustible MOX (pour *mixed oxides*, soit «mélange d'oxydes»). Cela détruit environ 30% du plutonium et nous disposons à l'heure actuelle de 350 tonnes environ de plutonium civil contenu dans les combustibles usés. La possibilité de multirecyclage du plutonium des MOX usés est à l'étude. Cela conduirait à réduire les inventaires de plutonium (sans diminuer significativement la consommation d'uranium), ce qui est incompatible avec une transition vers la régénération. Ces deux stratégies sont antinomiques alors même qu'elles engagent la nation sur des temps très longs.

Actuellement, l'arrêt du projet *Astrid* (prototype de réacteur régénérateur au sodium) et les débats sur le multirecyclage du plutonium en REP font

La question des ressources

L'invasion de l'Ukraine par la Russie a montré, s'il en était besoin, le rôle de la géopolitique dans l'économie de l'énergie : les prix du gaz, puis ceux de l'électricité, ont temporairement décuplé, car ces deux pays fournissaient environ 45% du gaz européen. Qu'en est-il de l'uranium ? Est-il aussi dépendant du contexte mondial ? La question est importante, car la Russie, encore, et le Niger, dont le président a récemment été renversé par un coup d'État, approvisionnent l'Europe à hauteur de 45% de ses besoins. Qu'on se rassure, les risques de rupture sont radicalement différents, et cela tient aux caractéristiques physiques et géographiques de ces deux matières.

L'uranium est peu radioactif, facile à stocker et contient une densité d'énergie phénoménale. La France possède ainsi sur son sol des réserves couvrant plusieurs années de ses besoins, diminuant d'autant sa dépendance aux pays producteurs. De plus, après Fukushima, quelques dizaines de réacteurs ont été mis à l'arrêt, ainsi que des mines d'uranium correspondant à la moitié de la production mondiale ; ces dernières sont à même de redémarrer rapidement. Les ruptures technologiques, bien qu'elles rebattent les cartes, ne semblent pas perturber les grands équilibres ni vraiment repousser l'horizon de temps de consommation des « ressources raisonnablement assurées ». C'est ce qui fut constaté lors de l'émergence du Kazakhstan sur le marché, à hauteur de 40% de la production mondiale aujourd'hui. Cet événement, qui a marqué le redémarrage de la production à la fin des années 2000, est la conséquence d'une nouvelle technique, en l'occurrence la « lixiviation ». Elle consiste à injecter dans le sol un liquide capable de mobiliser l'uranium puis à le traiter en surface et à le réinjecter. Autre atout, bien qu'indispensable aux filières actuelles, le minerai d'uranium ne coûte que quelques pourcents du prix de l'électricité. À court et moyen terme, des variations sensibles du prix de l'uranium entraîneront une croissance de la production sans impacter significativement le coût de l'électricité produite. Cependant, à long terme, la capacité de l'industrie minière à fournir l'uranium à un parc nucléaire en développement et à même de contribuer à la lutte contre le réchauffement climatique reste incertaine. Seule la régénération aidera à s'affranchir, progressivement, de la dépendance aux mines d'uranium.

pencher vers un *statu quo* au niveau mondial au moment même où est annoncée la construction de nouveaux réacteurs. Ces messages contradictoires entretiennent un grand flou sur la vision à moyen et long terme de la politique énergétique française qui mériterait d'être clarifiée rapidement.

À cette confusion s'ajoute l'ambiguïté du terme de « 4^e génération », très répandu quand il s'agit de parler de l'avenir du nucléaire, et qui s'applique à des réacteurs répondant à des enjeux différents en matière de consommation de ressource. Au vu de ce qui précède, il convient plutôt de séparer les différentes technologies de réacteurs en deux familles, l'une non durable, basée sur le ^{235}U , et l'autre durable, basée sur le ^{238}U et la régénération.

Les installations en service et en construction sont de forte puissance (de l'ordre de 1 GW_e et au-delà), mais il est possible que des réacteurs moins puissants trouvent un marché. La majorité des concepts fonctionnent sur le même principe que les réacteurs à eau actuels, avec un combustible à uranium enrichi modéré et refroidi à l'eau légère. Pour certains concepts de petite taille, il sera nécessaire cependant d'augmenter la teneur en ^{235}U à 20% environ, proche de la limite fixée par les règles mondiales de non-prolifération.

Le succès des petits réacteurs tiendra à leur capacité à être construits rapidement et déployés en grand nombre avec un coût compétitif, mais il est probable que le développement de cette première famille de réacteurs est et sera basé d'abord sur des réacteurs de grande puissance consacrés à la production d'électricité, parmi lesquels l'EPR2 et ses concurrents (AP1000, VVER, CPR1000).

L'ALTERNATIVE DES SELS FONDUS ET DU CYCLE THORIUM

Le concept de réacteur au thorium, fonctionnant avec un combustible liquide, promet à la fois la régénération et l'affranchissement de la dépendance à l'uranium. En dépit de nombreuses initiatives récentes, les verrous technologiques restent cependant très nombreux. Les réacteurs à sels fondus sont étudiés depuis les années 1950 avec notamment un prototype expérimental construit aux États-Unis. À l'origine, ils ont été imaginés pour utiliser le cycle thorium avec des neutrons lents en mode régénération. Comme l' ^{238}U , le noyau ^{232}Th est fertile et peut être utilisé pour mettre en œuvre la régénération, basée sur l'isotope fissile ^{233}U . Théoriquement possible avec des neutrons lents, elle est difficile à maintenir du fait de l'accumulation des produits de fission qui capturent des neutrons et dégradent le bilan neutronique. Cela nécessite d'extraire rapidement certains éléments particulièrement neutrophages. Le combustible liquide, servant à la fois de caloporteur et de combustible et circulant dans le cœur et les échangeurs, permet justement ce traitement. Sur le papier, on obtient un système régénérateur avec un inventaire réduit de matière fissile, de l'ordre de 2 à 4 t/GW_e. Cette caractéristique serait un avantage majeur puisqu'elle offrirait un effet multiplicateur lors de la transition vers la régénération et la possibilité de découpler la capacité du nucléaire à se déployer et les ressources exploitables en uranium. Cependant, depuis quelques années, l'argumentation a changé d'angle et les seuls aspects de sûreté sont mis

en avant. Le combustible liquide est effectivement dispersable de façon passive, en utilisant par exemple un bouchon de sel qui peut fondre et laisser passer le combustible en cas de montée en température. La dilatation du sel combustible est également favorable puisqu'elle conduit à diminuer la masse de matière fissile en zone critique, ce qui tend à stabiliser naturellement la réaction en chaîne en situation d'accident. Quant au combustible lui-même, de nombreuses configurations sont possibles, uranium enrichi ou cycle U/Pu régénérateur, cycle thorium alimenté en ^{235}U , plutonium ou ^{233}U (préalablement produit ailleurs), actinides mineurs destinés à être détruits (transmutation de déchets). Les sels les plus étudiés sont des sels fluorures ou chlorures. Le point commun à tous ces concepts reste un faible niveau de maturité industrielle et un long chemin de recherche et développement à mener. Parmi les obstacles à surmonter, citons le comportement et la stabilité des sels, les risques de précipitations, notamment aux surfaces, la tenue des matériaux au contact des sels, le comportement thermomécanique du système entier en situation normale ou accidentelle, la neutronique très particulière d'un cœur

critique où le combustible circule. La diversification des systèmes à sels fondus proposés peut laisser circonspect. Il est difficile de distinguer une ligne directrice commune aux nombreux systèmes à combustible liquide qui fleurissent depuis quelques années, tous plus innovants les uns que les autres. Si les nouveaux acteurs privés qui émergent proposent une communication efficace et renouvellent l'image du nucléaire, notamment auprès des jeunes, il n'est pas encore certain qu'ils puissent relever les nombreux défis scientifiques et techniques préalables au développement de concepts nucléaires réalistes à la hauteur de l'enjeu climatique.

Un échantillon d'allanite, minéral contenant du thorium radioactif.



besoin d'une première charge de matière fissile (plutonium dans le cycle U/Pu) dont la « ressource » est de fait limitée, puisqu'elle met du temps à être produite par les réacteurs actuels.

S'ajoute à la difficulté de la transition vers une filière régénératrice une configuration économique défavorable, notamment du fait que la part du combustible nucléaire, à très grande densité d'énergie, dans le coût de l'électricité nucléaire est faible. Cette situation n'encourage pas les investissements dans la recherche et le développement des réacteurs régénérateurs alors même qu'il faudrait anticiper leur déploiement éventuel sur plusieurs décennies.

LE DÉCROCHAGE DE L'EUROPE

En parallèle de ces décisions stratégiques qui relèvent des États, la recherche a ses propres défis à relever. Citons par exemple le traitement et le recyclage de combustibles usés de plus en plus chargés en plutonium, la quête de matériaux innovants résistants à la corrosion et à l'irradiation, l'optimisation des coûts... S'ajoute à ces défis un contexte où les grandes infrastructures expérimentales ferment peu à peu et où le dynamisme de la recherche et de l'innovation sur l'énergie nucléaire de fission s'est d'ores et déjà déplacé vers l'Asie et où l'Europe semble être en passe de décrocher sur la scène internationale. Pas de doute, la question du nucléaire, et en particulier celle de la transition vers la régénération, met à l'épreuve la société dans sa capacité de gérer des temporalités longues.

Si la première famille fait peu de cas du cycle du combustible, la seconde, destinée à mettre en œuvre la régénération, se doit de recycler régulièrement son combustible. La seule filière régénératrice qui a atteint un stade industriel est celle des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium. En France, cette filière a été étudiée grâce aux réacteurs expérimentaux Rapsodie, Masurca puis Phénix (250 MW_e – méga watt électrique). Superphénix, prototype français de 1 200 MW_e, a été arrêté en 1997, quelques années après son démarrage, dans un contexte défavorable industriellement (pas d'urgence à économiser l'uranium) et politiquement.

Les solutions de rechange au réacteur sodium, en restant dans les systèmes à combustibles solides, ne sont pas nombreuses. Le plomb est un caloporteur liquide qui, comme le sodium, garde les neutrons à haute énergie, mais souffre d'un problème de corrosion des matériaux de structure. Les réacteurs refroidis au gaz pâtissent également de difficultés.

Malgré un déploiement nucléaire seulement frémissant au niveau mondial, la question de la ressource et de la transition vers la régénération reste un point clé qui dimensionne le rôle à long terme du nucléaire dans les efforts de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

La transition vers des réacteurs durables du point de vue de la ressource, le jour où l'uranium viendrait à manquer, est complexe à anticiper et à mettre en œuvre pour deux raisons principales. D'une part, les temporalités du nucléaire sont longues. D'autre part, les réacteurs régénérateurs ont

— Les auteurs —

- > **Sylvain David**
est chercheur CNRS au laboratoire des deux infinis Irène Joliot-Curie (IJCLab).
- > **Sandra Bouneau**
est chercheuse au laboratoire des deux infinis Irène Joliot-Curie (IJCLab).
- > **Adrien Bidaud**
est professeur des universités à l'Institut polytechnique de Grenoble.

— À lire —

- > Inventaire national des matières et déchets radioactifs, Les essentiels, Andra, 2023. inventaire.andra.fr
- > **J. Liang et al.**, Assessment of strategy robustness under disruption of objective in dynamic fuel cycle studies, *Annals of Nuclear Energy*, 2021.
- > **S. Bouneau et al.**, Building a world energy in 2050, *Annales de physique*, 2010.

Le réacteur Iter est la tentative la plus ambitieuse pour domestiquer l'énergie de la fusion. Mais ce n'est pas le seul projet à viser ce rêve de physicien. Revue des effectifs en images.

92

FUSION

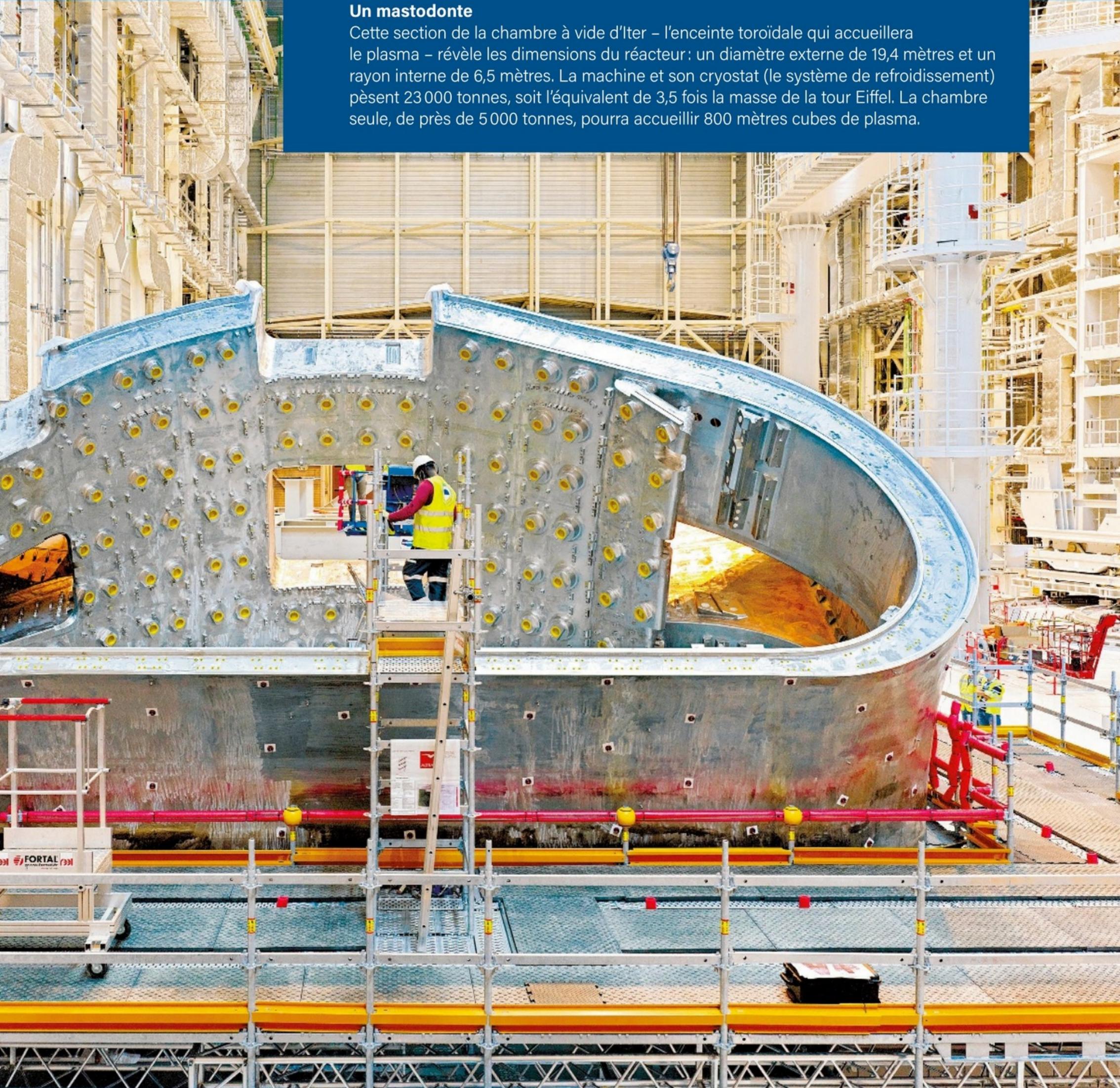
Un géant et ses avatars



© Sauf mention contraire, les images sont de © Iter organization

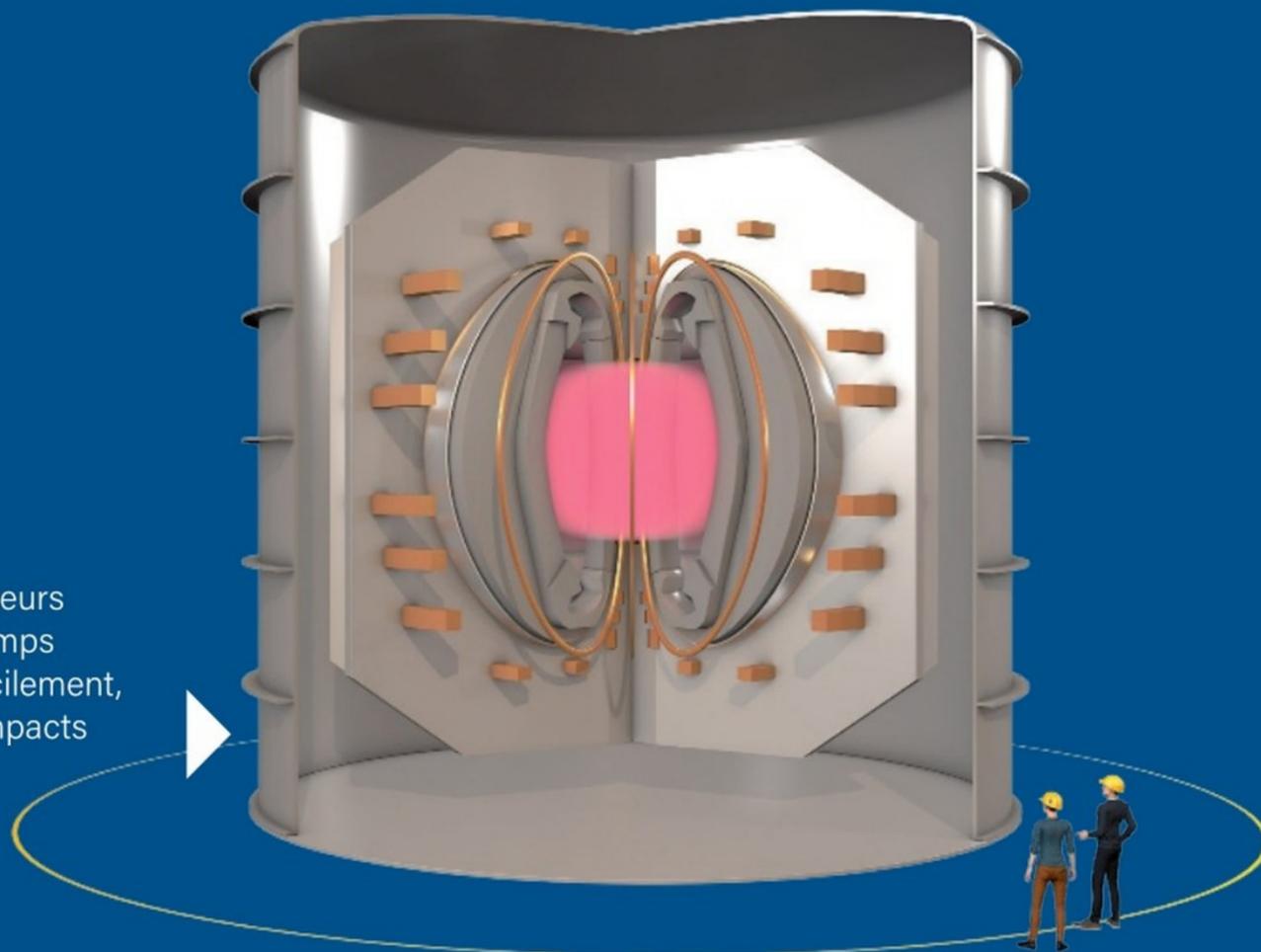
Un mastodonte

Cette section de la chambre à vide d'Iter – l'enceinte toroïdale qui accueillera le plasma – révèle les dimensions du réacteur: un diamètre externe de 19,4 mètres et un rayon interne de 6,5 mètres. La machine et son cryostat (le système de refroidissement) pèsent 23 000 tonnes, soit l'équivalent de 3,5 fois la masse de la tour Eiffel. La chambre seule, de près de 5 000 tonnes, pourra accueillir 800 mètres cubes de plasma.



Tokamak à taille réduite

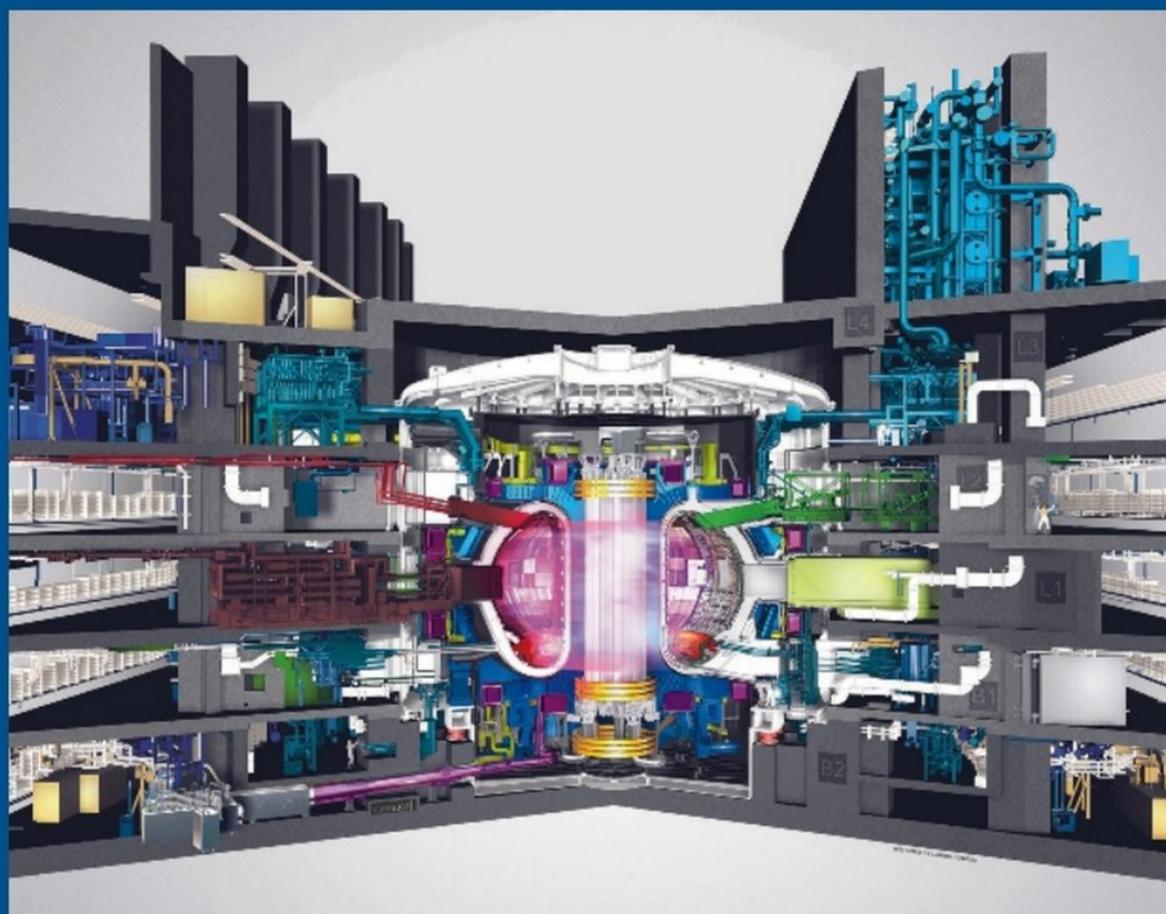
Les aimants constitués de supraconducteurs à haute température produiront des champs plus puissants et seront refroidis plus facilement, ce qui autorisera des tokamaks plus compacts et sphériques.



Une kyrielle de géométries

L'option technologique choisie pour Iter est celle du tokamak (*ci-dessous*). Cependant, plus de trente entreprises privées spécialisées dans la fusion ont développé d'autres projets qui reposent sur des choix différents. Celles qui ont rendu leurs données publiques ont annoncé plus de 2,4 milliards de dollars (2,16 milliards d'euros) de financement. Si les défis techniques restent nombreux (stabilité du plasma, évacuation de la chaleur, résistance des matériaux...), certaines espèrent des réacteurs commercialisables au cours de la décennie 2030.

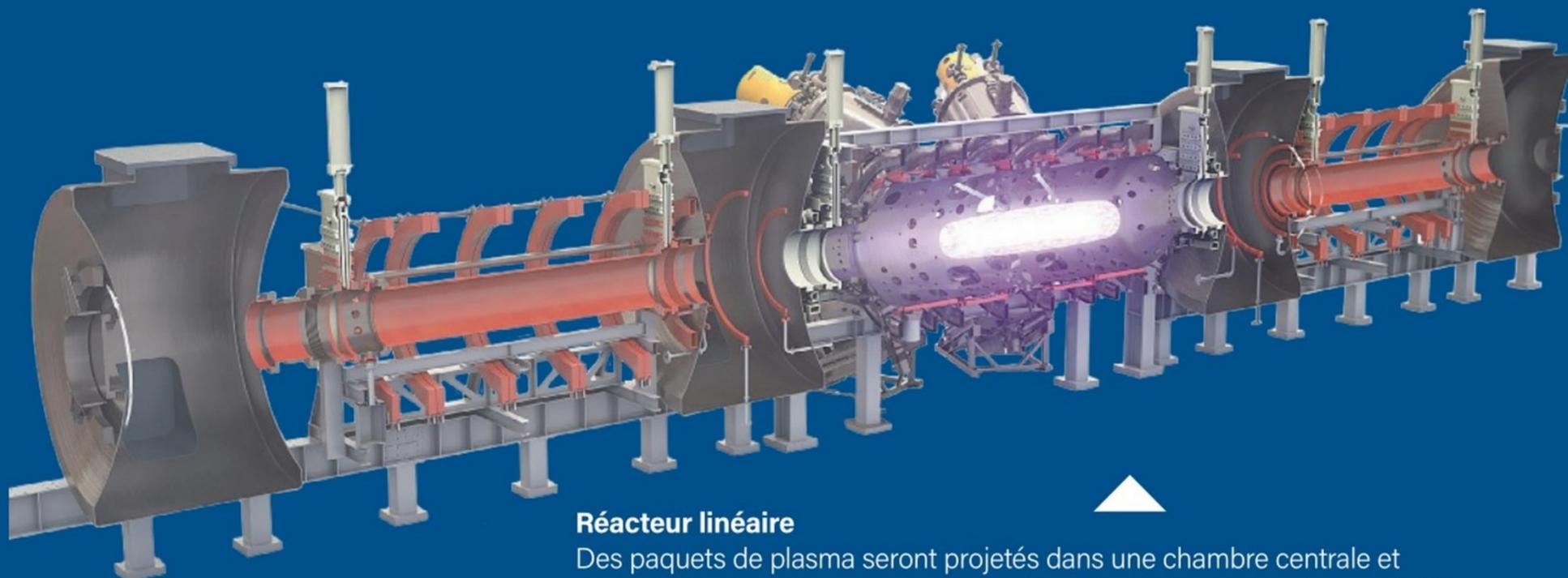
94



Tokamak

Dans un tokamak comme Iter, des bobines magnétiques supraconductrices – refroidies par de l'hélium liquide – retiendront le plasma (*en mauve*) dans une cuve toroïdale.

Image du haut : © Tokamak Energy



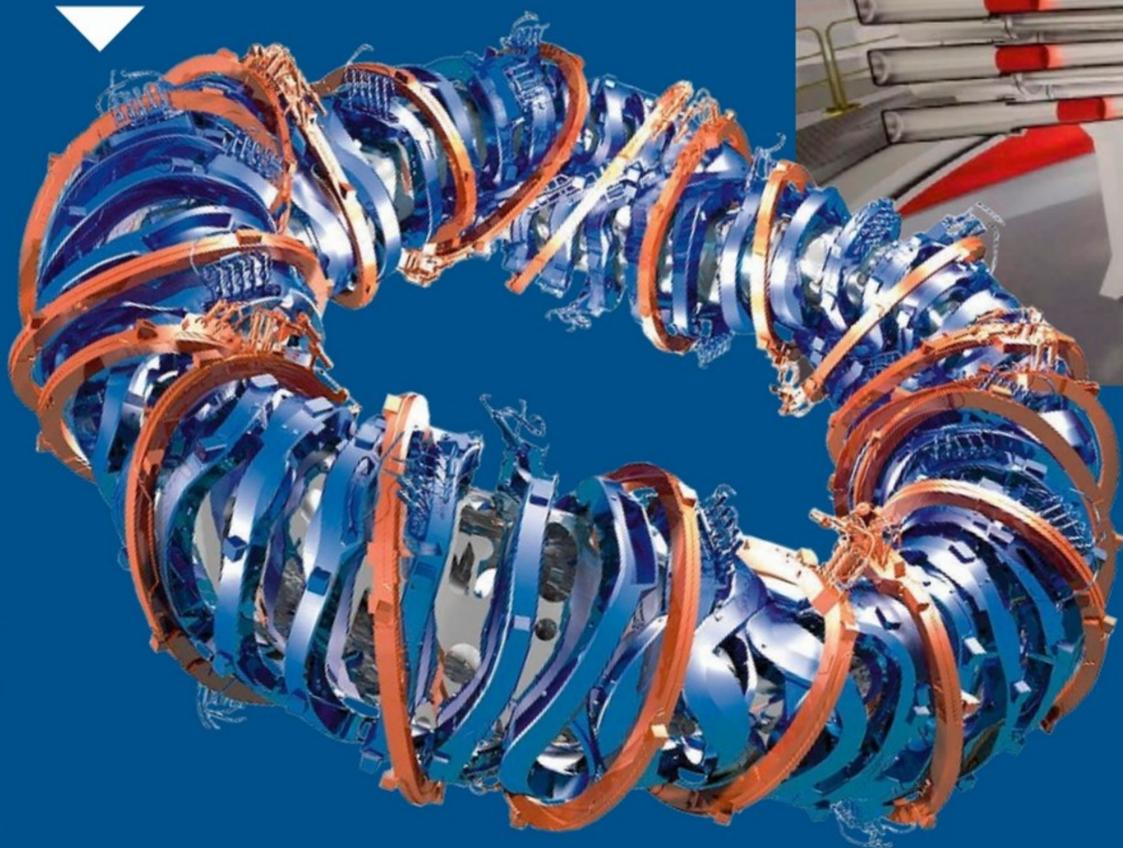
Réacteur linéaire

Des paquets de plasma seront projetés dans une chambre centrale et comprimés à l'intérieur d'un solénoïde (un électroaimant formé d'une bobine de fil enroulé), un peu comme dans un accélérateur de particules. Au moment de la fusion, le plasma se dilatera, son champ magnétique interagira alors avec celui autour du réacteur : en conséquence, se créera un courant électrique.



Stellarator

Des champs magnétiques torsadés en une boucle complexe confineront le plasma. Cette conception a été imaginée dans les années 1950 par l'astrophysicien américain Lyman Spitzer, avant d'être abandonnée. Elle a été reprise récemment à l'institut Max-Planck de physique des plasmas, à Greifswald, en Allemagne, avec le projet Wendelstein 7-X.

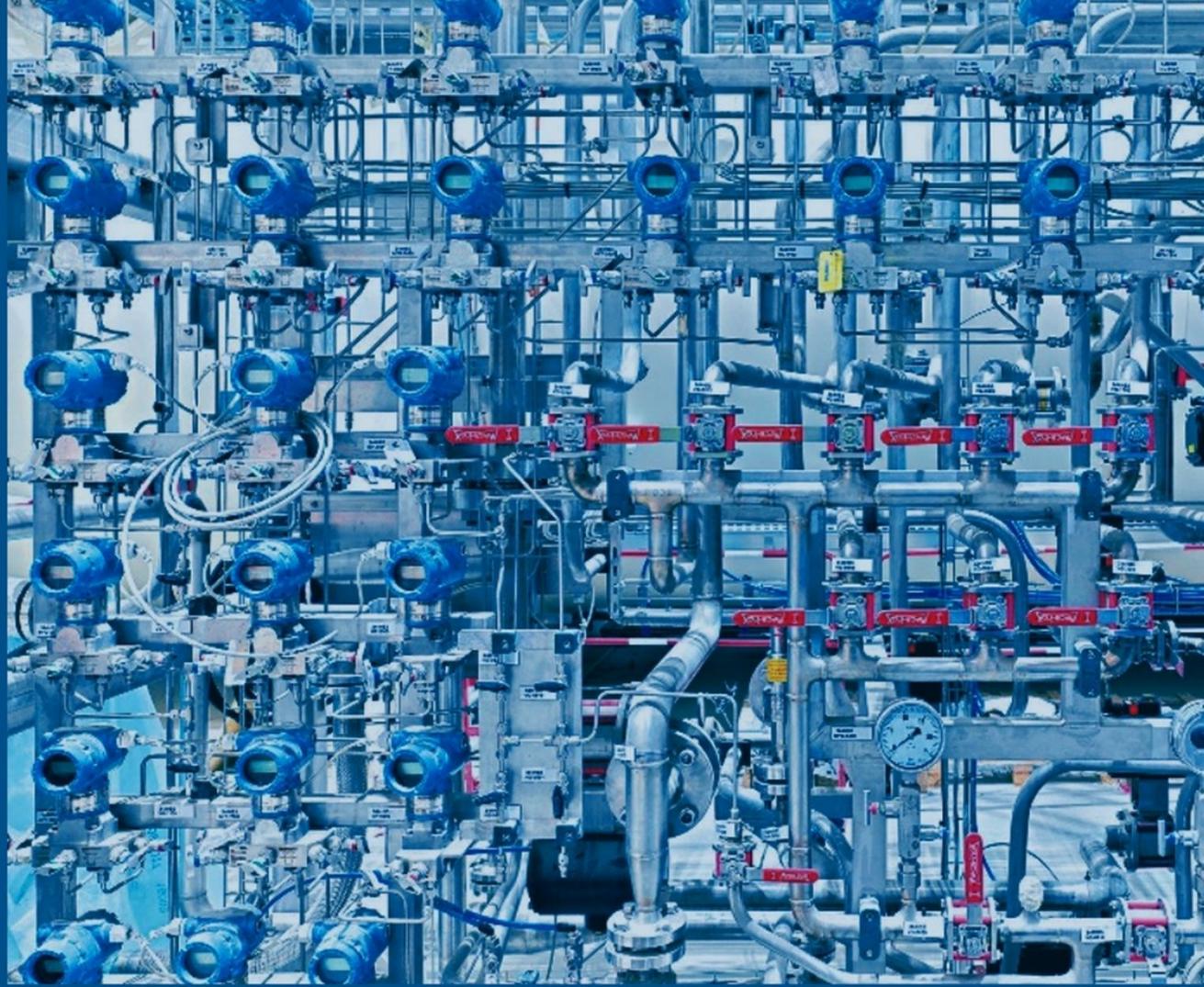


Réacteur à cible magnétisée

Une boule de métal liquide (par exemple du plomb et du lithium) en rotation confinerà le plasma, que des pistons comprimeront ensuite afin de déclencher la fusion. La pression se relâchera, et le processus recommencera. Cette technique serait beaucoup moins énergivore que le tokamak.

Une tuyauterie du froid

Dans Iter, les aimants supraconducteurs du réacteur fonctionneront à des températures proches du zéro absolu. Le courant électrique y circulant avec une résistance nulle, ils produiront des champs magnétiques très intenses. Ces basses températures sont obtenues grâce à un cryostat, un système de refroidissement à l'hélium liquide contrôlé par un jeu complexe de vannes manuelles et de capteurs de pression, de température et de débit. Le dispositif sera le plus grand système de refroidissement cryogénique du monde après celui du LHC, au Cern.



— Sur le web —

> Le site internet d'Iter :
www.iter.org

Des aimants sur mesure

Quatre des six aimants poloïdaux, composés d'alliages de niobium-fer et de niobium-titane, seront les seuls éléments d'Iter fabriqués sur place. De 17 à 24 mètres de diamètre pour un poids de 400 tonnes chacun, ils seront en effet trop grands pour être produits ailleurs et transportés.





Poloïdal et toroïdal

Le plasma d'ITER sera spatialement confiné dans le tokamak grâce à un ensemble d'aimants. Cet ensemble comprendra six anneaux horizontaux (*ci-dessous, l'un d'eux*) empilés autour de la chambre à vide. Ces aimants supraconducteurs produiront le champ magnétique poloïdal (les lignes de champ sont perpendiculaires au plan de l'anneau). Les 18 bobines verticales (hautes de 17 mètres et larges de 7 mètres, pesant chacune 360 tonnes) qui s'enroulent autour du tore de la chambre à vide engendreront quant à elles le champ toroïdal (les lignes de champ sont dirigées le long de l'anneau). Le champ magnétique global de 13 teslas induira et maintiendra le courant plasma.



“Avec Iter, nous touchons au but

Alain Bécoulet
est responsable scientifique
du projet Iter depuis
juin 2023. Il a été directeur
de recherche au CEA
et notamment directeur
de l'IRFM, l'Institut
de recherche sur la fusion
par confinement magnétique.



L'installation d'Iter, en cours de construction, cristallise autour d'elle une forte attente aussi bien des acteurs du secteur, chercheurs et industriels, que du grand public. À quand la première fusion ?

Quel est le principe de la fusion ?

L'idée est de mimer en partie ce qui se passe dans le Soleil. Une étoile est une boule de plasma (un état de la matière où les atomes sont totalement ionisés) qui sous l'effet de sa propre masse crée en son cœur des conditions de pression et de température très élevées, suffisantes pour amorcer et entretenir des réactions de fusion nucléaire. Typiquement, des noyaux d'hydrogène se lient pour donner de l'hélium. Ce processus libère de l'énergie, celle qui fait briller les étoiles.

Sur Terre, nous souhaitons le faire à petite échelle. Il est bien sûr impossible de reproduire les conditions de pression qui existent au centre du Soleil. Or fusionner deux noyaux atomiques impose de vaincre la répulsion coulombienne qui s'exerce entre eux, car ils sont tous deux chargés positivement. La solution est de leur donner une vitesse élevée en augmentant la température.

Des travaux ont montré que la réaction la plus simple à réaliser en laboratoire (c'est-à-dire avec une probabilité de réaction élevée) est celle du deutérium et du tritium, deux isotopes de l'hydrogène comportant respectivement un et deux neutrons. Lors de leur fusion, ils produisent un noyau d'hélium et émettent un neutron. Les températures requises sont tout de même de l'ordre de 150 millions de degrés, soit dix fois celle qui règne au cœur du Soleil ! Aucun

matériau ne peut résister au contact d'un plasma d'une telle température.

Quelles sont les solutions ?

Il existe deux approches. La fusion inertielle consiste à mettre les réactifs dans une petite capsule que l'on fait imploser en la frappant simultanément avec plusieurs lasers de haute puissance. L'autre piste est celle du confinement magnétique. On crée une «boîte» aux parois immatérielles à l'aide d'un champ magnétique. Comme les particules du plasma (noyaux et électrons) sont toutes chargées, elles décrivent des trajectoires hélicoïdales qui suivent les lignes du champ magnétique. Avec une géométrie du champ adaptée, le plasma reste confiné dans cette boîte magnétique, loin des parois.

Différentes solutions de confinements magnétiques ont été imaginées depuis les années 1950. Le principe du tokamak a été forgé en Union soviétique par plusieurs physiciens, dont les deux Prix Nobel Igor Tamm et Andreï Sakharov. Le terme «tokamak» est un acronyme en russe signifiant «chambre toroïdale avec bobines magnétiques» : de fait, la chambre est en forme de tore (une bouée) et est entourée d'aimants verticaux dont le champ magnétique dessine des cercles horizontaux dans l'enceinte. Le premier tokamak soviétique opère dès 1958.

Quelles ont été ensuite les grandes étapes du développement des tokamaks ?

Après une première phase exploratoire, une stratégie globale a été mise en place à partir des années 1980. Les différents tokamaks construits dans le monde ont été conçus pour se concentrer chacun sur des aspects particuliers du problème. Par exemple, *Jet* (le *Joint European Torus*), au Royaume-Uni, s'intéresse particulièrement à la physique du plasma, et à la performance en matière de puissance de fusion.

En France, *Tore Supra*, devenu *West* après une vaste campagne d'améliorations, a un programme complémentaire et plus technologique avec l'utilisation d'aimants supraconducteurs et de composants du tokamak capables d'encaisser en continu la forte chaleur du plasma. Les résultats obtenus par ces diverses expériences ont aidé à optimiser la conception de la génération suivante de tokamaks, représentée par *Iter*, pour atteindre le meilleur rendement possible.

100

Comment définit-on le rendement ?

Ce paramètre est souvent source de confusion. Le rendement ultime ou commercial, celui qui comptera au moment de la commercialisation, est celui «de la prise à la prise». Un réacteur à fusion est avant tout un amplificateur de puissance: il est nécessaire d'injecter de l'énergie et de la matière pour obtenir une plus grande quantité d'énergie. L'énergie apportée sert à chauffer le plasma, ainsi qu'à alimenter et refroidir les aimants... Il y a donc bien une notion de rendement dans les réacteurs à fusion: c'est le rapport de la puissance électrique produite et de celle consommée par la centrale. Quand un réacteur commercial prendra, par exemple, 100 mégawatts (MW) sur le réseau et y restituera 1 000 MW: le rendement sera de 10.

Mais les tokamaks actuels, y compris celui d'*Iter*, restent des installations de recherche. On s'intéresse donc au «rendement plasma», qui est simplement le rapport de la puissance produite à celle injectée dans le plasma pour le chauffer.

L'objectif premier d'*Iter* est un rendement plasma de l'ordre de 10. Son second objectif est de montrer que le dispositif peut maintenir un plasma pendant de longues périodes.

LA RÉPARTITION DES PROBLÈMES ENTRE LES DIFFÉRENTS TOKAMAKS PERMET DE CONCLURE QUE LE FAISCEAU DE RÉCENTES AVANCÉES EST DE BON AUGURE POUR ITER

Alors qu'*Iter* n'est pas encore opérationnel, plusieurs résultats dans le domaine de la fusion ont été annoncés ces derniers mois. De quoi s'agit-il ?

Commençons par saluer le résultat du *Nif* (*National Ignition Facility*), l'organisme de fusion inertielle américain. En août 2021, et à nouveau en 2022, l'installation du laboratoire Lawrence-Livermore, en Californie, a atteint un «rendement plasma» de 70% en produisant 1,3 mégajoule (MJ) en quatre milliardièmes de seconde. La fusion inertielle se confronte à des défis techniques très différents des tokamaks et c'est enthousiasmant de voir que cette piste avance aussi.

Les tokamaks ne sont pas en reste. En 1997, *Jet* avait établi un record de 16 MW pendant 0,15 seconde et avec un rendement proche de 100%. En août 2021, le même réacteur a maintenu une puissance de 10 MW, mais pendant 5 secondes. Cela a permis une production d'énergie record de 59 MJ (qui correspond au produit de la puissance par la durée). L'énergie injectée dans le plasma pour le chauffer étant de l'ordre de 200 MJ, le rendement est de 25%.

Le tokamak *Jet* ne peut pas maintenir ce régime plus longtemps pour des raisons techniques. C'est là que le résultat du tokamak chinois *East* (*Experimental advanced superconducting tokamak*) est encourageant. Fin 2021, le dispositif a maintenu un plasma à environ 70 millions de degrés pendant 1 056 secondes, soit plus de

17 minutes, battant ainsi le record détenu par *Tore Supra* de 390 secondes en 2003. C'est une belle démonstration de la synergie mondiale, les aimants d'*East* ayant bénéficié d'un transfert de technologie en provenance de *Tore Supra*.

C'est cette répartition des problèmes à traiter entre les différents tokamaks qui nous permet de conclure que le faisceau de récentes avancées est de bon augure pour *Iter*, dont la conception est une sorte de synthèse de ces diverses expériences.

Venons-en donc à *Iter*. Quand le projet a-t-il débuté ?

Iter est l'acronyme anglais pour «réacteur thermonucléaire expérimental international» (il associe 35 pays) et signifie «chemin», en latin. Le projet a été discuté dès 1985, notamment lors d'une rencontre entre Ronald Reagan et Mikhaïl Gorbatchev. L'acte de naissance est signé en 1988. Une longue phase de conception s'en suit. En 2005, le site de Cadarache, dans le sud de la France, est officiellement retenu pour accueillir le réacteur.

La construction du bâtiment du tokamak a commencé en 2013. Actuellement, la structure en béton est terminée, une partie des systèmes cryogéniques, électriques et de refroidissement sont en place. L'assemblage de la machine a démarré. Ce projet est souvent comparé au programme *Apollo*, de la Nasa, par son envergure et sa complexité. Près de 500 entreprises sont impliquées dans sa construction. Les pièces du tokamak sont fabriquées dans différents pays et doivent être transportées sur place. Il faut gérer ce puzzle tridimensionnel avec un chantier qui s'étend sur plus de dix ans. D'un point de vue technique, la machine repose sur des technologies de pointe: on parlait de la cryogénie, mais c'est aussi le cas pour le contrôle du plasma, son chauffage, la qualité des matériaux...

Quelles sont les dimensions du réacteur d'*Iter* ?

Le réacteur est intégré dans un complexe de trois bâtiments sur une hauteur de 60 mètres et une largeur de 120 mètres. Le tokamak en lui-même est composé de différentes parties. La chambre à vide toroïdale pèse près de 5000 tonnes

pour un diamètre externe de 19,4 mètres et un rayon interne de 6,5 mètres. La hauteur maximale est de 11,3 mètres. La chambre peut accueillir 800 mètres cubes de plasma.

Il faut ajouter trois systèmes d'aimants. Les 18 aimants toroïdaux verticaux s'enroulent autour de la chambre à vide. Ils produisent un champ magnétique qui s'élève à 5,3 teslas pour confiner le plasma. Cependant, avec ce seul champ, on constate que les particules du plasma subissent une déviation verticale. La courbure du champ magnétique exerce une sorte de force «centrifuge»: les électrons partent dans une direction et les noyaux dans l'autre. Cette séparation des charges conduit à une perte rapide du confinement. Le problème a été résolu par les chercheurs soviétiques dans les années 1950. Un solénoïde de 18 mètres de hauteur pour 4,3 mètres de diamètre et un poids de 1 000 tonnes passe par l'axe central du tore et crée un courant induit qui circule dans le plasma et s'oppose à la dérive des particules.

Pour compléter le dispositif, six aimants dits «poloïdaux» entourent l'ensemble dans le plan horizontal. Les plus grands (24 mètres de diamètre) ont dû être construits sur place. Leur rôle est de déformer le plasma pour éviter qu'il n'entre en contact avec l'enceinte et d'améliorer sa stabilité.

Le plasma n'en reste pas moins un milieu très instable où peuvent naître des «disruptions». Ces coups de foudre conduisent à la perte totale du confinement, mais peuvent aussi endommager le revêtement des parois de la chambre. Des systèmes sont à l'étude pour limiter leur occurrence et amortir leur impact.

Comment le plasma est-il chauffé ?

Plusieurs dispositifs participent. Le courant induit par le solénoïde contribue grâce à l'effet Joule. Il est complété par des systèmes externes. Le premier consiste à injecter des atomes de deutérium neutres à très haute énergie (plus «chauds» que le plasma) dans le plasma. Lors de collisions dans le plasma, ces atomes s'ionisent et transfèrent leur énergie au plasma, ce qui conduit à augmenter la température. Le système suivant reprend le principe du four à microondes: des ondes de fréquences comprises entre 40 et 55 mégahertz excitent les ions du plasma.

On a une sorte de galaxie, avec une grosse étoile, Iter, entourée d'une myriade de projets plus modestes

Un dernier dispositif émet des ondes à 170 gigahertz pour exciter les électrons. Un grand intérêt de ce système est qu'en accélérant les électrons dans une seule direction, il entretient le courant électrique dans le plasma, assurant sa stabilité. Il accroît aussi l'effet Joule et donc chauffe le plasma.

Outre le chauffage, quels sont les défis techniques liés au combustible ?

Le réacteur d'*Iter* réalisera la fusion du deutérium et du tritium. Le premier isotope, stable, se trouve par exemple dans l'eau de mer (il représente 1 atome d'hydrogène sur 6400 dans les molécules d'eau). Un processus de distillation est nécessaire, mais il est facilement accessible. Le tritium quant à lui n'existe pas à l'état naturel et a une période de demi-vie de 12,3 ans. Pour *Iter*, il sera produit ailleurs (ce qui coûte cher) et directement injecté dans la chambre à vide.

À terme, l'idée est de produire le tritium directement dans le réacteur. La fusion du deutérium et du tritium produit des neutrons qui échappent au champ magnétique. En tapissant les parois de la chambre avec du lithium, la capture d'un neutron par cet élément produit du tritium et de l'hélium. *Iter* aura recours à des modules dits « tritigènes », intégrés à la paroi pour tester ce mode de production.

Le lithium est relativement abondant sur Terre, mais il n'existe pas encore de grande filière pour son exploitation, même si cet élément

suscite de plus en plus d'intérêt, notamment dans le secteur des batteries. Il reste donc à inventer une filière d'extraction efficace et respectueuse de l'environnement.

L'émission de neutrons n'est-elle pas problématique ?

Si le combustible de la fusion ne devient pas lui-même radioactif, l'émission de neutrons de haute énergie peut activer certains atomes des parois de la chambre à vide et rendre ces matériaux radioactifs. Par exemple, un élément problématique est le chrome 59 stable, qui se transforme en chrome 60. Il faut donc choisir des matériaux d'une grande qualité et dénués d'éléments susceptibles d'être activés.

Globalement, la radioactivité produite par ces neutrons est beaucoup plus faible que dans les réacteurs à fission. On obtient des déchets avec des durées de vie d'au plus quelques dizaines d'années. Néanmoins, pour *Iter*, nous avons intégré toutes les procédures et normes de la sûreté nucléaire, avec la maintenance opérée par des robots pour aller chercher les pièces à remplacer, etc. Le démantèlement a aussi été pris en compte.

Pour la question du vieillissement des matériaux soumis à une irradiation intense de neutrons, une importante activité de recherche et de développement est toujours en cours pour trouver les meilleures solutions pour les successeurs d'*Iter*. Des dispositifs expérimentaux sont en cours de préparation en Espagne et au Japon sur cette question.

Existe-t-il des pistes de réacteurs sans émission de neutrons ?

Effectivement, une firme comme TAE Technologies explore la piste de la fusion hydrogène-bore 11. Elle ne produit pas de neutrons, mais il faut chauffer dix fois plus le plasma que pour *Iter*. Or, à de telles températures, les électrons commencent à perdre de l'énergie par rayonnement. Cela devient difficile de trouver les bons paramètres pour une configuration stable.

Mais même si ce projet n'aboutissait pas, je considère que toutes ces initiatives sont très intéressantes. On assiste à une véritable accélération dans le secteur de la fusion. On a une sorte de galaxie, avec une grosse étoile, *Iter*, entourée d'une myriade de projets plus modestes, qui ont leur utilité.

Quel est le calendrier pour les années à venir ?

Le premier plasma sans fusion était prévu pour 2025. Nous avons pris du retard, notamment à cause du Covid-19 et de la fabrication de certains composants. Nous travaillons actuellement à planification modifiée, comme un jeu de Tetris, et je reste optimiste pour le premier plasma deutérium-tritium à l'horizon de la seconde moitié des années 2030. Le défi est hors norme et était trop difficile à évaluer pour en prendre toute la mesure à son commencement dans les années 1980. La bonne

nouvelle est que nous touchons au but, ce que confirme la feuille de route en cours d'actualisation et qui sera soumise à l'approbation du Conseil *Iter* en 2024.

Après *Iter*, son successeur, le réacteur *Demo* (*Demonstration power plant*, en anglais), pourrait démarrer dès 2050. L'objectif de ce projet est de démontrer qu'il est possible de produire de l'électricité avec un rendement commercial intéressant.

Comment passer d'un rendement plasma à un rendement commercial intéressant ?

Si on s'en tient au rendement plasma, on sait qu'il dépend de la taille de la machine et évolue de façon exponentielle. En augmentant le rayon de la chambre de 1 mètre, le rendement plasma atteint 30 ou 40. Pour passer au rendement commercial, il reste un travail important d'optimisation des sous-systèmes à faire. Un des pôles les plus gourmands est celui de la cryogénie qui refroidit les bobines à -269 °C. Une piste intéressante est celle des matériaux supraconducteurs dits «à haute température». Ils ont aussi besoin d'être refroidis, mais moins, d'où un gain d'énergie. Avec de telles innovations, des rendements commerciaux intéressants deviennent envisageables.

Dans le futur, quelle sera la place de la fusion nucléaire dans la production d'énergie ?

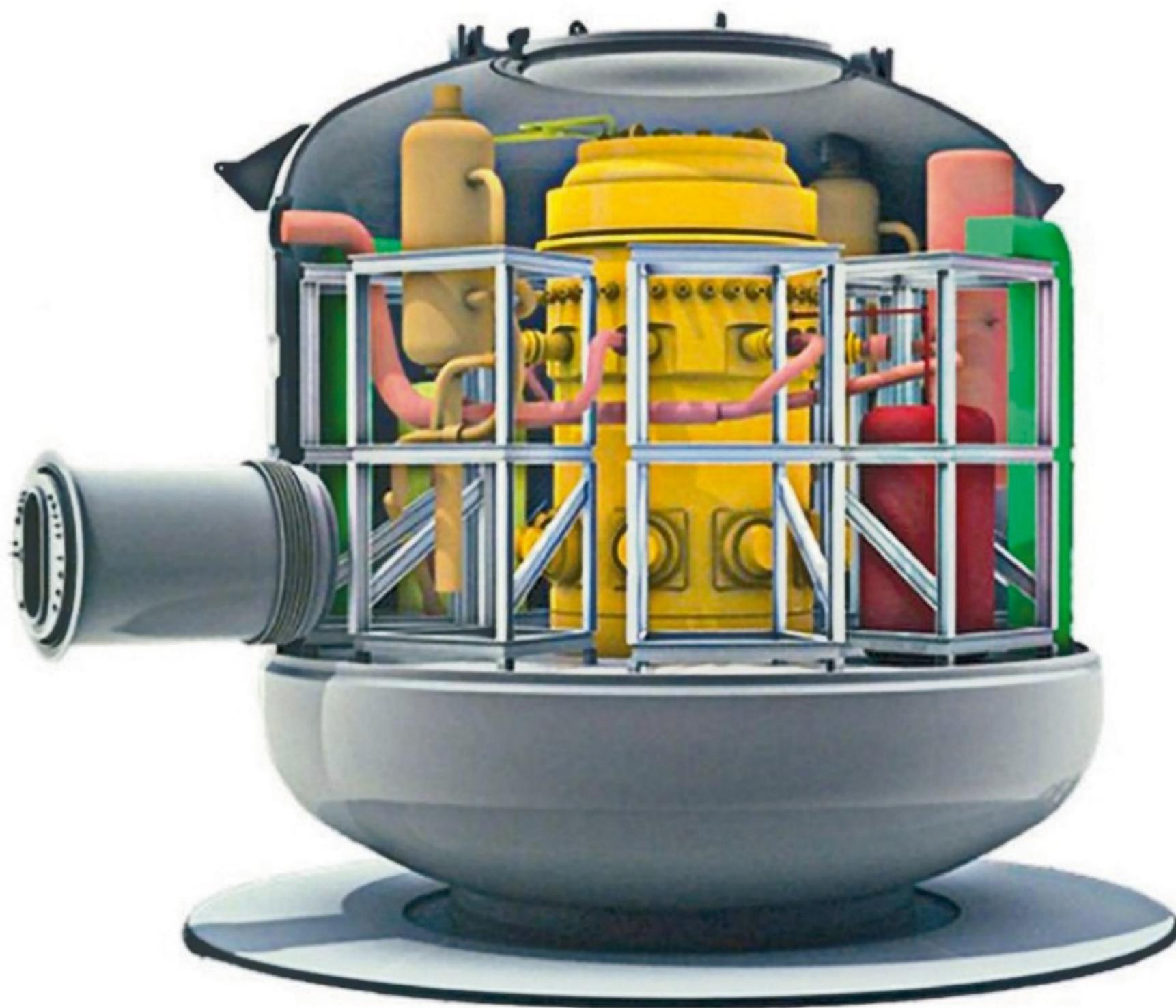
La priorité, c'est d'arrêter d'utiliser les ressources fossiles. Aujourd'hui, nous avons différentes solutions : des énergies renouvelables et la fission nucléaire. Notre travail consiste à développer une technologie supplémentaire pour offrir une option de plus dans le mix énergétique.

Propos recueillis par Sean Bailly

Sondes spatiales, sous-marins, porte-avions... et demain « petits réacteurs modulaires », l'exploitation de l'énergie nucléaire ne nécessite pas forcément des installations industrielles de grande taille.

Du nucléaire de poche

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik



Le petit réacteur modulaire développé dans le cadre du projet Nuward, qui associe entre autres EDF et le CEA, est annoncé comme le plus compact du monde.

En bref

> Les centrales nucléaires sont souvent assimilées à de gigantesques installations caractérisées par d'immenses cheminées.

> Cependant, de nombreux réacteurs nucléaires de taille réduite équipent déjà sous-marins, porte-avions, rovers martiens...

> À l'avenir, nous verrons peut-être essaimer des SMR, de petites centrales nucléaires modulaires de moyenne puissance.

106

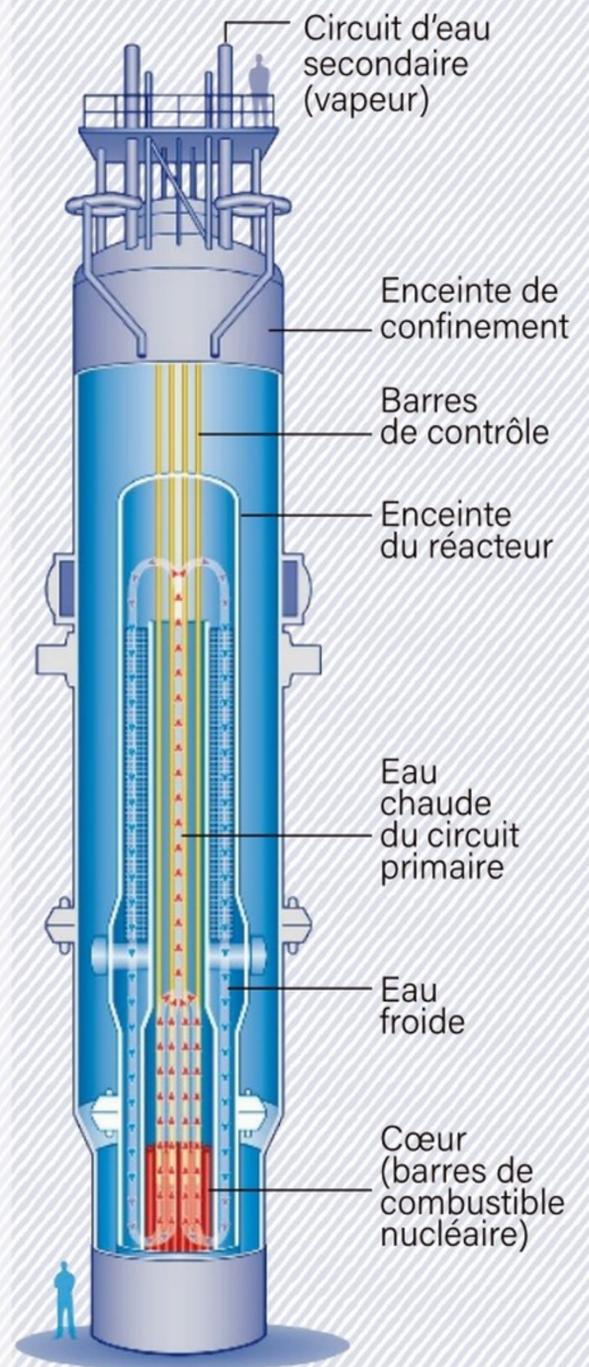
Le 12 octobre 2021, Emmanuel Macron annonçait France 2030, un plan d'investissements prévoyant notamment 1 milliard d'euros pour la filière nucléaire. L'objectif affiché est de favoriser la création de réacteurs nucléaires de petite taille, innovants, avec une meilleure gestion des déchets. Nous sommes loin de l'image classiquement associée à l'énergie nucléaire: un panache de vapeur d'eau au-dessus de gigantesques tours de refroidissement de centrales plantées au cœur de grands sites industriels. Ingénieurs et start-up se sont lancés dans une course à l'étude et au développement de ces petites centrales nucléaires modulaires de moyenne puissance, des SMR (pour l'anglais *small modular reactor*). Cependant, des dispositifs de tailles variées existent déjà et fournissent de l'électricité d'origine nucléaire dans les sondes spatiales, des sous-marins, des porte-avions... et même des brise-glace! Quels mécanismes physiques sont à l'œuvre dans ces systèmes?

DES DÉSINTÉGRATIONS QUI CHAUFFENT

La célèbre relation d'Einstein $E = mc^2$ montre que l'on peut convertir de la masse en énergie, et réciproquement. Cette relation est valable en toutes circonstances. Dans les réactions chimiques, les énergies mises en jeu sont négligeables, mais pas dans les réactions nucléaires, où l'énergie libérée par les désintégrations des noyaux atomiques atteint des dizaines de milliers de gigajoules par mole, soit quelques grammes. Cette énergie se retrouve *in fine* sous forme de

Un réacteur nucléaire compact

Le petit réacteur nucléaire de la société américaine NuScale produira 60 mégawatts d'électricité, à peu près quinze fois moins qu'un réacteur nucléaire classique. La chaleur dégagée par les réactions de fission du matériau nucléaire (barres de combustible, en bas) chauffe l'eau d'un circuit fermé. L'eau chaude, moins dense, monte et cède sa chaleur à un second circuit (*en haut*) qui va produire de la vapeur et faire tourner une turbine (non représentée). Refroidie, l'eau redescend. Des barres de contrôle, qui absorbent les neutrons, sont insérées plus ou moins profondément parmi le combustible pour réguler les réactions de fission.



chaleur, qu'un dispositif adéquat transforme en énergie utile.

Parmi les dispositifs les plus simples, on trouve les générateurs thermiques à radio-isotopes (notés GTR) où des thermopiles assurent la conversion en électricité. C'est ce type de générateur qui alimente en énergie les sondes spatiales comme *Cassini* ou *New Horizons* voyageant aux confins du Système solaire, trop loin du Soleil pour que des panneaux photovoltaïques soient efficaces.

Les GTR équipent aussi les rovers martiens, notamment *Curiosity* ou *Perseverance*: ils se présentent sous la forme d'un cylindre de 64 centimètres de diamètre sur 66 de hauteur, pour une masse de 45 kilogrammes dont 4,8 kilogrammes d'oxyde de plutonium 238. La désintégration naturelle de cet isotope produit en début de mission une puissance thermique de 2 kilowatts, qui décroît lentement, sur des dizaines d'années; de quoi effectuer des explorations prolongées.

L'avantage de ce type de générateur est l'absence totale de pièces mobiles: résilience aux conditions extrêmes, aucun risque d'usure, des pannes réduites et pas de vibrations susceptibles de perturber les instruments de mesure. Leur utilisation reste toutefois réservée à des situations exceptionnelles, où une éventuelle dispersion de matière radioactive serait sans risque.

FISSION... MAIS PAS TROP

Pour des applications terrestres, on ne peut se contenter de la radioactivité naturelle et de la désintégration spontanée d'atomes radioactifs. C'est pourquoi on construit des réacteurs, qui permettent d'augmenter et de contrôler le rythme des désintégrations en maîtrisant des réactions en chaîne. Ainsi, les réacteurs à eau, les plus courants, utilisent de l'uranium 235, dont le noyau atomique devient instable s'il absorbe un neutron. Il se scinde alors en deux noyaux plus petits et émet lors de cette fission 2,4 neutrons en moyenne. Si tous les neutrons émis provoquaient eux aussi une réaction de fission, une réaction en chaîne entraînerait une augmentation exponentielle du nombre de réactions. Cet emballement est bien sûr à éviter; aussi les réacteurs nucléaires sont-ils conçus pour que chaque fission en produise, en fin de compte, une autre exactement (un peu plus au moment du démarrage).

À cette fin, on peut jouer sur divers paramètres. Tout d'abord, la concentration en uranium 235: plus elle est importante, plus il est facile de provoquer une réaction en chaîne, car on augmente la probabilité de capture des neutrons. On peut aussi jouer sur la taille du réacteur. Plus il est petit, plus les neutrons quitteront la zone active avant d'avoir déclenché une nouvelle fission. C'est l'un des rares aspects défavorables à la miniaturisation!

Enfin, on peut aussi ralentir les neutrons rapides émis par les fissions, ce qui augmente leur probabilité d'être réabsorbés. D'où l'utilisation d'un modérateur, c'est-à-dire d'un élément qui ralentit les neutrons sans les absorber. C'est le cas de l'hydrogène de l'eau.

Afin de contrôler activement le taux de réactions dans un réacteur, on utilise en sus des barres absorbantes (de neutrons) que l'on plonge plus ou moins profondément dans le cœur du réacteur, là où le matériau fissile est placé. Ces «barres de contrôle» sont en général verticales, de façon qu'elles tombent naturellement sous l'effet de leur poids en cas d'urgence: elles interrompent alors totalement la réaction en chaîne. En les soulevant, on augmente le nombre de fissions, donc la température au sein du réacteur. La chaleur est alors évacuée grâce à un fluide caloporteur.

On remarquera que, dans tout ce qui précède, la taille du réacteur n'est pas déterminante dans le fonctionnement. Cependant, comme on a développé les centrales nucléaires afin de produire massivement de l'énergie, leurs réacteurs ont les tailles requises pour des puissances de

l'ordre du gigawatt. Ce gigantisme n'est pas nécessaire si la puissance visée est plus modeste. Ainsi, les réacteurs nucléaires K15 utilisés dans les sous-marins de classe *Le Triomphant* ou le porte-avions *Charles de Gaulle* n'occupent que quelques dizaines de mètres cubes, pour une puissance thermique de 150 mégawatts.

PUISSANCE RÉDUITE, TAILLE RÉDUITE

Ce type de réalisations a suscité le développement de projets de petits réacteurs d'une puissance thermique avoisinant la centaine de mégawatts. L'une des principales motivations est que ces réacteurs sont transportables et modulaires. Ce sont ceux évoqués par le président.

Celui que conçoit la compagnie américaine NuScale aura ainsi une charge en combustible nucléaire vingt fois plus faible qu'un réacteur nucléaire classique, pour une puissance thermique de 200 mégawatts (soit environ 60 mégawatts électriques) avec deux ans d'autonomie. Il tient dans un cylindre de 23 mètres de hauteur et de 2,8 mètres de diamètre qui englobe le cœur, le circuit caloporteur et le générateur de vapeur (*voir la figure page 106*).

La compacité du réacteur réduit considérablement les longueurs de tuyauterie nécessaires et permet d'avoir des dispositifs de sécurité entièrement passifs. Par exemple, la circulation de l'eau du circuit primaire ne nécessite aucune pompe et s'effectue naturellement grâce à la différence de densité entre l'eau chaude et l'eau froide: la première s'élève dans la tuyauterie, refroidit, et finalement

redescend. Pas besoin donc d'un générateur diesel de secours en cas d'incident pour faire fonctionner les pompes. D'un poids de 700 tonnes, le réacteur de NuScale est transportable, en trois segments, par camion ou barge. Cette approche est propice à l'industrialisation de toutes les étapes de fabrication, chargement ou déchargement et démantèlement. Les plus sensibles sont ainsi réalisées dans une usine qui leur est destinée et non plus là où l'électricité est produite.

Dans le sillage de NuScale, les projets se multiplient dans de nombreux pays. En France, les premiers lauréats de l'appel à projets pour des «réacteurs nucléaires innovants» ont été annoncés le 9 juin 2023. Parmi eux, citons Naarea, qui développe un microréacteur à sels fondus et à neutrons rapides utilisant un combustible déjà irradié, et Newcleo avec son réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb. Le projet Nuward, sur la base d'un réacteur à eau pressurisée, porté par un consortium réunissant EDF, le CEA, TechnicAtome et Naval Group, sera également financé par l'État.

L'engouement pour ces réacteurs d'un nouveau type est à la hauteur des enjeux, en particulier climatiques et écologiques. Cette approche règle aussi un certain nombre de problèmes inhérents à la fabrication, au fonctionnement et au démantèlement des centrales nucléaires classiques. C'est toutefois au prix d'autres inconvénients, notamment les risques de dissémination si les sites d'implantation de ces réacteurs se multiplient trop.

— Les auteurs —

- > **Jean-Michel Courty**
est professeur de physique à Sorbonne Université.
- > **Édouard Kierlik**
est professeur de physique à Sorbonne Université.

— À lire —

- > **J. Donovan et P. Calle Vives**, Accelerating SMR Deployment: New IAEA initiative on regulatory and industrial harmonization, *Agence internationale de l'énergie atomique*, 2022.
- > Multi-mission radioisotope thermoelectric generator (MMRTG), *document de la Nasa*, 2020.
- > **J. Doyle et al.**, Highly reliable nuclear power for mission-critical applications, *Proceedings of ICAPP 2016*, San Francisco, 2016.

RENDEZ-VOUS

P. 110

EN IMAGE

UNE IMAGE QUI A RÉCEMMENT
FAIT L'ACTUALITÉ



P. 112

REBONDISSEMENTS

DES ACTUALITÉS SUR LES THÈMES
DES HORS-SÉRIES PRÉCÉDENTS



P. 116

INFOGRAPHIE

UN BON SCHÉMA VAUT
MIEUX QU'UN LONG DISCOURS



109

P. 118

LES INCONTOURNABLES

DES LIVRES, DES EXPOSITIONS,
DES PODCASTS... À NE PAS MANQUER



La nébuleuse d'Orion, pouponnière à double titre

C'est l'histoire d'un fantôme prédit dans les années 1970, mais qui a résisté à toutes les tentatives pour le repérer. Il aura fallu, pour le débusquer, l'œil affûté du télescope spatial *James-Webb*, dont le *Hors-Série* n° 118, « Les nouveaux horizons de l'exploration spatiale », vantait les prouesses, et les compétences de nombreux chercheurs, emmenés par Olivier Berné, de l'université de Toulouse. Le fantôme en question est un composé carboné, le cation méthylium (CH_3^+). Dans un premier temps, les instruments du *JWST* repèrent un étrange signal venu de d203-506, un disque protoplanétaire entourant une jeune étoile, à environ 1350 années-lumière, et situé dans la nébuleuse d'Orion, une pouponnière

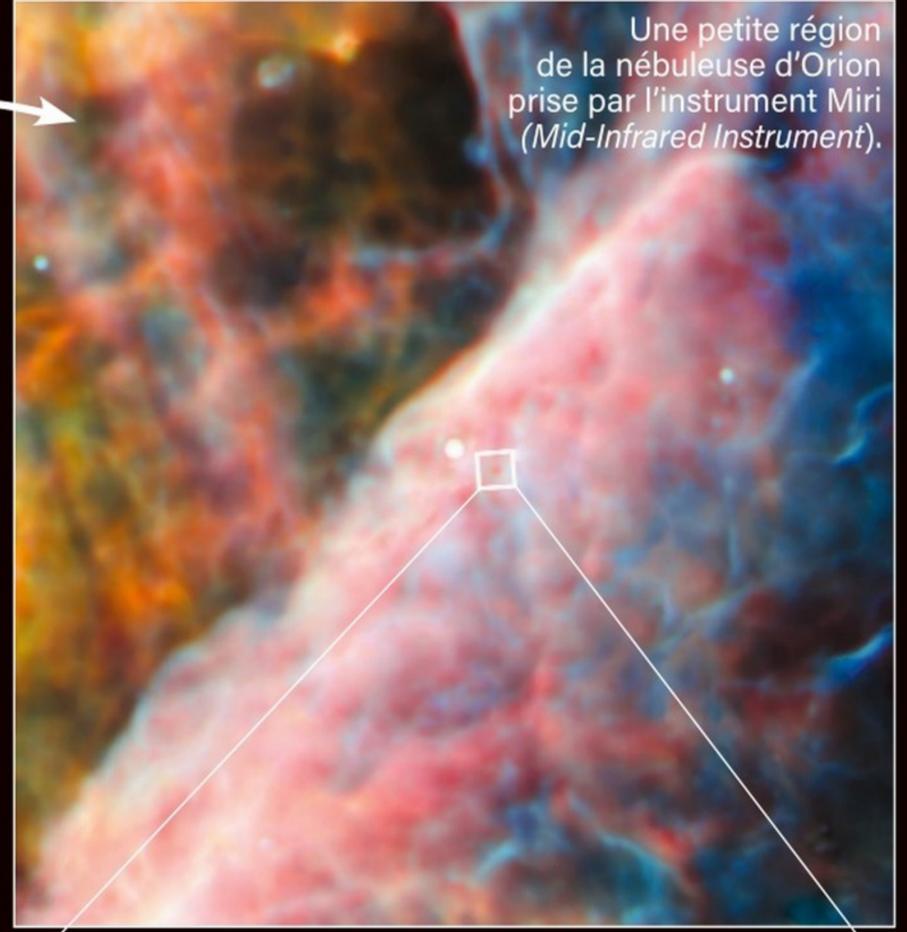
d'étoiles. Sa nature n'a pu être élucidée qu'au terme d'un long travail d'analyse, tant le méthylium est une molécule furtive. Pourquoi est-ce important ? Parce que le méthylium, dont la synthèse est ici favorisée par la présence d'abondants rayons ultraviolets, est néanmoins soupçonné d'être à la base de toute la chimie complexe du carbone dont l'aboutissement est l'apparition de la vie, comme le *Hors-Série* n° 120 : « Il était une fois la vie » le décrivait.

Loïc Mangin

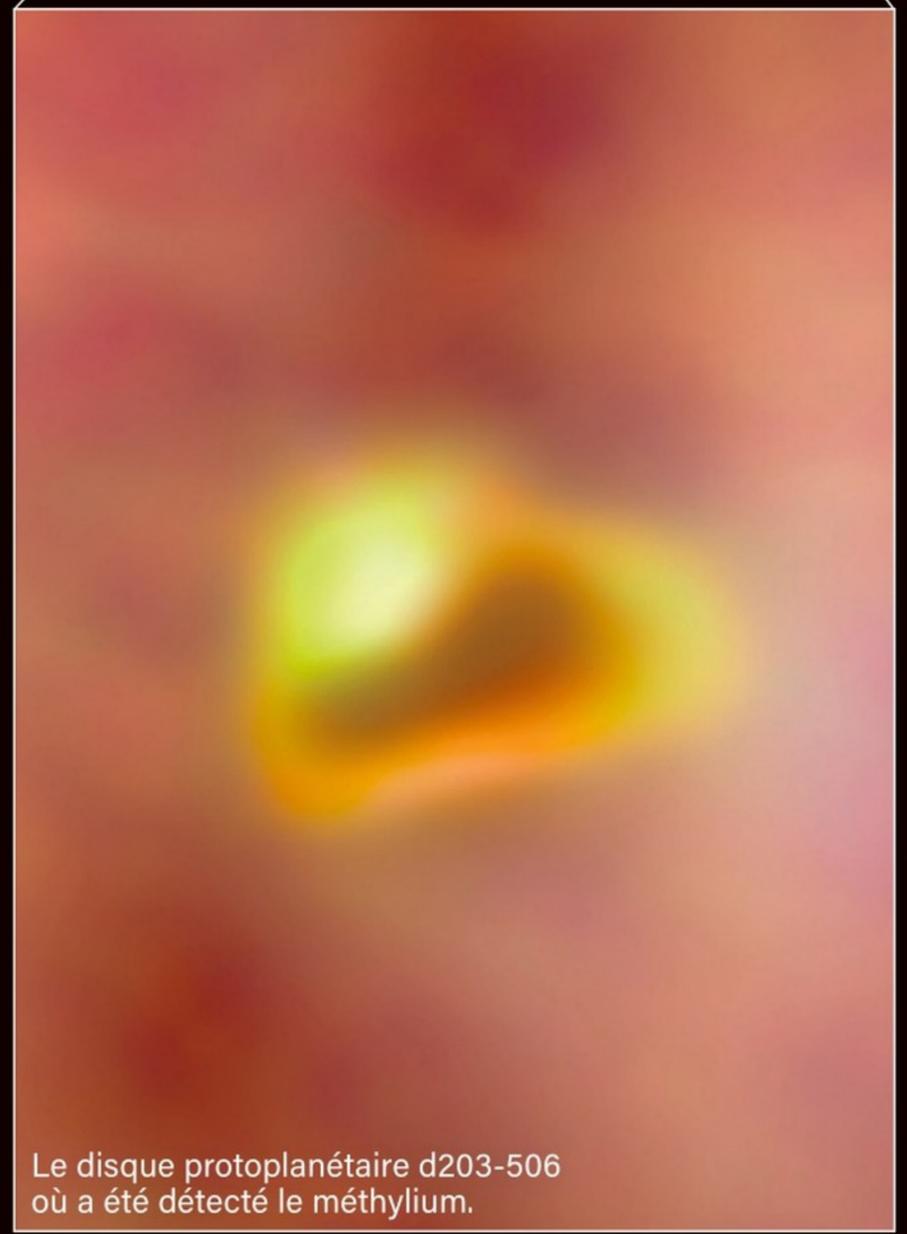
O. Berné *et al.*, Formation of the methyl cation by photochemistry in a protoplanetary disk, *Nature*, 2023.



Cette image prise par l'instrument NIRC*am* (*Near-Infrared Camera*) du *JWST* montre une région de la nébuleuse d'Orion. Là, des rayonnements ultraviolets émis par l'amas du Trapèze (*en haut à gauche*) interagissent avec de denses nuages moléculaires.



Une petite région de la nébuleuse d'Orion prise par l'instrument *Miri* (*Mid-Infrared Instrument*).

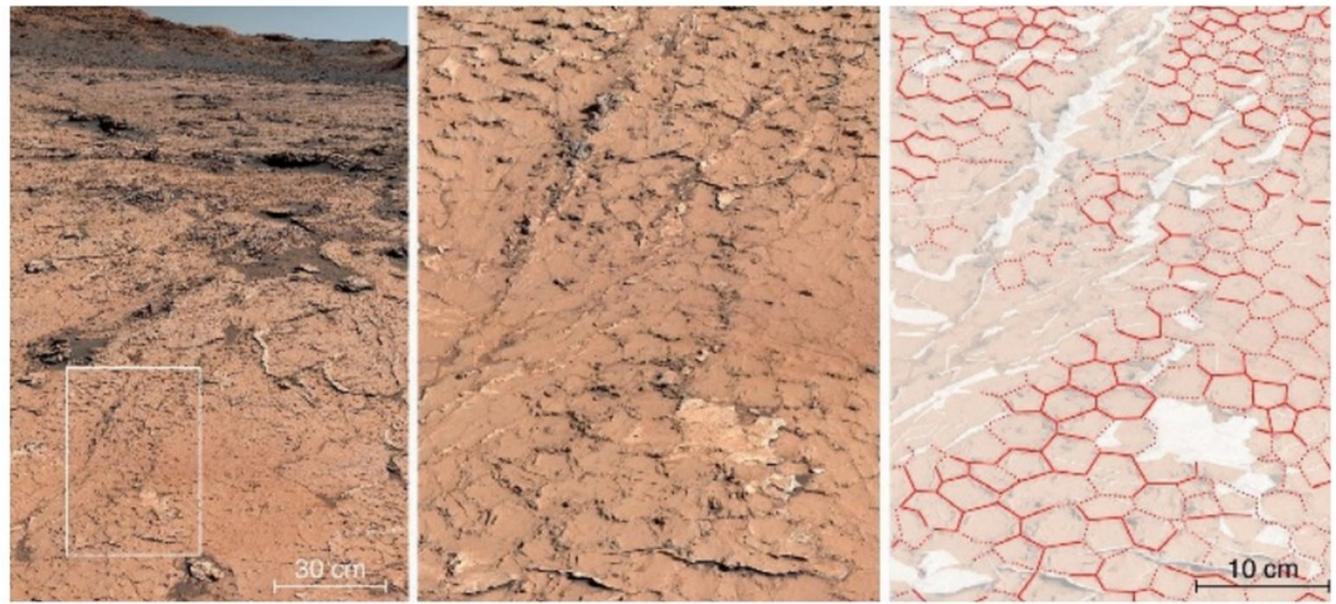


Le disque protoplanétaire d203-506 où a été détecté le méthylum.

Mars, ou les saisons de la vie

Il y a eu des saisons sur la Planète rouge! La combinaison de périodes sèches et humides aurait même pu favoriser l'émergence du vivant.

Le rover *Perseverance*, dont nous vous avons narré les débuts martiens dans le *Hors-Série* n° 118: «Les nouveaux horizons de l'exploration spatiale», avait tendance à capter la lumière médiatique. Publiée dans la revue *Nature*, une étude franco-américaine ramène l'attention sur son homologue *Curiosity*. Depuis onze ans, ce laboratoire ambulatoire explore vaillamment le cratère Gale. En 2021, il avait permis d'observer, dans les empilements sédimentaires du mont Sharp, que Mars avait traversé une succession de périodes sèches et humides, mais sur de longues durées. Cette fois, une alternance à l'échelle de saisons, voire moins, vient d'être déduite des nombreux hexagones qui tapissent une partie du sol du cratère (voir photo ci-dessus). On trouve de tels motifs sur Terre quand la boue, humide, finit par se craqueler sous l'effet du soleil. Sur Mars, les hexagones sont imprimés, et même cimentés par le temps, sur une dizaine de centimètres de profondeur, preuve que l'alternance s'est répétée sur une longue durée, et possiblement à une fréquence élevée. Pour les astrobiologistes, c'est une bonne nouvelle. En effet, un sol dans lequel la teneur en eau est amenée à se réduire à répétition favorise la concentration des



Photographiés par l'outil Mastcam du rover *Curiosity*, ces motifs en hexagones dans le sol du cratère Gale ont intrigué les chercheurs. Ils auraient été formés par la rétraction des terres détrempées au moment des saisons sèches.

éléments solubles et dope les réactions chimiques. Dans ces conditions, des nucléotides, par exemple, se formeraient plus facilement à partir de ribose et de phosphate présents. Plus important encore: les réactions de polymérisation, nécessaires pour passer des nucléotides aux très grosses molécules que sont l'ARN ou l'ADN, ou bien encore des acides aminés aux protéines, nécessitent des phases de déshydratation. Il est donc possible que la période à laquelle les hexagones se sont formés, transition entre le Noachien et l'Hespérien (– 3,8 à – 3,6 milliards d'années), ait été plus favorable à l'apparition de la vie sur Mars que des temps plus

anciens, marqués par la présence permanente de l'eau liquide. Un processus du même ordre a-t-il eu lieu sur Terre? Les chercheurs en font l'hypothèse, mais la tectonique des plaques sur notre planète a fait disparaître les sols aussi vieux. Mars, qui en est dépourvu, devient donc un terrain de choix pour espérer tester, expérimentalement, les hypothèses sur l'apparition de la vie.

Olivier Voizeux

W. Rapin *et al.*, Sustained wet-dry cycling on early Mars, *Nature*, 2023.

HORS-SÉRIE N° 117 : LES PÔLES

Privés de banquise... et de descendance

L'analyse de photos satellites révèle l'échec, catastrophique quoique encore localisé, de plusieurs colonies de manchots empereurs à se reproduire.

Nous n'avions pas caché dans le *Hors-Série* n° 117 : « Notre avenir se joue aux pôles » que l'avenir des espèces dépendantes de la glace de mer était très préoccupant. Une étude le confirme pour l'une des espèces les plus emblématiques de l'Antarctique : le manchot empereur. Ces oiseaux arrivent sur leurs sites de reproduction à la fin du mois de mars ou en avril, et pondent de mai à juin. Les œufs éclosent au bout de 65 jours et les poussins sont autonomes en décembre ou janvier. En conséquence, la banquise côtière sur laquelle ils se reproduisent doit rester stable entre avril et janvier pour assurer le succès de la reproduction. Une équipe a passé au peigne fin les photos de la mer de Bellingshausen prises par le satellite *Sentinel-2* entre 2018 et 2022. Cette région, située à l'ouest de la péninsule Antarctique, est connue pour ses cinq colonies de manchots empereurs, dont les effectifs moyens varient entre 630 et 3 500 couples. Or quatre colonies sur les cinq, qui étaient parfaitement identifiables sur les photos fin octobre ou début novembre 2022, ne présentaient plus aucun signe de présence

début décembre – l'un de ces signes étant les abondantes traces brunes de guano sur la glace. L'explication ne fait aucun doute : la dégradation de l'état de la banquise à ce moment-là, qui a privé les jeunes d'un support stable nécessaire à leur survie – le plumage des manchots juvéniles n'est pas étanche et tout contact avec l'eau froide est fatal. S'il se prolongeait durablement, cet « échec catastrophique en matière de reproduction », conjugué aux autres effets du réchauffement global, pourrait conduire à la disparition de 90 % des colonies de manchots empereurs d'ici à 2100.

O. V.



P. T. Fretwell *et al.*, Record low 2022 Antarctic sea ice led to catastrophic breeding failure of emperor penguins, *Communications Earth & Environment*, 2023.

HORS-SÉRIE N° 118 :
EXPLORATION SPATIALE

L'Inde dans le top 4 lunaire

La troisième aura été la bonne. Après les revers des Japonais en avril et des Russes en août, l'engin spatial *Chandrayaan-3* a aluni sans encombre le 23 août dernier. Après les États-Unis, l'Union soviétique et la Chine, l'Inde est donc le quatrième pays à réussir cette prouesse, et le premier à atteindre une latitude élevée, à quelque 600 kilomètres du pôle Sud, dans une région censée contenir de la glace d'eau – une ressource potentielle pour servir notamment de base chimique à des carburants pour fusées. Comme nous l'avions indiqué dans notre *Hors-Série* n° 118 : « Les nouveaux horizons de l'exploration spatiale », la Lune connaît un regain d'intérêt, et des dizaines de missions sont en préparation. L'Inde fait ainsi oublier l'échec de sa précédente tentative en 2019 et rappelle qu'il va falloir compter avec l'ISRO, son agence spatiale. Pour mémoire, l'orbiteur *Chandrayaan-1*, lancé en 2008, a contribué à confirmer l'existence d'eau sur la Lune, tandis que l'orbiteur de *Chandrayaan-2* cartographie la surface lunaire. O. V.

113

HORS-SÉRIE N° 117 : LES PÔLES

L'Antarctique fond plus vite que prévu

Selon les modèles, l'Antarctique était moins sujette à l'amplification polaire du réchauffement climatique que l'Arctique. L'analyse de 78 carottes de glace montre qu'il n'en est rien.

L'année 2023 a été celle de tous les extrêmes, les compteurs se sont affolés, les records de températures se sont succédé, et même ceux qui en sont familiers, en l'occurrence les climatologues, ont été souvent déconcertés par ce qu'ils observaient et mesuraient. Ce fut le cas de Mathieu Casado, du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, à Gif-sur-Yvette, et de ses collègues. Nous

savons que les régions polaires sont les plus affectées par le réchauffement climatique (on parle d'amplification polaire), et le *Hors-Série* n° 117 : « Notre avenir se joue aux pôles » en faisait état, mais on supposait l'Antarctique relativement épargnée comparée à l'Arctique. Cette idée est battue en brèche par l'étude des climatologues. Comment s'y sont-ils pris ? Pour leur étude,

ils ont compilé les analyses de 78 carottes de glace prélevées dans sept régions du continent pour reconstituer dans le détail les variations de températures de ce dernier millénaire. Résultat ? Le réchauffement actuel en Antarctique est deux fois plus élevé que dans le reste du monde, et entre 20 et 50 % plus important que les prédictions des modèles. Comment l'expliquer ? L'une des raisons proposées est que les carottes apportent des informations plus précises et fiables que ne pouvaient fournir les seules stations météo. Le plus souvent installées près des côtes, ces dernières, vraisemblablement perturbées par l'oscillation antarctique (un ensemble de vents ceinturant le continent), n'ont pas été à même de repérer l'amplification polaire antarctique, que l'on supposait bien plus faible que celle de l'Arctique. Ce ne serait pas le cas, et cela met à mal l'ensemble des modèles climatiques qu'il va donc falloir corriger.

L. M.



En Antarctique comme en Arctique, les effets du réchauffement climatique se font bel et bien plus sentir qu'ailleurs.

M. Casado *et al.*, The quandary of detecting the signature of climate change in Antarctica, *Nature Climate Change*, 2023.

HORS-SÉRIE N° 119 : LES OISEAUX

Hormones et territoires

Le chant des oiseaux n'en finit pas de livrer ses secrets comme le montrait le *Hors-Série* n° 119: «Les superpouvoirs des oiseaux». Ainsi, Wolfgang Goymann, de l'institut Max-Planck d'ornithologie, à Seewiesen, en Allemagne, et ses collègues ont précisé le rôle du chant dans le marquage de territoire chez le rossignol progré (*Luscinia luscinia*), un oiseau migrateur qui passe l'hiver en Afrique de l'Est et revient au printemps en Europe pour se reproduire. Qu'en est-il de sa territorialité, sachant que les espèces résidant toute l'année sous les tropiques sont en permanence territoriales alors que celles qui ne quittent pas les régions tempérées ne le sont qu'au moment des amours? En Tanzanie, avant la migration, les ornithologistes ont constaté que chez le rossignol progré seule une fraction des mâles est territoriale et que pourtant ils tolèrent la proximité de congénères. Pour quelles raisons? Parce que ces derniers n'ont pas encore développé des capacités complètes de chant, indispensables à l'instauration d'une zone bien à soi. Cette cohabitation inhabituelle trahirait un taux de testostérone encore faible. Ce n'est qu'une fois à son niveau maximal que l'hormone déclencherait la territorialité, ce qui sera le cas lorsque les oiseaux arriveront dans leurs quartiers d'été: alors chacun établira son territoire. Les aires d'hivernage sont bien plus un théâtre de comportements complexes qu'on ne le pensait.

L. M.

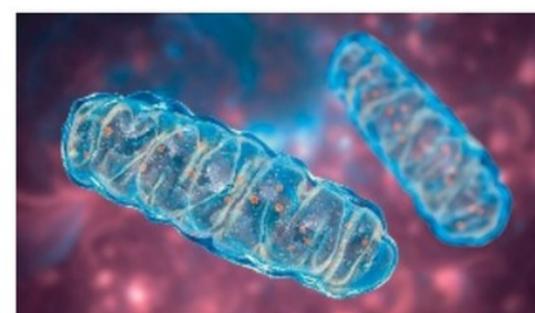
H. Brumm *et al.*, Territorial behaviour of thrush nightingales outside the breeding season, *Proc. R. Soc. B*, 2023.

HORS-SÉRIE N° 120 : IL ÉTAIT UNE FOIS LA VIE

De bas en haut et vice versa

L'étude de l'apparition de la vie se fait selon deux principales voies que des chercheurs, sur la base de leurs travaux, proposent de réunir en une seule.

Comment étudier l'origine de la vie? C'était la grande question posée dans le *Hors-Série* n° 120: «Il était une fois la vie». On distingue deux grandes approches: la «bottom-up» et la «top-down». Selon la première, du «bas vers le haut», il s'agit par exemple de reconstituer les conditions de la Terre il y a 3,5 milliards d'années et d'espérer reproduire les premiers éléments clés de la vie, comme des acides aminés, sans certitude quant à ce qui s'est réellement passé. La seconde, du «haut vers le bas», propose de partir des organismes actuels et de remonter le temps, par exemple par des méthodes de phylogénie, pour aboutir à un portrait-robot possible des premières formes de vie. Aaron Goldman, de l'Oberlin College, aux États-Unis, et ses collègues ont tenté de réconcilier les deux. Pour ce faire, ils mettent au centre du jeu les chaînes de transport d'électrons, communes à tous les organismes vivants. De quoi s'agit-il? D'un ensemble de molécules, d'enzymes notamment, qui, grâce à une série de réactions d'oxydoréduction, assurent la production de «réservoirs chimiques d'énergie», essentiellement l'ATP, mis à la disposition du métabolisme. Une



Les mitochondries assurent leur rôle de producteur d'énergie pour les cellules grâce à des chaînes de transport d'électrons.

telle chaîne est au cœur des mitochondries, les «centrales énergétiques» des cellules. Selon les auteurs, sur la base d'arguments «top-down», ces voies métaboliques étaient présentes dans les toutes premières formes de vie. Mais d'ajouter que leurs travaux précédents ont démontré qu'avant même l'apparition de la vie telle que nous la connaissons, la chimie inhérente à ces chaînes de transport a pu avoir lieu à la surface de minéraux sous-marins: c'est le versant «bottom-up». De ces informations, les chercheurs plaident pour que les chaînes de transport d'électrons prennent une place de choix dans l'étude de l'apparition de la vie.

L. M.

A. Goldman *et al.*, Electron transport chains as a window into the earliest stages of evolution, *PNAS*, 2023.

Chacun cherche son chien

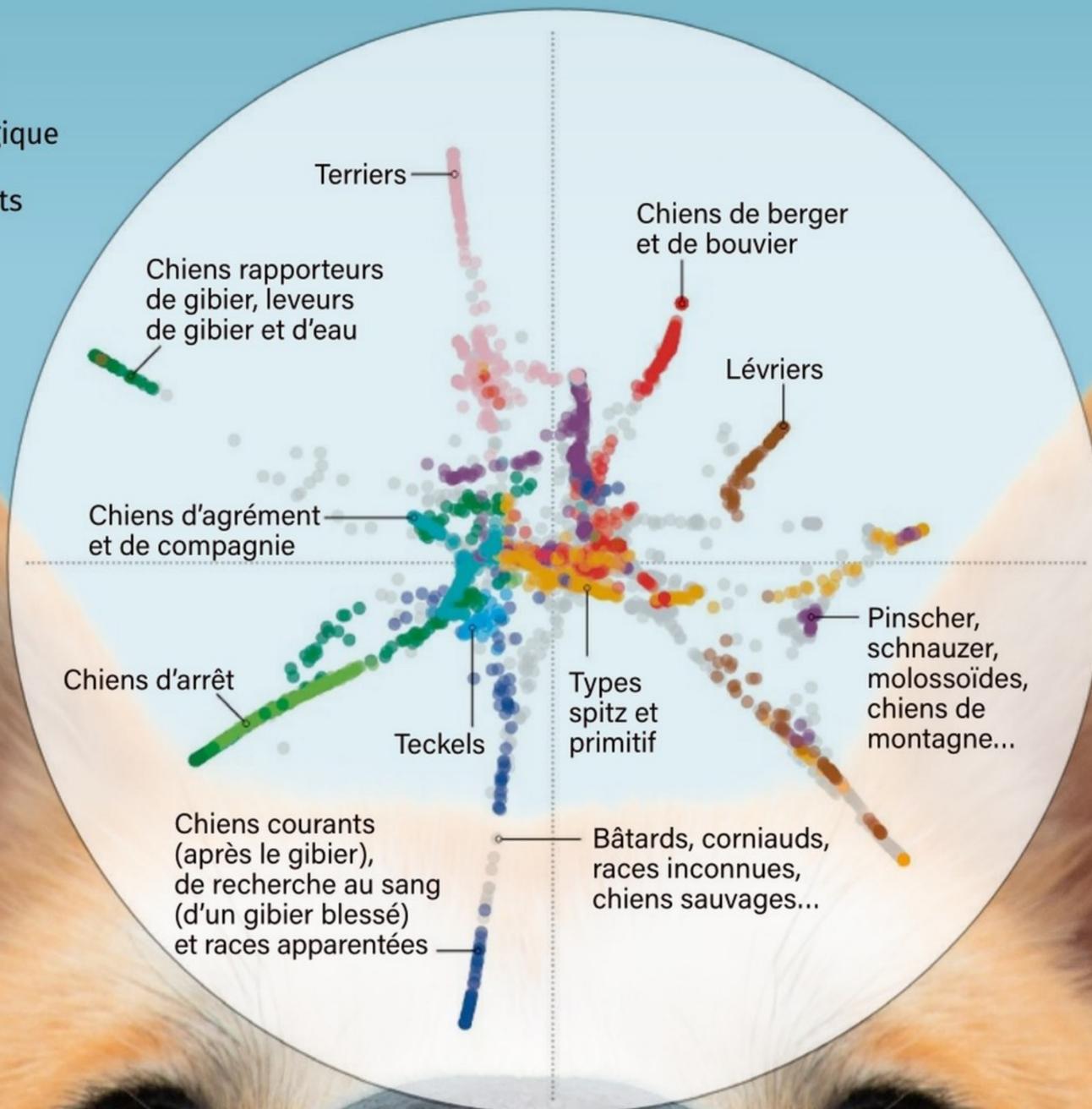
L'analyse des génomes canins contredit les catégories officielles.

Texte: Clara Moskowitz – Illustrations: Emily Dutrow & MSJONESNYC

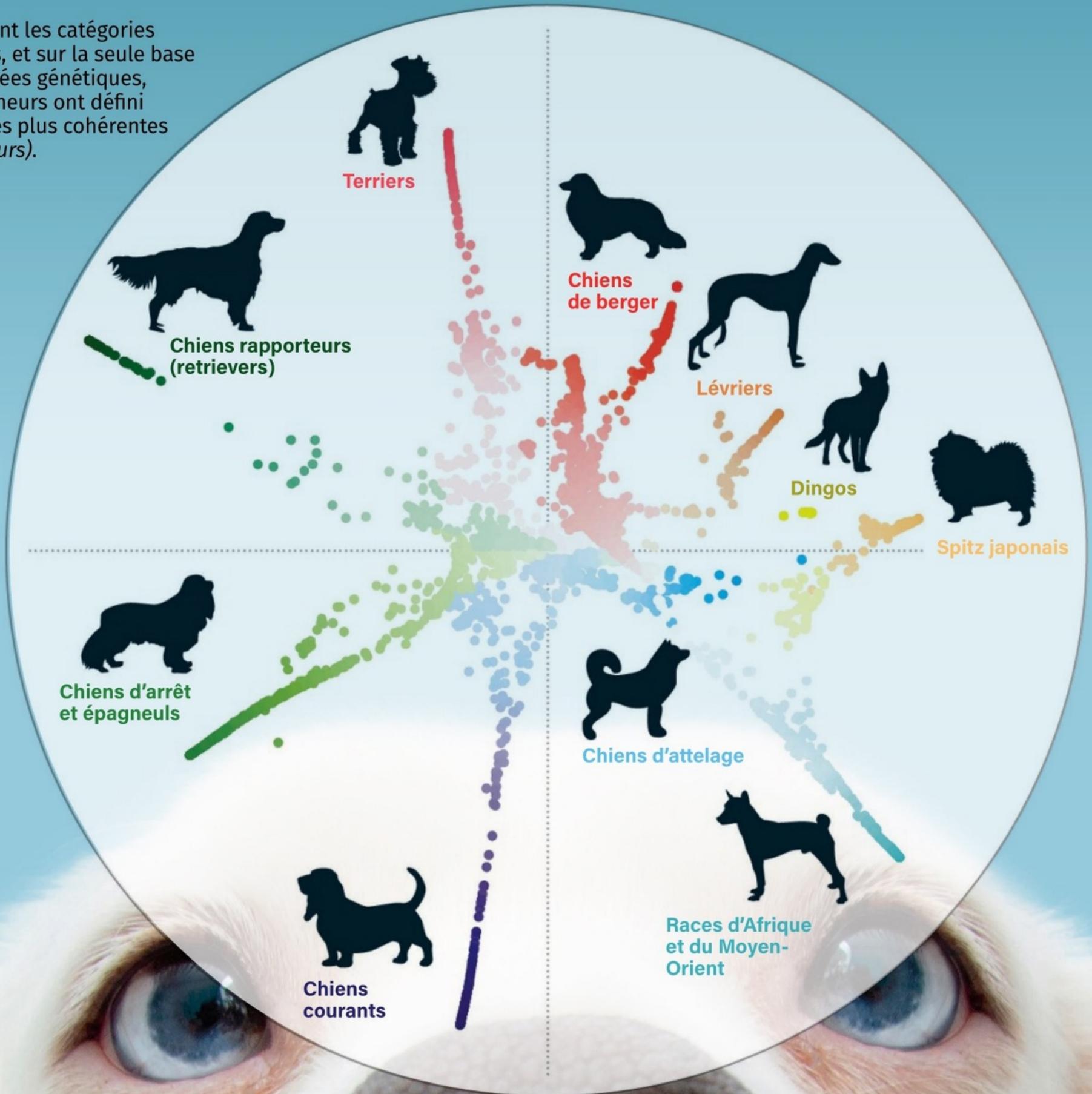
La Fédération cynologique internationale reconnaît 356 races de chiens, une classification fondée notamment sur des caractéristiques comportementales (souvent en lien avec la chasse et le gibier). Pour étudier son soubassement génétique, Emily Dutrow, des Instituts américains de la santé (NIH), à Bethesda, aux États-Unis, et ses collègues ont analysé les séquences d'ADN de plus de 4 000 chiens domestiques et sauvages et ont confronté leurs données à des enquêtes comportementales menées auprès de propriétaires d'environ 46 000 chiens de race. Surprise! Les liens identifiés démentent les catégories reconnues. Ces graphiques illustrent deux façons de classer les races de chiens: l'une basée sur des regroupements définis par l'homme et l'autre sur des « lignées » déduites de données génétiques. Dans les deux cas, chacun des 4 000 points représente un chien individuel.

Les catégories officielles (les différentes couleurs) de la Fédération cynologique internationale sont ici superposées aux résultats génétiques (les points). Les deux classifications ne coïncident pas...

116



En ignorant les catégories officielles, et sur la seule base des données génétiques, les chercheurs ont défini dix lignées plus cohérentes (en couleurs).



À LIRE

En route vers l'inconnu

En nous emmenant sur des chemins encore non foulés vers un nouveau monde à construire, le philosophe Baptiste Morizot nous invite à politiser notre rapport à la vie pour mieux le réenchanter.

118 **L**e *coywolf* est une nouvelle « espèce » née de la rencontre de coyotes et de loups dans le Grand Nord canadien. Ce canidé déconcerte les populations autochtones, comme les Gwich'in, qui y voient des êtres de la métamorphose, des êtres inédits qui chamboulent des relations auparavant stabilisées entre humains et vivants. Plus généralement, les crises écologique et climatique bousculent nos liens, que l'on croyait solides, avec toutes les autres formes du vivant. Nous serions alors revenus à un temps dit « mythique » où l'on rebattrait les cartes pour construire un autre monde fait de relations retissées avec les êtres qui le peuplent. Ainsi commence *L'Inexploré*, le dernier ouvrage du philosophe Baptiste Morizot. L'ambition est grande, et en même temps humble, puisqu'elle procède par petits pas, cheminements, détours conceptuels et retours pratiques. L'ouvrage est une carte, ou plutôt un atelier de cartographie « *in progress* ». Le territoire à arpenter ? « Un nouveau continent inexploré – qui n'est autre que la Terre vivante, mais qui a brusquement changé de nature. » Comment s'y retrouver ? Comment s'orienter ? Déjà en redéfinissant de nombreux concepts, à commencer

par celui de « politique » en le sortant du champ des seules sociétés humaines où la modernité l'a confiné, pour y faire entrer d'autres formes de vie afin de renégocier nos relations au monde. Pour ce faire, il s'agirait de retrouver un état de « middle ground », une idée empruntée à l'historien Richard White selon laquelle aux temps des premiers contacts entre Européens et Amérindiens, les deux populations ont établi un *modus vivendi* fait au départ d'accommodations. De fait, nous sommes bien aujourd'hui dans une situation de vulnérabilité partagée avec le reste du vivant. Et dans cet entre-deux, tout redeviendrait possible, notamment une façon d'envisager le monde qui s'écarterait du « face-à-face entre l'animisme et le naturalisme ». Sur les pistes explorées par le philosophe, on croise l'idée d'exaptation, chère à Stephen Jay Gould, ou comment des structures forgées par l'évolution pour une fonction se détournent de celle-ci vers une autre, l'archétype étant la plume des oiseaux, probablement impliquée au départ dans la régulation thermique. On doit comprendre ici que le vivant dispose d'une réserve d'inventivité qui lui offre les moyens de



s'émanciper, de s'échapper du déterminisme dans lequel on l'a souvent enfermé, pour espérer entrer en politique, au sens revisité. Ce ne se sont là que quelques « cairns » croisés sur les très nombreux sentiers, parfois escarpés, empruntés par Baptiste Morizot pour nous inviter à bâtir de nouvelles alliances. S'y retrouver, « c'est diablement compliqué », avoue-t-il. Mais au bout des chemins, il ne s'agit « que » de redoubler d'égards envers ce et ceux qui nous entourent pour rendre le monde vivable. Alors, à vos chaussures !

L. M.

B. Morizot, *L'Inexploré*, Wildproject, 432 pages, 26 euros, 2023.

À VISITER

Invitation au voyage

La nouvelle exposition permanente de la Cité des sciences et de l'industrie emmène le public loin, très loin, aux confins de l'espace et du temps.

Le succès public du programme Artemis de la Nasa (en collaboration avec l'ESA et d'autres agences), qui prévoit le retour d'humains sur la Lune, et de l'alunissage de la mission indienne Chandrayaan-3 en atteste: nous, Terriens, avons toujours la tête dans les étoiles. « Mission spatiale », la nouvelle exposition permanente de la Cité des sciences et de l'industrie (aux côtés de « Urgence climatique », « Bio-inspirée », « Robots »...), répond à cet engouement en proposant à chacun d'entrer dans la peau d'un spationaute et de partir en expédition selon un programme en cinq points.

Le premier, « Explorer », présente des objets allant là où l'humain n'est pas en mesure de se rendre, que ce soit pour des questions de temps ou de sécurité. Et l'on retrouve les sondes Cassini, Huygens et la petite dernière, Juice. Les informations qu'elles ont recueillies ont préparé le terrain pour « Voyager »: à votre tour de vous envoler, grâce à un spectacle immersif, vers Europe, une des lunes de Jupiter, à 628,3 millions de kilomètres. Les deux étapes suivantes, « Transiter » et « Séjourner », nous ramènent un peu plus près, sur la Lune, mais dans le futur, puisqu'il s'agit cette



fois de poser le pied sur notre satellite et de s'installer dans une base lunaire.

Retour enfin sur Terre pour... prendre de la distance et s'interroger avec des experts (astrophysicien, sociologue, géopoliticien...) sur le rapport que notre société entretient avec l'Univers et sur les raisons qui motivent l'envoi d'humains dans l'espace. Quoi qu'on en pense, cette entreprise demeure tout de même l'un des grands défis de l'humanité.

L. M.

« Mission spatiale », Cité des sciences et de l'industrie, à Paris, à partir du 17 octobre 2023. www.cite-sciences.fr



À PARTICIPER

Espions des océans

Les vacances sont loin, et vous repensez, dans un soupir, à l'océan qui a constitué l'horizon de votre été? Ifremer vous offre la possibilité d'y replonger en rejoignant son nouveau programme de sciences participatives « Espions des océans ». L'objectif est d'inviter les citoyens, petits et grands, à contribuer aux recherches sur les écosystèmes marins en analysant des photographies des fonds marins afin d'aider les scientifiques à identifier les espèces qui y apparaissent. Ce fut fait une première fois en 2016 avec « Espions des grands fonds », sur les sources hydrothermales: plus de 1500 utilisateurs ont annoté des dizaines de milliers d'images destinées à entraîner des algorithmes d'intelligence artificielle, faisant gagner un temps fou aux spécialistes. Fort de ce succès, l'institut récidive et élargit l'opération à quatre sites: la « Tour Eiffel », une cheminée hydrothermale au large des Açores; les sources hydrothermales Grotto de la dorsale Juan de Fuca, dans le Pacifique, à 400 kilomètres des côtes canadiennes; les fonds de la rade de Brest; enfin, les récifs de coraux d'eau froide du canyon de Lampaul, au large de la Bretagne, à 780 mètres de profondeur. Paré à plonger?

L. M.

<https://ocean-spy.ifremer.fr>

À VISITER

Dans les pas de Charlie et Darwin

Le Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, présente, grâce à une fiction scientifique virtuelle, un voyage temporel de plusieurs milliards d'années à travers l'histoire de la Terre.

Souvenez-vous, c'était il y a 3,5 milliards d'années, au temps de l'Archéen, sur le littoral de ce qui est aujourd'hui l'Australie. L'eau est verte, car elle regorge de fer qui s'oxyde lentement et le fera pendant des millions d'années. Là, d'étranges concrétions de calcaire sont recouvertes d'un mucus où se nichent des cyanobactéries, des bactéries microscopiques, qui, en absorbant le dioxyde de carbone dissous et en rejetant de l'oxygène dans l'atmosphère, bouleversent les équilibres physicochimiques de notre planète. C'était les premiers temps de la vie sur Terre... et ces édifices sont des stromatolites. Vous ne vous souvenez pas très bien ? Qu'à cela ne tienne, retournez-y ! C'est la proposition de « Mondes disparus », la nouvelle exposition immersive proposée par le Muséum national d'histoire naturelle de Paris, en collaboration avec le créateur d'expériences en réalité virtuelle Excurio. L'idée ? Faire des visiteurs des voyageurs temporels, des explorateurs de la Terre à travers les âges – comme s'ils y étaient –, avec une astuce scénaristique propice à la découverte des formes de vie : la miniaturisation des spectateurs. Les participants sont embarqués dans un périple à rebondissements avec deux guides, une jeune biologiste, Charlie, et son robot,



Darwin. Tout commence il y a 4,5 milliards d'années, au moment où se forme notre planète, puis se succèdent différentes époques, ou épisodes. Après l'Archéen, viennent le Cambrien et l'explosion de la diversité qui y est associée. C'est ensuite le Carbonifère, pendant lequel, sur un continent unique, se développe une végétation extraordinaire que parcourent notamment la libellule *Meganeura* de plus de 70 centimètres d'envergure et le millepattes *Arthropleura* jusqu'à 2,60 mètres de longueur. Suivent les mieux connus Jurassique et Crétacé, époques des ichtyosaures, des plésiosaures, des ptérosaures, des dinosaures... Autant de reptiles qui dominent eaux, airs et terres avant d'être supplantés à l'Éocène par les mammifères qui gagnent en taille et se diversifient. Parmi eux, les primates qui s'imposent au Pléistocène. Cette époque est celles des humains :

Dénisoviens, Néanderthaliens, *Homo sapiens*, *Homo floresiensis*... Et enfin, retour au point de départ. L'expérience a bénéficié de l'expertise de plusieurs commissaires scientifiques, dont Bruno David, Guillaume Lecoindre, Gaël Clément et Sylvain Charbonnier, aidés par une trentaine de chercheurs, et d'une illustratrice spécialisée. Paysages et époques, espèces présentées, couleurs, mouvements, interactions, sons... tout a été discuté, argumenté afin d'être au plus près des dernières découvertes. Au sortir de cette excursion, les spectateurs sont convaincus, la planète Terre est assurément belle et unique. Peut-être mérite-t-elle alors quelques égards.

L. M.

Exposition « Mondes disparus », du 14 octobre 2023 au 16 juin 2024, au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris. <https://bit.ly/45WqcAZ>

À REGARDER

Le film noir des algues vertes

L'enquête au long cours d'Inès Léraud sur le scandale des algues vertes en Bretagne est portée à l'écran.

En juin 2019 sortait la bande dessinée *Algues vertes, l'histoire interdite*, cosignée par l'illustrateur Pierre Van Hove et la journaliste Inès Léraud, inspirée des reportages de cette dernière. L'histoire? Sur le littoral breton, trois hommes et des dizaines d'animaux ont succombé aux gaz toxiques émis par les algues vertes en putréfaction sur les plages. Or la surabondance de ces végétaux marins s'explique par les rejets massifs et riches en nutriments de l'agriculture intensive, pilier de l'industrie agroalimentaire bretonne toute-puissante (la Bretagne est la première région agricole française pour la production de lait, de cochon et de volaille) et soutenue par des syndicats très influents. Enquêter sur le sujet ne fut pas simple, tant sur place le silence est de rigueur, tandis que les pressions de tous les acteurs qui en tirent bénéfice (élus de droite comme de gauche, patrons, grands exploitants...) s'exercent à tous les niveaux.

Le cinéaste Pierre Jolivet a adapté en film cette enquête au long cours, en mettant en scène le parcours d'Inès Léraud, également scénariste, semé d'embûches



(échantillons qui disparaissent « opportunément », corps enterrés avant autopsies...) et parfois d'intimidations. Et l'on pense également à Morgan Large, aussi journaliste et incarnée dans le film, qui, enquêtant sur des sujets similaires, a vu sa voiture sabotée... Il s'agit ici de raconter les coulisses de l'enquête et de faire sortir de l'ombre ceux qui se battent et s'élèvent contre cette injustice: militants, victimes, petits agriculteurs qui ne veulent pas rentrer dans le rang de l'agrobusiness... Un film important, et une nouvelle étape vers, un jour peut-être, un changement de modèle économique en Bretagne.

L. M.

Les Algues vertes, de Pierre Jolivet. Encore projeté dans quelques salles et bientôt en VOD et DVD.



À VOIR

Oiseaux primés

Fondée en 1905, la Société nationale Audubon, une organisation américaine consacrée à la protection des oiseaux et de leur environnement et qui tire son nom de l'ornithologue d'origine française, Jean-Jacques Audubon (1785-1851), organise chaque année, depuis treize ans, un concours de photographies... d'oiseaux.

Parmi plus de 2000 clichés proposés, un jury de spécialistes a eu la délicate mission de sélectionner le lauréat et d'attribuer des mentions honorables dans pas moins de treize catégories: grand prix, professionnel, amateur, originalité (le prix Fisher), vidéo... et même celle de l'oiseau femelle.

Le grand prix a été attribué à Liron Gertsman pour le portrait d'un couple de pigeons bisets (*Columba livia*), un hommage à ces volatiles que l'on ne regarde plus tant ils sont communs, notamment en ville. Quant au prix de l'oiseau femelle, il revient à Sandra Rothenberg, pour une oriole de Baltimore (*Icterus galbula*) nimbée d'un nuage d'herbes sèches et de crins de cheval (*voir ci-dessus*) destinés à la confection d'un nid. Face à l'abondance d'images qui lui ont été soumises, l'ONG a également décidé de publier un «top 100» des meilleures. Auriez-vous fait le même choix que le jury?

L. M.

<https://bit.ly/44KOGfK>

GROUPE POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions:
Cécile Lestienne

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangin
Rédacteur en chef adjoint délégué: Olivier Voizeux

POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef: François Lassagne
Rédactrice en chef adjointe:
Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs: François Savatier et Sean Bailly

Développement numérique:
Philippe Ribeau-Gésippe

Community manager et partenariats:
Aëla Keryhuel
aela.keryhuel@pouurlascience.fr

Conception graphique:
Céline Lapert et Ingrid Leroy

Direction artistique: Céline Lapert
Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel,
Ingrid Leroy et Ingrid Lhande

Révisseuses: Anne-Rozenn Jouble,
Isabelle Bouchery et Maud Bruguière

Responsable marketing: Frédéric-Alexandre Talec

Assistant administratif: Finoana Andriamialisoa

Direction du personnel: Olivia Le Prévost

Fabrication:
Marianne Sigogne et Stéphanie Ho
Directeur de la publication et gérant:
Nicolas Bréon

WWW.POURLASCIENCE.FR

170 bis bd du Montparnasse
75014 Paris
Tél.: 01 55 42 84 00

PUBLICITÉ FRANCE

stephanie.jullien@pouurlascience.fr

ABONNEMENTS

Abonnement en ligne:
<https://boutique.groupepouurlascience.fr>
Courriel: serviceclients@groupepouurlascience.fr
Tél.: 01 86 70 01 76
Du lundi au vendredi de 9 h à 13 h

Adresse postale:

Service Abonnement - Groupe Pour la Science
20 rue Rouget-de-Lisle
92130 Issy-les-Moulineaux

Tarifs d'abonnement 1 an (12 numéros)

France métropolitaine: 59 euros
Europe: 72,20 euros
Reste du monde: 81,80 euros

DIFFUSION

Contact kiosques:
À Juste Titres ; Alicia Abadie
Tél.: 04 88 15 12 47

Information/modification
de service/réassort:
www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in chief: Laura Helmuth
President: Kimberly Lau

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris.

© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



Origine du papier: Finlande • Taux de fibres recyclées: 0 % • « Eutrophisation » ou « Impact sur l'eau »: P_{tot} 0,003 kg/t

 **PEFC** 10-31-1282 / Certifié PEFC / Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées. / pefc-france.org

Envie de
relever le défi
des énergies
de demain?

le cnam



FORMEZ-VOUS au Cnam

MAGE - crédits photo : 123RF - freepik / 2022



www.cnam.fr



École de l'énergie



École des transitions
écologiques

19^e FESTIVAL INTERNATIONAL

PARISCIENCE

LE FESTIVAL QUI RAMÈNE SA SCIENCE

LE MUSÉUM NATIONAL
D'HISTOIRE NATURELLE ACCUEILLE

ENTRÉE GRATUITE

**LES MEILLEURS FILMS
POUR DÉCRYPTER
LA BEAUTÉ ET
LES DÉFIS DU MONDE**

Scolaire / Du 11 au 19 octobre 2023
Grand Public / Du 26 au 30 octobre 2023

Muséum national d'Histoire naturelle
Jardin des Plantes, Paris 5^e

Suivez le festival en ligne / www.pariscience.fr