HISTOIRE ET CIVILISATIONS

LES CAHIERS SCIENCE&VIE

LES CAHIERS
SCIENCE&VIE

Quand la science revisite l'Histoire

N° 224 SEPTEMBRE-OCTOBRE 2025

ARCHÉOPOP

DES VIKINGS À L'ÎLE DE RÉ ?

LA FOLLE HISTOIRE DE L'ATOME

DE LA POUSSIÈRE DES GRECS À LA FISSION DU MONDE

L'ACTU FACE AU PASSÉ



CACHEMIRE
Dangereuse poudrière



N° 224 SEPTEMBRE-OCTOBRE 2025
BEL : 8,70 € - ESP : 8,70 € - GR : 8,80 € - DOM S : 8,80 € ITA : 8,80 € LUX : 8,70 € - PORT CONT : 8,70 €
CAN : 12,95 $CAN MAR : 94 DH TOM S : 1050 CFP TOM A : 1750 CFP - CH : 11,50 FS - TUN : 29 DTU

REWORLD MEDIA

L 15516 - 224 - F: 7,90 € - RD

LES CAHIERS SCIENCE&VIE

CROISIÈRES

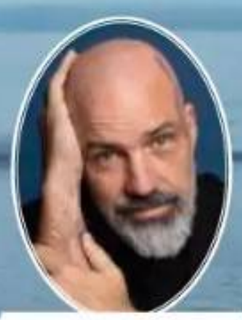
AVANTAGE LECTEURS
50$ DE CRÉDIT OFFERT À BORD !

TRAVERSÉES TRANSATLANTIQUES

LE HAVRE / NEW YORK 2026

DEUX **SÉJOURS EXCLUSIFS** ET DES **PROGRAMMES INÉDITS**
AVEC LES ÉCRIVAINS DE
LA LIGUE DE L'IMAGINAIRE *


Maxime Chattam


Niko Tackian


Eric Giacometti


Bernard Werber


Sarah Kaminsky


Barbara Abel


Mathias Malzieu

1ER AU 8 MAI 2026
LE HAVRE / NEW YORK
8 JOURS / 7NUITS

8 AU 17 JUIN 2026
LE HAVRE / NEW YORK
10 JOURS / 9 NUITS

Encadrement francophone
Vol New York / Paris inclus
Prix à partir de
3 350€** /pers.
au départ de PARIS

En partenariat avec
CUNARD

Photo Cunard

IM 075 100 151

- Téléchargez la documentation
  sur www.voyages-lecteurs.fr/csv
- Informations & réservations
  01 45 75 18 19 en précisant Cahiers Science & Vie
  du lundi au vendredi de 9h30 à 18h30

DÉCOUVREZ LE PROGRAMME EN FLASHANT CE CODE >

ÉDITO

D'ATOMOS À HUBRIS



Dessin par une *hibakusha*, survivante de la bombe d'Hiroshima

Quatre-vingt ans après Hiroshima et Nagasaki, le champignon nucléaire n'a pas cessé d'assombrir l'horizon. Au Cachemire, poudrière himalayenne, trois puissances dotées de l'arme ultime – Inde, Pakistan, Chine – s'engagent depuis avril dans un engrenage périlleux. Notre rubrique *Actu face au passé* retrace cette cicatrice toujours vive, issue de la partition de 1947. Mais le danger dépasse ce théâtre. Depuis trois ans, la Russie brandit la bombe aux portes de l'Europe. Israël, avec le soutien américain, s'efforce de préserver son monopole nucléaire régional. Les frappes récentes en Iran marquent la fin du dialogue et l'entrée dans l'ère de la force brute, amorcée par le retrait de l'accord de Vienne de 2015. Partout, les équilibres vacillent, et le risque – diffus, mouvant, multiple – devient tangible.

Au Japon, les témoignages des *hibakusha* rappellent l'horreur : chairs brûlées, paysages dévastés. Pourtant, ailleurs, les arsenaux se modernisent, et dans un monde tendu entre dissuasion et préemption, l'escalade se pare d'un vernis de rationalité.

Pour suivre le fil de cette démesure, ce numéro remonte aux origines de l'idée atomique. C'est dans la Grèce antique comme dans l'Inde védique que la matière fut conçue pour la première fois comme formée de particules ultimes ; le terme grec *atomos* signifie littéralement « ce qui ne se divise pas ». Pour le poète latin Lucrèce, comprendre les atomes revenait à désarmer la peur devant le destin. Le Moyen Âge, lui, préféra l'ordre aristotélicien, avec sa matière continue, animée par les quatre éléments. Il fallut attendre la chimie moderne pour que l'atome devienne hypothèse scientifique.

Mais au XX^{e} siècle, à peine l'atome devenu réalité, notre vision du monde se fissure. Les physiciens mettent à nu une matière creusée de vide, instable, parcourue de forces antagonistes. L'indivisible vole en éclats. Et quand le noyau cède, il libère une énergie capable d'éclairer comme d'anéantir les villes.

Cette conquête de l'invisible alimente réacteurs et arsenaux, mais aussi GPS, smartphones, scanners, et bientôt, peut-être, des ordinateurs quantiques. À chaque avancée, des mondes s'ouvrent. Le nôtre, pourtant, menace sans cesse de s'effondrer. C'est l'histoire d'un savoir né pour comprendre la matière, devenu puissance – une énergie prométhéenne, détournée par la politique, confisquée par les marchés, réclamée par les masses. Un vertige moral, sans doute le plus brûlant de notre temps. *Science sans conscience…*

Julien Nénault

CRÉDIT COUVERTURE : IA - THE GRANGER COLL NY / AURIMAGES - ORIGEN JACK TURNER, PRINCETON / DROITS RÉSERVÉS - HENRI MANUEL/CHRISTIE'S IMAGES / BRIDGEMAN IMAGES - AKG / SCIENCE PHOTO LIBRARY - CHRISTIE'S IMAGES / BRIDGEMAN IMAGES - GURINDER OSAN/HINDUSTAN TIMES/SIPA
CRÉDIT ÉDITO : EIKO UEDA / HIROSHIMA PEACE MEMORIAL MUSEUM

SOMMAIRE//N°224

AOÛT - SEPTEMBRE 2025

L'ACTU FACE AU PASSÉ

// PAGES 06 À 19

CACHEMIRE

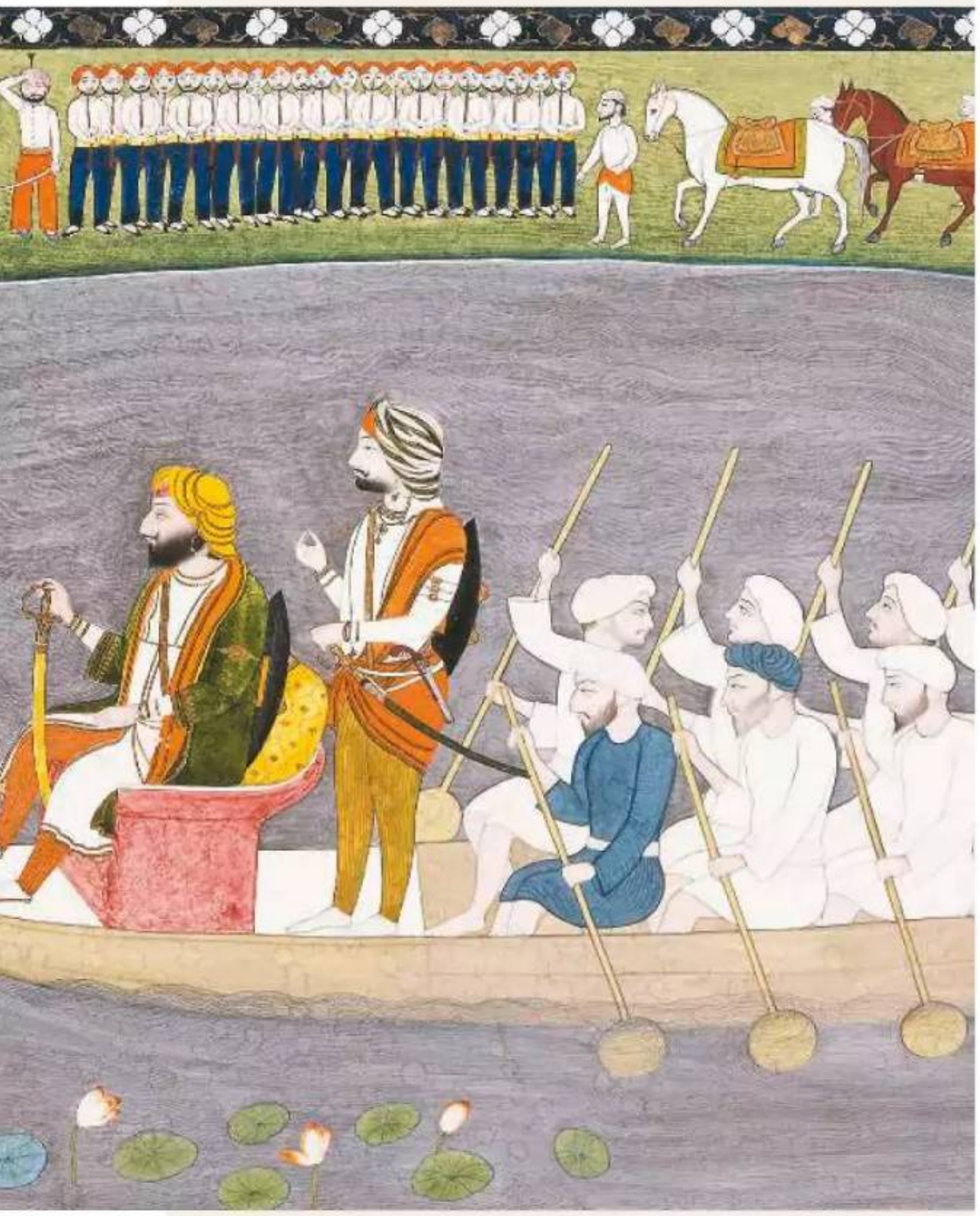
06 Dangereuse poudrière

08 Funeste partition

11 Et la Chine s'éveilla

12 De conflit en conflit

16 Entretien avec le professeur Daniel Haines



CHRISTIE'S IMAGES / BRIDGEMAN IMAGES

LE DOSSIER

// PAGES 20 À 81

HISTOIRE DE L'ATOME

22 Entretien avec l'historien Joël Pouthas

26 Penser l'insécable

34 Hérétiques de la matière, entre alchimie et science

38 La chimie moderne ouvre la voie

42 La traque aux atomes est ouverte !

46 La révolution radioactive

50 Mécanique quantique, lumière ou ténèbres

54 Du neutron au champignon

60 Hiroshima & Nagasaki

64 Stratégie nucléaire

68 Énergie « illimitée » et exception française

72 Physique quantique, moteur d'innovation

78 Imaginaires atomiques



CULTURE

82 UN ŒIL DANS LE RÉTRO
Le procès du singe

84 ARCHÉOPOP
Les vikings, l'île de Ré… et nous !

88 AU CŒUR DES EXPOS
S'inspirer du vivant

90 Le retour du bronze

92 Deux Catalans, une Méditerranée

94 Et aussi…
Dansons maintenant ! - Brûlantes

95 Bande dessinée

96 Les bonnes lectures

Ce numéro comporte sur tout ou partie de sa diffusion :
Tout-en-un Abonnement TOUT EN UN JEUNESSE NOEL
Posé en C4

RECEVEZ LES CAHIERS DE SCIENCE & VIE CHEZ VOUS.
Votre bulletin d'abonnement se trouve en page 95.
Vous pouvez aussi vous abonner par téléphone au 01 46 48 47 87 ou par Internet sur www.kiosquemag.com.

INFORMATIONS AUX ABONNÉSEN PRÉLÈVEMENT AUTOMATIQUE
Le prélèvement automatique de votre abonnement aux *Cahiers de Science & Vie*, auparavant effectué par Mondadori Magazines France, sera désormais directement prélevé par Reworld Media Magazines, nouveau nom de la société éditrice des *Cahiers de Science & Vie*.
En cas de question sur votre abonnement, notre service client est à votre disposition au 01 46 48 47 87 du lundi au samedi de 8 h à 20 h, ou par mail sur : www.serviceabomag.fr

AKG-IMAGES / SCIENCE SOURCE

L'ACTU FACE AU PASSÉ

CACHEMIRE : DANGEREUSE



COLOMBE DE VALLAVIEILLE

POUDRIÈRE



Le 22 avril dernier, le décor verdoyant de la plaine de Baisaran, près de Pahalgam, au Cachemire indien, a viré à l'horreur : surgis de la forêt, des hommes armés ont exécuté 26 touristes. New Delhi a aussitôt accusé Islamabad d'être derrière ce « terrorisme frontalier », ce que le Pakistan a fermement démenti. En quelques jours, la surenchère verbale a cédé la place aux armes. Le 10 mai, après quatre jours de violents combats – les plus intenses depuis vingt-cinq ans – un cessez-le-feu est signé. Bilan : une soixantaine de morts et, encore une fois, aucun progrès sur la question du Cachemire.

Ce territoire reste le point de friction majeur entre Inde et Pakistan depuis la partition de 1947. À majorité musulmane, l'ancien État princier est alors rattaché à l'Union indienne par son maharadja hindou, déclenchant une première guerre et un partage : l'ouest contrôlé par le Pakistan, l'est par l'Inde. Dans les années 1960, la Chine s'empare de l'Aksai Chin, à l'est, devenant un troisième acteur du conflit. Pékin, allié d'Islamabad, suit de près les tensions, surtout depuis que le Cachemire indien a été intégré au corridor économique sino-pakistanais.

Malgré la présence chinoise, New Delhi et Islamabad revendiquent l'ensemble du Cachemire tel qu'il existait en 1947. Plusieurs affrontements ont jalonné cette rivalité, nourrie par des nationalismes opposés. La situation s'aggrave en 1989 avec le début d'une insurrection cachemirie – tantôt nationaliste, islamiste ou simplement séparatiste – contre la tutelle indienne. Le Pakistan y voit une opportunité, soutient le mouvement, et y infiltre des islamistes. L'Inde, en retour, déploie massivement troupes et paramilitaires. La spirale de violence fera des dizaines de milliers de morts, sans que l'approche strictement sécuritaire de New Delhi n'enraye la crise.

Le drame de Pahalgam est le dernier soubresaut d'un conflit sans fin. Il vient aussi contredire le discours du Premier ministre Narendra Modi, qui affirme avoir ramené la paix grâce à sa politique de « normalisation ». Depuis 2019, il a privé le Cachemire de son autonomie constitutionnelle et placé la région sous contrôle fédéral. Des projets touristiques et d'infrastructures ont vu le jour, tout comme l'ouverture du foncier aux investisseurs hindous. Mais cette « hindouisation » nourrit le ressentiment local. Et le récent retrait de l'Inde du Traité des eaux de l'Indus, conclu avec le Pakistan en 1960, accentue encore sa posture de fermeté, en ligne avec l'attente de son électorat.

Fabienne Lemarchand

FUNESTE PARTITION

1947 - 1962

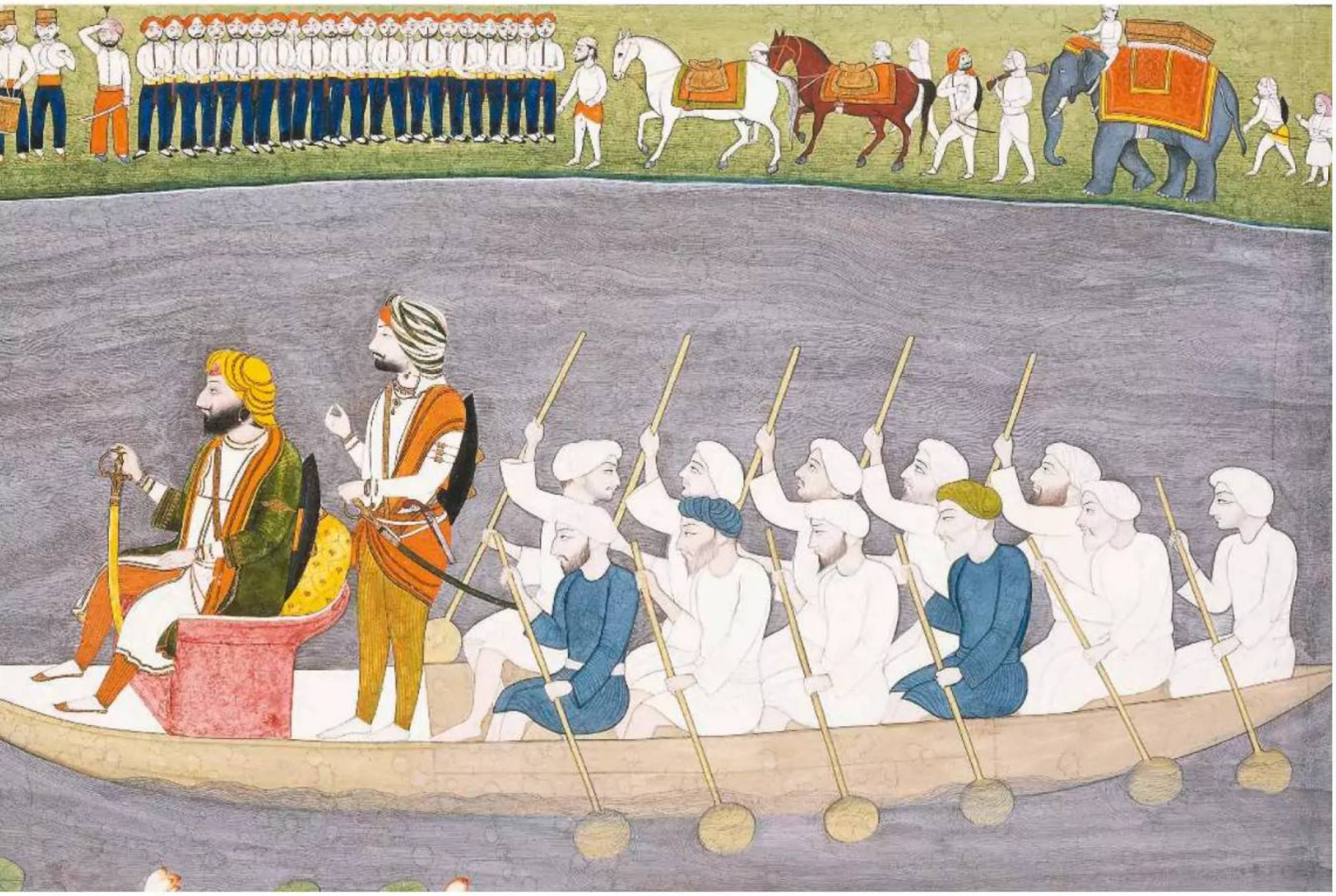


Alors que l'Inde et le Pakistan naissent dans le chaos de la Partition, leurs confins himalayens deviennent l'épicentre d'une rivalité qui, de guerres en conflits gelés, va redessiner la carte de l'Asie. Le Cachemire incarne aujourd'hui l'un des héritages les plus explosifs de la décolonisation britannique.

Le Cachemire, une nature tourmentée projetée vers le haut, partagée entre abîmes insondables et cimes agressives, une convulsion de failles profondes et de montagnes qui s'étendent à perte de vue comme un océan pétrifié. Des sommets, parmi les plus hauts du monde, K2, Nanga Parbat, Gasherbrum, y pointent leurs museaux glacés. Un pays entre terre et ciel, où la géopolitique semble aussi mouvementée que le relief. Et ce depuis longtemps. Tout au long du XIXe siècle, l'ours russe et le lion britannique s'y sont montré les crocs à l'occasion d'un Grand Jeu qu'aucun ne gagna vraiment. Lorsqu'ils décidèrent de mettre un terme à leur empire des Indes, les Anglais auraient dû se douter que ce « Grand Nord » indien allait poser des problèmes. Mais au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, le Raj est devenu un fardeau moral et financier dont il faut se débarrasser au plus vite. L'idée d'un démantèlement du futur pays sur des bases religieuses a pris corps dès 1940, lorsque Muhammad Ali Jinnah, leader de la Ligue musulmane, le parti qui entend défendre les musulmans indiens, soit un tiers de la population, se prononce formellement pour la création d'un Pakistan indépendant de l'Inde future. La partition bâclée en cinq semaines par Cyril John Radcliffe, un juriste n'ayant jamais mis les pieds en Inde, jette sur les routes 15 millions de personnes dans un formidable chassé-croisé et fait près d'un million de morts. Il faut dire que les Britanniques avaient toujours soufflé sur les braises des dissensions religieuses et ethniques. C'était alors le meilleur moyen d'affaiblir la lutte contre le colonialisme dans laquelle se retrouvaient unis hindous et musulmans.

UN ROYAUME CRÉÉ SUR MESURE

Au XIXe siècle, les Britanniques n'avaient guère envie pour des raisons essentiellement financières de s'investir directement dans ces confins himalayens. Ils ont préféré miser sur l'ambitieux Gulab Singh et son irrésistible expansion montagnarde. Cet ancien gouverneur qui a trahi les sikhs multiplie les conquêtes et leur achète la vallée de Srinagar en 1846 pour 7,5 millions de roupies (l'équivalent de plusieurs centaines de millions d'euros en valeur actuelle, *NDLR*). Une dynastie hindoue venue des marges du Cachemire a ainsi pris la tête d'un royaume, le Jammu-et-Cachemire, dont la population a été convertie à l'Islam cinq siècles plus tôt et y a imposé un régime féodal, lourdement taxé. Ce royaume n'a jamais formé un bloc homogène. Aux Cachemiris musulmans de la vallée s'ajoutaient les Dogras hindous du Jammu, les Ladakhis bouddhistes de l'est, les nomades Gujjars et Bakharwals, tous soumis à l'autorité du maharajah, mais porteurs d'identités rivales que l'histoire coloniale, puis postcoloniale, n'a cessé de recouvrir d'un vernis unificateur. En 1947, c'est Hari Singh, arrière-petit-fils de Gulab Singh, qui tient les rênes de cet ensemble disparate. *« Le Raj se compose alors de deux types de territoires : ceux directement administrés par les Britanniques et les États princiers (environ 40 % du territoire) liés à la Couronne par des traités et jouissant d'une certaine autonomie »*, rappelle Jean-Luc Racine, Directeur de recherche émérite au CNRS. *« Le plan de partage prévoit que le Jammu-et-Cachemire comme tous les autres États princiers a le choix entre adhérer à l'Inde ou rejoindre le Pakistan. La grande majorité des 562 principautés choisissent d'adhérer à la nouvelle Union indienne, une poignée rejoint le Pakistan, mais trois d'entre elles posent pro-*



Le maharaja Gulab Singh sur le lac Wular, au Cachemire (gouache et peinture dorée sur papier, école indienne du XIXe siècle, v. 1840). Ancien général de l'armée sikh, cet hindou d'ascendance rajpoute fonde en 1846, avec le soutien tacite des Britanniques, le royaume princier du Jammu-et-Cachemire, après avoir acheté la vallée de Srinagar pour 7,5 millions de roupies. Il est à l'origine de la dynastie Dogra.

blème : le Junagadh et l'Hyderabad, dont les deux souverains sont musulmans, mais dont la population est en majorité hindoue, et le Jammu-et-Cachemire dont le souverain essaie de se préserver une certaine marge de manœuvre. » Un référendum et une intervention de l'armée mettent respectivement un terme aux atermoiements des deux premiers. Hari Singh lui, se laisse le temps de réfléchir au futur… ce qui ne plaît guère aux dirigeants du nouveau Pakistan. Le nom même de Pakistan, composé comme un acronyme, ne cache rien de leurs intentions : le K y figure pour le Kashmir, qui peuplé d'une majorité de musulmans, a vocation à le rejoindre. C'est la logique de la « théorie des deux nations » qui soutient que la religion est le facteur déterminant dans la définition de la nationalité des musulmans indiens.

Des révoltes commencent à agiter le Cachemire, notamment la région de Poonch et, le 22 octobre 1947, des bandes tribales de Pachtounes venues du Nord, armées et motorisées, pénètrent dans la principauté par la vallée de la Jhelum et marchent sur Srinagar. Le 26, Hari Singh, affolé, appelle New Delhi à la rescousse, qui bien sûr saisit l'occasion pour tirer profit de son assistance : le maharajah se voit contraint de signer un traité d'accession à l'Union indienne. Des troupes indiennes sont aéroportées jusqu'à Srinagar et commencent à repousser sans difficulté les insurgés jusqu'à ce que l'armée pakistanaise ne franchisse à son tour la frontière au nom d'une solidarité islamique envers ses frères cachemiris. « *À partir de ce moment, le Pakistan qui ne reconnaît pas l'acte d'accession intervient ouvertement dans le conflit, même si auparavant les milices étaient encadrées par des officiers en civil de la toute jeune armée pakistanaise* », souligne Jean-Luc Racine. Après une guerre de faible intensité, le 1er janvier 1949, sous la pression de l'ONU, un cessez-le-feu est proclamé le long d'une ligne, de 770 km de long, nommée « ligne de contrôle » à partir de 1965, qui sépare le territoire en deux parties. Islamabad s'octroie 37 % des 222 000 km² du Jammu-et-Cachemire, soit l'Azad Cachemire, le « Cachemire libre », une région peuplée de sunnites à l'ouest de Srinagar, et l'actuel Gilgit-Baltistan, appelé alors les Territoires du Nord, vastes solitudes de haute montagne où se sont réfugiées des communautés chiites. Les deux tiers restants forment un nouvel État au sein de l'Union indienne. Mais si les canons se sont tus, les deux adversaires revendiquent toujours la souveraineté sur la totalité du territoire : le Pakistan au nom du

CHRISTIE'S IMAGES / BRIDGEMAN IMAGES



principe religieux, l'Inde faisant valoir de son côté la légitimité du traité signé par Hari Singh. L'Inde, État laïc, ne peut prendre le risque d'une sécession d'une partie de son territoire en raison de son appartenance religieuse : environ un tiers des musulmans de l'ancien Empire britannique sont restés après la partition et l'exemple du Cachemire pourrait leur donner de mauvaises idées.

UN RÉFÉRUNDUM AVORTÉ

Cette partition de 1949 est supposée être provisoire. Lord Mountbatten, dernier vice-roi des Indes et premier gouverneur général de l'Inde libre ne manque pas de rappeler que « dès que la loi et l'ordre seront rétablis au Cachemire et que son sol sera libéré des envahisseurs, la question de l'État sera réglée en se référant au peuple ». Le principe d'un référendum est acté par l'ONU pour décider du rattachement de l'État à l'un des deux pays. « *Mais dans le même temps, la résolution recommande d'organiser celui-ci après le retrait de l'armée et des milices pakistanaises ainsi que du plus gros des forces indiennes hormis celles nécessaires au maintien de l'ordre… ce qu'aucune des parties n'a encore accepté de faire* », constate Jean-Luc Racine. Le peuple cachemiri, probablement plus soudé par des sentiments régionalistes ou indépendantistes que religieux, n'a donc jamais pu se prononcer. « *Le Pakistan s'accroche à l'idée du référendum qui a l'avantage de présenter une façade démocratique. Mais faut-il l'organiser sur l'ensemble de l'ancien État princier ? Ou en faire plusieurs en fonction des différentes régions ? En 1948, le maharajah a été remplacé par Cheikh Abdullah, un chef musulman prêt à s'accommoder de l'Inde, et les Cachemiris ont au moins pu voter pour leur assemblée locale ainsi que pour la poignée de députés qui les représentent au parlement.* »
Mais l'expérience d'une autonomie réelle fut brève : en 1953, Cheikh Abdullah est destitué et emprisonné par le pouvoir central, qui redoute ses velléités d'indépendance. Ce tournant signe le début d'une marginalisation durable des aspirations politiques propres aux Cachemiris, prises en étau entre les visées d'Islamabad et l'autoritarisme de New Delhi. La politique est une chose, l'économie en est une autre. Les deux pays parviennent tout de même à s'entendre sur le contrôle de six cours d'eau traversant le Cachemire et qui se rejoignent en aval pour grossir l'Indus sur le territoire pakistanais : trois d'entre eux, la Ravi, Beas et Sutlej, peuvent être utilisés librement par l'Inde tandis que les trois autres, Indus, Jhelum et Chenab qui traversent la partie indienne du Cachemire, ne peuvent l'être que de manière très limitée. Signé en 1960 sous l'égide de la Banque mondiale, le traité de l'Indus interdit à New Delhi de les détourner ou de modifier le volume d'eau en aval, assurant ainsi l'irrigation du Pendjab pakistanais, grenier céréalier et principal producteur de coton du pays.
Mais les bonnes manières ne durent jamais qu'un temps. En août 1965, encouragé par la cuisante défaite de l'Inde face aux troupes chinoises trois ans plus tôt (voir page suivante) et interprétant sans doute un peu trop rapidement les doléances de la population locale à leur avantage, le Pakistan intervient à nouveau au Cachemire en adoptant exactement la même méthode : des francs-tireurs séparatistes, motivés et équipés par Islamabad, marchent sur Srinagar en comptant sur le soulèvement de la population locale. Mais encore une fois, les Cachemiris préfèrent rester chez eux plutôt que faire la révolution. La guerre ne dure même pas deux mois, les combats sont vite dominés par l'Inde et font 3 000 morts côté indien et près de 4 000 du côté pakistanais. L'ONU réclame bientôt un autre cessez-le-feu. Des négociations conduites sous l'égide soviétique à Tachkent aboutissent le 10 janvier 1966 à un accord de paix conclu entre le Premier ministre indien Lal Bahadur Shastri et le président pakistanais Mohammad Ayub Khan. Chacun s'engage à retirer ses troupes derrière les positions qu'elles occupaient avant que le conflit n'éclate. Sans doute éprouvé par les pourparlers, Shastri meurt le lendemain d'un infarctus… Le champ de bataille territorial s'est transformé en conflit idéologique : tant que la cause cachemirie permet de fédérer une population ethniquement fragmentée autour d'un ennemi commun, le Pakistan n'a pas vraiment envie d'un règlement pacifique. Quant aux Indiens, ils voient dans les revendications du Cachemire une menace à leur unité nationale, le combustible idéal pour alimenter le foyer d'un nationalisme exacerbé. Déjà une nouvelle guerre couve dans les braises…

Christophe Migeon

7 juin 1947, New Delhi. Le vice-roi britannique Lord Mountbatten (troisième en partant de la gauche), chargé de préparer l'indépendance de l'Inde, présente le plan de partition aux dirigeants indiens. De gauche à droite : Jawaharlal Nehru, futur Premier ministre indien ; Lord Ismay, chef de cabinet de Mountbatten ; Lord Mountbatten ; Muhammad Ali Jinnah, leader de la Ligue musulmane et futur fondateur du Pakistan.



Hari Singh, maharadja du Kashmir, Hari Singh (1895-1961).

KEYSTONE PICTURES USA / AURIMAGES - KEYSTONE-FRANCE / GAMMA RAPHO

ET LA CHINE S'ÉVEILLA

On ne rappellera jamais assez l'importance d'un simple trait tracé sur une carte. La ligne McMahon, imposée par le Royaume-Uni en 1914 pour séparer l'Inde britannique du Tibet, n'a jamais été reconnue par la Chine, car elle passait au nord de territoires qu'elle considérait comme siens. En 1950, un an à peine après la prise de pouvoir par les communistes, la nouvelle Chine populaire fait main basse sur le Tibet et remet à l'ordre du jour ses vieilles doléances : il lui faut notamment l'Aksai Chin, un plateau désolé, balayé par les vents à plus de 5 000 m d'altitude, grand comme la Belgique et le Luxembourg réunis. Pourquoi s'enticher d'une région aussi ingrate, où les éleveurs du Changtang osent à peine faire venir brouter leurs chèvres ? Pékin la considère comme vitale pour des raisons de politique intérieure, car jouxtant deux zones sensibles, le Tibet récemment conquis, mais aussi le Xinjiang, ce Far West chinois où les Ouïgours musulmans font déjà preuve d'un peu trop d'esprit d'indépendance. Au cours des années 1950, en toute discrétion et impunité, ils construisent une route de 1200 km, dont 179 à travers l'Aksai Chin pour relier le Xinjiang au Tibet, s'évitant ainsi un long détour au-delà des monts Kunlun. L'Inde découvre seulement en 1957 l'existence de cet ouvrage qui bafoue ouvertement sa souveraineté. Nehru a beau clamer que « l'Aksai Chin fait partie de la région du Ladakh en Inde depuis des siècles », la Chine rétorque que la frontière occidentale n'a jamais été formellement délimitée et que la route est entièrement construite en territoire chinois. Des discussions entre les deux pays sont entamées en 1960, mais aucun ne fait la moindre concession. À la fin de 1961, l'Inde adopte la « Forward Policy », consistant à établir des postes militaires avancés dans les zones disputées. Pékin y voit une provocation.

On admet généralement que le refuge accordé par l'Inde au 14e dalaï-lama et à ses milliers de partisans tibétains après la révolte de 1959 décide les Chinois à passer à l'action. Il est probable que l'altération de relations sino-soviétiques à ce moment précis ait aussi pesé dans la balance : peu de temps auparavant, les Soviétiques, inquiets de la tournure prise par le catastrophique « Grand Bond en avant », reviennent sur leur promesse d'aider la Chine à se doter de la bombe atomique, et dès l'été 1960, mettent un terme brutal aux projets d'assistance technique et économique. Le 20 octobre 1962, la Chine saisit l'occasion d'humilier l'Inde, alors en bonnes relations avec Moscou, en lançant 8 000 soldats de l'Armée populaire de Libération à l'assaut de l'Aksai Chin et de la North-East Frontier Agency, le futur État indien d'Arunachal Pradesh. Les forces indiennes sont terrassées et déplorent plus de 3 000 morts. Soucieuse d'éviter l'intervention directe des États-Unis ou de l'Union soviétique, Pékin déclare un cessez-le-feu, après un mois de combats intenses. Elle déclare l'Aksai Chin territoire chinois de facto, mais concède à retirer ses troupes derrière la ligne McMahon en signe d'apaisement.

Aussi périphérique qu'il paraisse, ce bref conflit himalayen a refaçonné la diplomatie asiatique. Il a entériné la rupture sino-soviétique et accouché d'une idylle sino-pakistanaise : le Pakistan s'est empressé de reconnaître la souveraineté chinoise sur l'Aksai Chin et complète la dot en 1963 en cédant la vallée de Shaksgam, tandis que la Chine soutient ses revendications sur d'autres parties du Gilgit-Baltistan. Côté indien, l'humiliation militaire et l'essai nucléaire chinois de 1964 sonnent l'alarme. New Delhi, jusque-là pacifiste et non alignée, accélère sa course à l'atome pour dissuader la Chine et le Pakistan… qui ne tardera guère à l'imiter. La course à la bombe en Asie du Sud est lancée.

C.M.



En 1962, la Chine et l'Inde s'affrontent dans l'Himalaya pour le contrôle de territoires disputés, notamment l'Aksai Chin et l'Arunachal Pradesh.

DR

PÉKIN CONSIDÈRE LA RÉGION VITALE, CAR JOUXTANT DEUX ZONES SENSIBLES : LE TIBET, MAIS AUSSI LE XINJIANG

DE CONFLIT EN CONFLIT



1972 - AUJ.

Décembre 1971 : la troisième guerre indo-pakistanaise, liée à la libération du Pakistan oriental — sur cette image, des soldats pakistanais sous le feu indien — aboutit à la création du Bangladesh. Les deux États issus de la partition s'étaient déjà affrontés en 1947-48 et 1965 autour du Cachemire.

Juillet 1972, Simla. Indira Gandhi et Zulfikar Ali Bhutto signent un accord de paix après la guerre ayant conduit à la création du Bangladesh. La « ligne de contrôle » au Cachemire est entérinée, sans clore le contentieux.

Depuis l'accord de Simla, en 1972, censé enterrer la guerre, le Cachemire n'a jamais cessé d'attiser les tensions. Autonomie vidée, militarisation, ingérences extérieures, rivalité atomique : la région demeure au cœur d'un conflit gelé.



Le 2 juillet 1972, réunis à Simla, ancienne capitale d'été du Raj britannique accrochée aux contreforts de l'Himalaya, la Première ministre indienne Indira Gandhi et le président pakistanais Zulfikar Ali Bhutto sont enfin parvenus à un accord au terme de négociations serrées. Six mois après la fin de la sanglante guerre qui les avait une nouvelle fois opposés, et qui s'était soldée par la victoire de l'armée indienne et l'accession officielle à l'indépendance du Pakistan oriental (Bangladesh), les dirigeants s'engagent à respecter mutuellement leur unité nationale, leur intégrité territoriale et leur souveraineté, mais aussi *« à régler leurs différends de façon pacifique, par des négociations bilatérales ou par d'autres moyens pacifiques définis d'un commun accord »*. À propos du Cachemire, les termes de l'accord restent cependant flous. Certes, la « ligne de contrôle » (LoC), limite à la fois militaire et administrative entre les zones contrôlées par New Delhi et Islamabad, est entérinée. Mais les germes du conflit sont laissés en latence. Car le Pakistan n'entend pas renoncer à une médiation internationale sur le sujet ni à l'organisation du référendum d'autodétermination acté de longue date par les Nations Unies. L'Inde, de son côté, considère que le débat est clos, les Cachemiris ayant librement adhéré à l'Union en participant notamment aux élections locales et nationales. Dès lors, Zulfikar Ali Bhutto va rechercher une politique de rechange face à son voisin ennemi. C'est ainsi qu'à partir de 1974, il décide lui aussi de jouer la carte de l'atome avec le soutien de la Chine, tout en se rapprochant du monde arabo-islamique et en faisant de l'islam le levier de sa politique intérieure comme extérieure.

En 1987, le Cachemire est de nouveau au bord de l'explosion. La manipulation des élections locales par New Delhi pour s'assurer la défaite du Front musulman uni, favorable à l'autodétermination et au respect de l'autonomie pleine et entière telle que reconnue dans la Constitution de 1950, entraîne une flambée contestataire chez les Cachemiris. *« Cela faisait des années que le fameux statut d'autonomie du Jammu-et-Cachemire était mis à mal et que la démocratie y était bafouée. D'où une intense frustration de la population »*, relève Anne Viguier, historienne au sein du département Asie du Sud et Himalaya (INALCO/CESSMA). Fin 1989, l'insurrection éclate à Srinagar, portée en premier lieu par le Front de libération du Jammu-et-Cachemire (JKLF), un mouvement indépendantiste autochtone. *« Galvanisés par la prise de pouvoir des talibans en Afghanistan après le départ des Soviétiques, les insurgés dénoncent la politique impérialiste de New Delhi et la corruption de la classe dirigeante que le gouvernement central a placée au pouvoir, et réclament ce fameux droit à l'autodétermination*, poursuit l'historienne. *Le Pakistan, qui était devenu la base arrière des moudjahidines afghans, va très vite recruter de jeunes Cachemiris, les former au maniement des armes et à la guérilla, avant qu'ils ne reviennent en territoire indien pour y mener des opérations terroristes. Et cela ira en s'amplifiant au cours des années 1990 avec la radicalisation des insurgés. »* À partir de 1992, la *Jamaat-e IIslami* et le *Hizbul Moudjahidin*, deux groupes islamistes propakistanais entrent en jeu qui luttent, eux, pour un rattachement de l'État au Pakistan. Les attaques se multiplient contre les militaires, mais aussi les civils, en particulier hindous, lesquels fuient en masse vers d'autres régions de l'Inde (voir l'encadré *L'exode des Pandits*, p. 15). En face, la répression indienne est impitoyable. La région est placée sous l'administration directe du pouvoir central. Plus de 500000 militaires et paramilitaires sont déployés pour une population de quelque 7 millions d'individus… Incapable de mater la rébellion, l'armée indienne multiplie les arrestations arbitraires, les viols, les assassinats, les ratissages urbains… L'acharnement des différentes parties donne lieu à tous les excès, lesquels ne font que renforcer l'insurrection. L'Inde accuse le Pakistan de mener une « guerre par procuration » au Cachemire indien, et d'encourager les incursions des combattants islamistes pour y maintenir l'instabilité et encourager la radicalisation d'une jeunesse locale. Le Pakistan de son côté parle de « combattants de la liberté » et qualifie la répression indienne de « terrorisme d'État ». En quinze ans, cette « sale guerre » coûtera la vie à au moins 40000 personnes, voire selon certaines sources, à 80000. Et ce, dans une

KEYSTONE PICTURES USA / AURIMAGES - AP / SIPA



indifférence internationale quasi totale… Du moins jusqu'en 1998 lorsque les deux belligérants procèderont chacun à des essais nucléaires.

MAIN DE FER ET PROJET IDENTITAIRE

En février 1999, sous la pression de Washington qui redoute une escalade délétère, le Premier ministre indien, Atal Bihari Vajpayee, et Nawaz Sharif, son homologue pakistanais, se rencontrent à Lahore. Mais cette amorce de détente est immédiatement torpillée par le général Pervez Musharraf. Le chef de l'armée pakistanaise, qui refuse de céder quoi que ce soit sur le Cachemire, envoie des forces paramilitaires armées au-delà de la LoC, dans la région montagneuse de Kargil. Une nouvelle guerre éclate qui fait, entre mai et juillet, plus d'un millier de morts. Le Pakistan est encore une fois défait militairement, mais aussi diplomatiquement. Les États-Unis somment en effet Nawaz Sharif de retirer ses troupes infiltrées et de cesser tout soutien aux combattants. Il limoge Musharraf et le paiera cher. Le 12 octobre 1999, le général le renverse.

Les attentats du 11 septembre 2001 et la guerre américaine contre le terrorisme menée en Afghanistan inaugurent une nouvelle période d'instabilité. Le 1er octobre, des commandos islamistes mènent une attaque contre l'Assemblée régionale du Cachemire indien, à Srinagar, causant 38 morts. Le 12 décembre, c'est le Parlement indien à New Delhi qui est visé à son tour. L'Inde, qui accuse le Pakistan, déploie immédiatement ses troupes le long de la LoC. Elle n'a de cesse de condamner le « terrorisme frontalier ». Ce qui, dans un contexte international très sensible, trouve évidemment écho. Les élections qui se déroulent quelques mois plus tard, que ce soit au Jammu-et-Cachemire ou au Pakistan, finiront par apaiser les esprits. Début 2004, Atal Bihari Vajpayee et Pervez Musharraf rouvrent même le dialogue multipliant les gestes de bonne volonté, même si la question du Cachemire reste en suspens. Mais en 2008, des attentats sont perpétrés à Bombay qui interrompent le processus de rapprochement. Et d'autres vagues de violence ne tardent pas à surgir, comme à l'été 2010, en 2013 ou encore en 2014 après l'arrivée au pouvoir du nationaliste hindou Narendra Modi. De fait, l'homme fait du maintien de l'ordre et de la lutte contre le terrorisme islamiste ses priorités. « *Sa politique strictement répressive va provoquer une résurgence des tensions. L'armée indienne emploie la punition collective. Elle brûle les récoltes des villages dont les combattants sont soi-disant originaires, détruit des maisons alors que c'est interdit par la Cour suprême* » explique la politiste Charlotte Thomas, spécialiste de la minorité musulmane en Inde. Et les violences se poursuivent. Le 14 février 2019, une quarantaine de paramilitaires indiens sont ainsi tués au cours d'une attaque-suicide à Pulwama revendiqué par le groupe islamiste *Jaish-e-Mohammed*. L'Inde réplique en bombardant la ville de Balakot, au nord-est du Pakistan, qui héberge l'un de leurs camps d'entraînement.

C'est dans ce contexte que, le 5 août, Narendra Modi décide d'abroger brutalement le statut d'autonomie relative du Jammu-et-Cachemire. Celui-ci est scindé en deux « territoires de l'Union » placés sous administration directe de New Delhi : le Ladakh, de culture bouddhiste et le Jammu-et-Cachemire à majorité musulmane. À l'intérieur de celui-ci la vallée séparatiste vit littéralement en état de siège : les communications mobiles et Internet y sont coupés, le couvre-feu imposé, les médias muselés, les déplacements de la population entravés, les habitants placés sous un contrôle militaire renforcé… Les Cachemiris perdent également leur droit exclusif à posséder des terres dans la vallée himalayenne et accéder aux emplois gouvernementaux. « *Ce droit avait permis depuis 1950 non seulement de préserver l'équilibre démographique singulier du Cachemire dans lequel cohabitaient musulmans, hindous et sikhs. Mais aussi de mettre en œuvre une dynamique de développement économique autochtone* », commente Charlotte Thomas. Ce coup de force constitutionnel, promet alors Modi, est nécessaire pour « libérer le Cachemire du terrorisme » et entamer « une nouvelle ère de paix et de développement ». Pour la politiste, le message est pourtant sans équivoque. Il s'agit ni plus ni moins de dépouiller la région à majorité musulmane de son statut d'exception afin de l'intégrer au reste de l'Inde et d'« hindouiser » sa population à l'instar de la politique suprémaciste que mène le Premier ministre dans le reste du pays. « *Modi a la volonté de transformer la démographie locale et pour ce faire, appelle au tourisme et à l'installation*

En juillet 1999, à Karachi, des militants islamistes protestent contre le retrait des combattants cachemiris du secteur de Kargil, dénoncent l'accord Nawaz-Clinton et affirment que le « djihad sacré » se poursuivra jusqu'à la destruction de l'Inde.

À LIRE

L'Asie, terre de conflits. Enquête sur la nouvelle poudrière mondiale, Emmanuel Lincot, Barthélémy Courmont, Cerf, 2025.

L'autonomie empêchée, Jammu-et-Cachemire 1947-2029, Charlotte Thomas, La Vie des idées, 2020, https://laviedesidees.fr/L-autonomie-empechee.

Brève histoire de l'Inde, Anne Viguier, Flammarion, 2023.

REUTERS / ZAHID HUSSEIN / BRIDGEMAN IMAGES

dans la vallée. De fait, les autorités locales estiment qu'entre 80 et 85 000 Indiens se sont déjà installés au Cachemire tandis qu'ils ont préempté plusieurs milliers de kilomètres carrés de terres, parfois dans des zones pastorales tribales dont l'usage est coutumier et où les titres de propriété ne sont pas clairement établis. Les noms de lieux historiques à consonance musulmane sont également peu à peu remplacés par d'autres hindouisés, comme dans le reste de l'Inde », pointe-t-elle.

PÉKIN AVANCE SES PIONS

L'attentat meurtrier perpétré le 22 avril dernier contre des touristes indiens dans la région de Pahalgam met pourtant à mal la propagande du gouvernement de Modi qui se targuait d'avoir ramené la paix dans la région. Et la guerre éclair et le cessez-le-feu qui ont suivi n'ont en réalité rien réglé. Même si pour l'heure, la trêve est globalement respectée le long de la LoC, le risque d'un nouveau conflit entre les puissances nucléaires n'est toujours pas à écarter. D'autant moins qu'un troisième acteur est impliqué : la Chine (voir *Et la Chine s'éveilla*, p. 11). *« Le Cachemire dans sa globalité est pour elle une voie de passage essentielle à son projet des "Nouvelles Routes de la soie"*, rappelle Emmanuel Lincot, professeur à l'institut catholique de Paris et directeur de recherche à l'Iris. *Pékin a conclu en 2013 un accord avec le Pakistan pour le développement d'un corridor économique entre Kashgar, dans le Xinjiang chinois, et le port de Gwadar, au sud du Pakistan, porte d'entrée vers la mer d'Oman et l'océan Indien. Ce corridor traverse le Gilgit-Baltistan, une région sous contrôle pakistanais, mais revendiquée par l'Inde, puis l'Azad-Cachemire et enfin le Baloutchistan en butte lui-aussi à une guérilla sécessionniste. Soucieuses de protéger ses intérêts dans le pays, les autorités chinoises financent de manière croissante l'armée pakistanaise. »* Les turbulences politiques à répétition, une crise économique dramatique et une dette publique explosive nourrissent en effet la colère de la population contre l'État central depuis des années, mais aussi, plus récemment, contre les ressortissants chinois travaillant sur les chantiers pakistanais associés au corridor économique. Mais pour le chercheur, *« la Chine continue d'apporter un soutien très pragmatique au Pakistan dans le but de perpétuer une forme de guérilla par acteur interposé afin d'affaiblir l'Inde, avec qui elle a des différends frontaliers non résolus de longue date. Elle soutient des factions terroristes réfugiées au Pakistan et au Cachemire en particulier pour les utiliser contre l'Inde. Dans ce jeu à trois, ce sont bien les autorités chinoises qui contrôlent les règles du jeu. La région sera sans aucun doute exposée à des crises particulièrement importantes dans les années à venir. »* En particulier autour de l'eau. À la suite de l'attentat de Pahalgam, Narendra Modi a décidé de rompre unilatéralement le traité bilatéral de 1960 qui régit la répartition des eaux de l'Indus qui transitent par le Cachemire pour irriguer le Pakistan. Le 21 juin dernier, le ministre indien de l'Intérieur Amit Shah a même annoncé que le traité ne serait jamais rétabli. Et que les eaux qui coulaient vers le Pakistan seraient détournées vers le Rajasthan via un canal. *« La Chine a bien compris que la politique du Premier ministre indien est de préempter et de redistribuer l'eau. Or, elle aussi est dans une logique de prédation des eaux du Brahmapoutre, qu'elle veut détourner pour alimenter le nord de la Chine. L'Inde est vis-à-vis de la Chine dans la même situation que le Pakistan vis-à-vis d'elle »*, affirme Charlotte Thomas. Prise en étau entre ces trois puissances nucléaires, la population cachemirie est plus que jamais réduite au silence. C'est pourtant à elle de décider de son propre avenir.

Fabienne Lemarchand



À Lucknow, fin avril 2025, les professionnels du tourisme et de l'hôtellerie manifestent en réaction à l'attaque terroriste de Pahalgam, dans le sud du Cachemire, survenue quelques jours plus tôt. Cette attaque dans une zone touristique a fait au moins 26 morts, principalement des touristes, et plusieurs blessés.

HINDUSTAN TIMES/SHUTTERSTOCK/SIPA

L'exode des Pandits

Perçus comme des agents du gouvernement, les Pandits du Cachemire indien, qui représentent l'élite intellectuelle et spirituelle hindoue, ont été, dès le début de l'insurrection, en 1989, parmi les premières cibles des groupes séparatistes islamistes. Plus de 350 000 ont fui vers le sud de la vallée. Quant au nombre de morts, il est toujours l'objet de discussions. Des propagandes prohindoues ont exagéré les massacres. Inversement, les séparatistes musulmans ont minimisé la gravité du sort de ces victimes oubliées de la guerre. Mais près de 300 Pandits auraient été assassinés en 1990 et 650 durant le conflit.

« On évoque souvent la possibilité de guerres de l'eau, bien qu'on n'en connaisse aucune. »

Entretien avec le professeur **Daniel Haines**

Cahiers de Science & Vie : **Pourquoi les eaux de l'Indus sont-elles si importantes pour le Pakistan et pour l'Inde ?**

Daniel Haines : Le bassin de l'Indus fournit 70 à 80 % des eaux de surface du Pakistan. Quant à l'Inde, elle dispose de nombreux autres grands fleuves comme le Gange, le Brahmapoutre ou le Kaveri. Mais le bassin de l'Indus irrigue également l'Haryana, le Rajasthan, et bien sûr le Pendjab et le Cachemire, côté indien comme pakistanais…

CSV : **En quoi la partition de 1947 a-t-elle bouleversé l'équilibre hydraulique ?**

D.H. : Quand le sous-continent indien était placé sous domination britannique, à la fin du XIX^e siècle, le gouvernement colonial avait creusé un immense réseau de canaux dans l'ouest du Pendjab et dans le Sindh. C'était le plus vaste réseau d'irrigation au monde, et en amont de la partition, le Pendjab oriental avait signé un accord promettant au Pendjab occidental de continuer à alimenter les canaux de l'ouest. Seulement l'accord prenait fin le 31 mars 1948, et dès le lendemain, les ingénieurs du Pendjab indien coupaient l'eau des canaux pakistanais de Dipalpur et du haut Bari Doab. Environ 8 % des terres agricoles pakistanaises ont été privées d'irrigation, en pleine période de semis. Et bien que l'eau soit revenue dans les canaux début mai, les ingénieurs puis les représentants des gouvernements ne parvenaient pas à se mettre d'accord : le Pakistan a d'abord accepté de verser d'importants paiements à l'Inde, avant de réaliser que cela n'était pas viable, moyennant quoi il n'a jamais payé. Finalement, grâce à l'intervention de l'Américain David Lilienthal, la Banque mondiale a offert de parrainer des négociations. Et à partir de 1952, des délégations de l'Inde et du Pakistan ont commencé à négocier non plus seulement pour les canaux du Pendjab, mais pour l'ensemble du bassin de l'Indus.



DANIEL HAINES, professeur associé au Département de l'Histoire des Risques et des Catastrophes de l'University College de Londres. Il travaille sur l'histoire et la politique environnementale en Inde, au Pakistan et en Asie du Sud. Il est l'auteur de deux ouvrages : *Rivers Divided : Water in the Making of India and Pakistan* (2017) et *Building the Empire, Building the Nation* (2013).

CSV : **Quelle était alors la situation au Cachemire ?**

D.H. : La première guerre du Cachemire était en cours au début du différend sur l'eau. Puis une ligne de cessez-le-feu a été établie en janvier 1949 entre Inde et Pakistan, et depuis, le partage territorial a plus ou moins été gelé. D'aucuns ont suggéré qu'il y avait un lien entre les offensives pakistanaises au Cachemire et la question hydraulique. Je n'en ai trouvé aucune preuve dans les archives. Les dirigeants pakistanais rappellent périodiquement que l'Indus et ses affluents traversant le Cachemire avant d'arriver au Pakistan, cette région doit rester « libre » et non occupée par l'Inde. Il est toutefois difficile d'affirmer que cela constituait un motif majeur d'agression. En réalité, depuis les années 1990, on évoque souvent la possibilité de guerres de l'eau, bien qu'on n'en connaisse aucune dans l'histoire contemporaine. La rivalité autour du Cachemire existerait sans différend autour de la gestion du bassin de l'Indus, et réciproquement. Seule la géographie explique qu'ils soient parfois connectés.

CSV : **Mais les projets hydrauliques n'ont-ils pas aggravé les tensions entre l'Inde et le Pakistan ?**

D.H. : La centrale hydroélectrique de Salal, édifiée par l'Inde au Jammu-et-Cachemire sur le Chenab,

UCL



Des ouvriers traversent un pont devant le barrage hydroélectrique de Baglihar (450 MW), construit sur la rivière Chenab à Chanderkot, à environ 154 km au nord de Jammu, en Inde, le vendredi 10 octobre 2008. La construction, commencée en 2000, s'est poursuivie malgré les protestations du Pakistan, qui craint une réduction des ressources en eau vers sa région agricole clé du Pendjab.

LE TRAITÉ DE L'INDUS A AFFAIBLI LA CONFIANCE MUTUELLE INDISPENSABLE À UNE GESTION PARTAGÉE

l'un des affluents de l'Indus, a dû faire face aux objections du Pakistan dans les années 1970. Puis le Pakistan s'est vivement opposé à la conception du projet hydroélectrique de Kishanganga, toujours dans le Jammu-et-Cachemire, mais en amont du Jhelum, autre fleuve majeur se jetant dans l'Indus. Il a aussi contesté les plans du barrage de Baglihar, sur le Chenab. Marqué par les événements de 1948, le Pakistan est resté méfiant quant au partage des eaux. Et au Cachemire, le plus grand projet hydraulique de l'époque fut en réalité pakistanais avec le barrage de Mangla, toujours sur le Jhelum, mais dans le territoire de l'Azad Cachemire. Or dans les années 1950, Jawaharlal Nehru, le Premier ministre de l'Inde, a été vivement critiqué par des membres du Parlement pour ne pas s'y être opposé fermement. Car de leur point de vue, l'Azad Cachemire faisait partie de l'Inde et la construction du barrage par le Pakistan constituait une agression.

CSV : Comment ces batailles de l'eau ont-elles impacté les populations ? Ont-elles un lien avec les mouvements séparatistes ?

D.H. : Pour les populations, les tensions autour de l'eau sont surtout infranationales. Au Pakistan, la question de l'eau divise ainsi depuis longtemps le Pendjab et le Sindh – lequel s'est opposé à un projet de barrage sur le cours de l'Indus. De même en Inde, le barrage de Bhakra Nangal, situé sur le Sutlej (autre affluent de l'Indus) dans l'actuel État de l'Himachal Pradesh, fut à l'origine de manifestations dans le Pendjab indien et l'Haryana. Quant aux mouvements séparatistes, il y a en effet un nationalisme sindhi qui accuse le Pendjab de voler l'eau du Sindh. Mais il n'est pas très important, ni vraiment actif comparé à d'autres comme le Front de libération du Baloutchistan ou le mouvement sikh Khalistan, lesquels ne se battent pas pour le partage de l'eau.



Sur la rivière Jhelum, lieu de construction du barrage de Mangla, dans le territoire de l'Azad Cachemire administré par le Pakistan, près de la ville de Mirpur.

CHANNI ANAND / AP / SIPA - MARY EVANS / SIPA

CSV : Revenons-en au partage. Le traité des eaux de l'Indus a-t-il stabilisé les relations entre Inde et Pakistan, ou bien a-t-il installé la méfiance ?

D.H. : Les deux ! Ce traité a affaibli la confiance mutuelle indispensable à une gestion partagée des ressources en eau. Et il est tout à fait particulier, car l'eau a été répartie de manière géographique plutôt que volumétrique, comme on le fait habituellement et comme ce sera le cas pour le Gange. L'Inde a ainsi obtenu le contrôle de trois



Jardiniers indiens qui irriguent une propriété coloniale (aquarelle, v. 1787).

AKG-IMAGES / BRITISH LIBRARY

« fleuves orientaux » – les trois affluents de l'Indus que sont le Sutlej, le Ravi et le Beas – et le Pakistan celui de trois « fleuves occidentaux » – à savoir l'Indus, le Chenab et le Jhelum. Or l'irrigation du Pakistan s'appuyait auparavant principalement sur les eaux du Sutlej. D'où la mise en place par la Banque mondiale d'un Fonds de développement du bassin de l'Indus – financé pour plus de la moitié par les États-Unis – qui a permis au Pakistan de construire un énorme réseau de canaux pour distribuer l'eau des fleuves occidentaux dans tout le pays. Une Commission permanente de l'Indus fut par ailleurs créée en 1960, avec un commissaire pour l'Inde et un autre pour le Pakistan qui se rencontraient régulièrement pour discuter, partager des données, faire des inspections conjointes de projets de barrages pour vérifier leur conformité avec le traité. Cela fonctionnait plutôt bien. Jusqu'à la pandémie de COVID-19, les délégations des deux États n'ont jamais manqué aucune réunion, y compris au moment des guerres indo-pakistanaises de 1965 et 1971 ou du conflit de Kargil en 1999. Mais en 2024, l'Inde a cessé d'envoyer une délégation, car elle voulait renégocier le traité.

CSV : Pourquoi le traité ne lui convenait-il plus ?

D.H. : Dans les années 1950, l'Inde n'avait aucun projet majeur concernant la gestion des eaux pour le Jammu-et-Cachemire. Elle voulait avant tout faire aboutir son projet de barrage de Bhakra Nangal et lancer la construction du canal Indira Gandhi à travers le Pendjab, l'Haryana et le Rajasthan. Voilà pourquoi elle a cédé sur les fleuves occidentaux, le Pakistan acceptant de son côté de ne plus avoir accès aux fleuves orientaux, tant qu'il pouvait assurer l'irrigation de ses terres autrement. Mais les priorités indiennes ont changé.

CSV : Après l'attaque du 22 avril 2025 au Jammu-et-Cachemire, l'Inde s'est retirée du Traité de l'Indus. Ce lien entre sécurité militaire et contrôle de l'eau n'était-il pas présent dès le départ ?

D.H. : Oui et non. Dans les années 1950, les dirigeants pakistanais faisaient de l'accès aux eaux de l'Indus une question de survie. Puis après la signature du traité, c'est du Cachemire dont ils affirmaient avoir besoin, puisque leur pays dépendait entièrement des cours d'eau qui le traversent. On trouve toujours ce type d'arguments dans les discours actuels du Pakistan. Mais ce qui est nouveau, c'est que l'Inde lie elle aussi contrôle de l'eau et sécurité depuis l'arrivée au pouvoir du Bharatiya

> L'INDE NE FOURNIT QU'UN TIERS DU BASSIN DE L'INDUS, ET NE PEUT STOCKER L'EAU S'ÉCOULANT VERS LE PAKISTAN

Janata Party. Après les attaques terroristes à Uri en 2016 et à Pulwama en 2019, il y a ainsi eu diverses déclarations. Dont une du Premier ministre Narendra Modi, disant en substance : *« Pourquoi devrions-nous envoyer de l'eau aux Pakistanais s'ils nous attaquent ? »* Le gouvernement pakistanais a toujours nié toute implication dans les attentats. Toujours est-il que l'Inde s'est mise à vouloir exploiter pleinement le traité de l'Indus, en augmentant par exemple le nombre des petits projets hydroélectriques sur les fleuves occidentaux auxquels elle avait droit. Et l'on assiste aujourd'hui à une escalade assez logique, avec la volonté de modifier le traité.

CSV : Le Pakistan s'est dit inquiet de possibles détournements de flux d'eau, qu'il verrait « comme un acte de guerre ». Ce risque de guerre de l'eau est-il exagéré ?

D.H. : Encore une fois, nous ne connaissons pour l'instant aucun exemple de guerre de l'eau dans le monde moderne, et je ne pense pas que l'eau puisse être une cause directe de conflit militaire. En revanche, la question de l'eau peut attiser des tensions. D'autant que les dirigeants de l'Inde et du Pakistan font chacun de leur côté des déclarations tonitruantes à caractère nationaliste. Quant aux menaces sur l'eau, l'Inde ne fournit qu'un tiers du bassin de l'Indus, et ne peut stocker l'eau qui s'écoule vers le Pakistan sur de longues durées. Mais le Pakistan utilise l'eau de manière intensive, et une coupure de quelques jours pourrait sérieusement nuire à l'irrigation de certaines de ses terres. Notamment si l'Inde venait à interrompre le flux du Chenab, pour lequel le Pakistan n'a pas de barrage de stockage.

CSV : La Chine est-elle impliquée dans ces rivalités hydriques ?

D.H. : La Chine et le Pakistan ont un partenariat étroit : elle constitue son principal fournisseur d'armement. Et l'Inde s'inquiète d'un possible conflit sur deux fronts, l'un à l'ouest avec le Pakistan et l'autre au nord avec la Chine. Mais je ne crois pas que la Chine veuille instrumentaliser l'eau et qu'elle cherche à protéger les intérêts du Pakistan. Elle agit pour son propre compte et avait annoncé vouloir construire le plus coûteux barrage du monde sur le Brahmapoutre – à 30 km seulement de la frontière sino-indienne – bien avant les récents événements. Il ne s'agit donc pas, comme certains tendent à le penser, de représailles à la suite du retrait indien du traité de l'Indus.

CSV : Qu'il s'agisse de la Chine, du Pakistan ou de l'Inde, le changement climatique modifie la fonte des glaciers et le régime des fleuves, pendant que la pression démographique accentue les besoins. Le traité de 1960 est-il adapté à ces défis ?

D.H. : N'opérant pas un partage en termes de volumes d'eau, comme c'est le cas pour le Gange, mais d'attributions géographiques de cours d'eau, le traité de l'Indus n'est pas pertinent pour répondre à ces défis. Mais l'Inde et le Pakistan doivent sérieusement se préoccuper de revoir leurs techniques d'irrigation, car elles s'appuient sur un modèle hérité de l'époque coloniale qui utilise l'eau de manière intensive, et va de pair avec des problèmes de drainage. Il pourrait donc être judicieux, lors de nouvelles négociations sur le traité, d'introduire des obligations environnementales : les deux pays seraient en effet responsables l'un envers l'autre, et moins tentés de ne pas respecter des promesses faites à leurs populations. Mais il y a aussi la question des eaux souterraines : dans le Pendjab pakistanais, par exemple, 40 à 50 % de l'irrigation provient de puits. Or l'aquifère passe sous la frontière, il n'y a pas de réglementation efficace au niveau national, et aucun accord international avec l'Inde ni aucune coopération ne serait-ce que pour cartographier les nappes d'eau souterraine…

CSV : Justement, pensez-vous qu'on puisse envisager pour l'avenir une réelle coopération dans la gestion des eaux de ces deux pays ?

D.H. : Honnêtement, il me semble que la possibilité d'une réelle coopération est improbable, au vu des tensions géopolitiques. Dans un avenir proche, le mieux que nous pouvons probablement espérer est de revenir aux accords du traité, mais avec plus de considération pour le changement climatique et l'environnement. Quand David Lilienthal a lancé les négociations en 1951, il espérait mettre en place un système de gestion coopérative. Mais la Banque mondiale a conclu que c'était impossible, et c'est pourquoi elle a proposé de diviser les fleuves. Autrement dit, si on parle de coopération depuis les années 1950, elle n'a jamais existé…

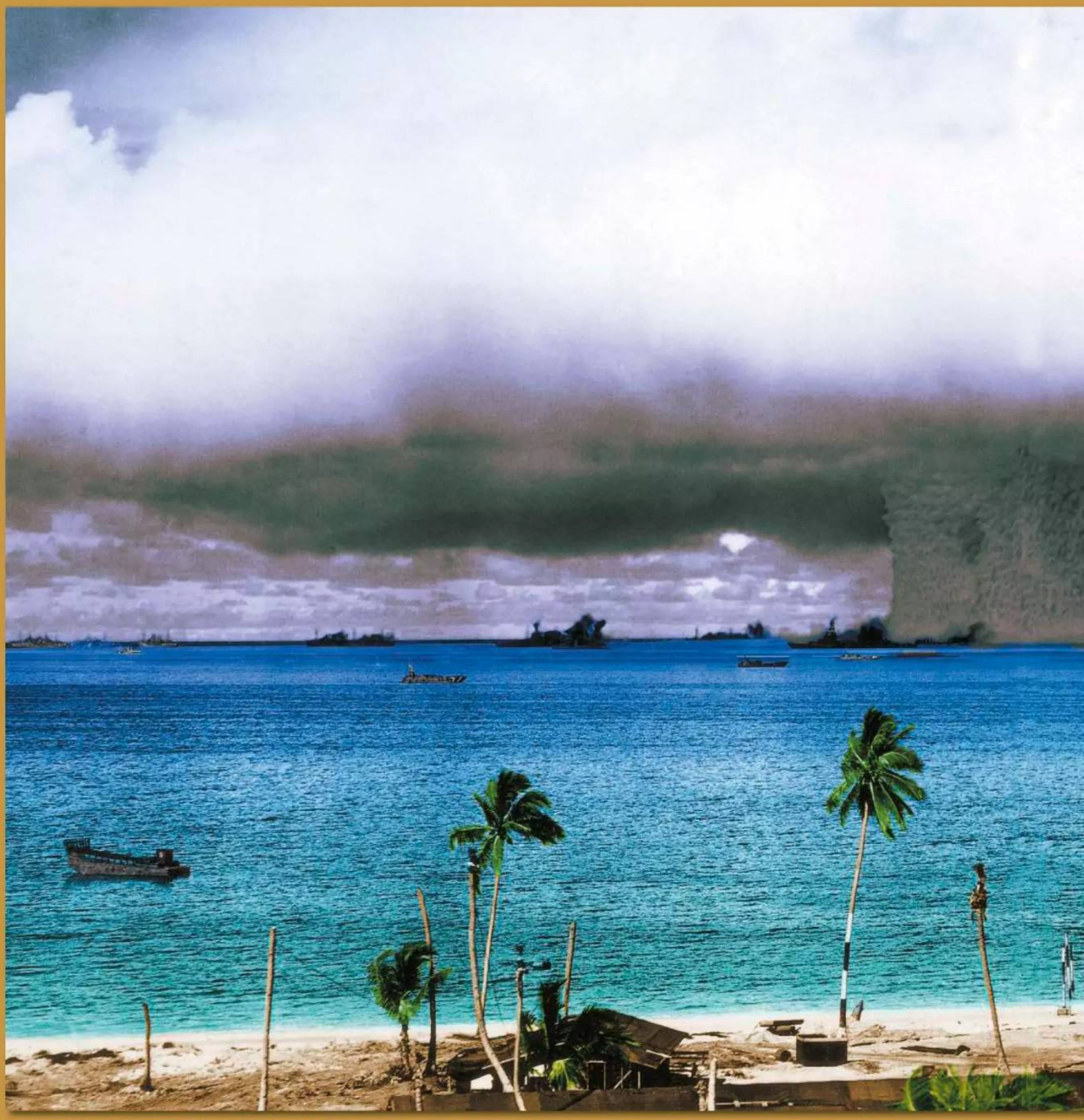
Propos reccueillis par Anne Lefèvre-Balleydier



Le 19 mai 2025, à New Delhi, le ministre indien de l'Agriculture, Shivraj Singh Chouhan, échange avec des représentants syndicaux agricoles au sujet de la suspension du traité des eaux de l'Indus avec le Pakistan. Les discussions portent sur les enjeux liés à la gestion des ressources hydriques et leurs répercussions possibles pour l'agriculture.

HINDUSTAN TIMES/SHUTTERSTOCK/SIPA

HISTOIRE



Essai nucléaire « Baker », atoll de Bikini, 25 juillet 1946. Image colorisée de l'opération *Crossroads* : une bombe sous-marine crée un panache d'eau de 1 800 mètres. L'essai visait à tester l'impact d'une arme atomique sur des navires de guerre.

DE L'ATOME



AKG-IMAGES / SCIENCE SOURCE

L'atome scientifique n'a rien en commun avec l'atome philosophique des Grecs. »

Entretien avec l'historien **Joël Pouthas**

Cahiers de Science & Vie : Le conflit entre Israël et l'Iran nous le rappelle, nous vivons à l'ère de l'atome. Comment cette idée, née dans la Grèce antique, est-elle devenue le socle de la technologie contemporaine – de la bombe nucléaire à nos téléphones ?

Joël Pouthas : Je tiens d'abord à souligner qu'en histoire, et particulièrement en histoire des sciences, il faut éviter de projeter nos conceptions actuelles sur des périodes éloignées dans le temps et l'espace. L'atome scientifique d'aujourd'hui s'est essentiellement construit aux XIX^e^ et XX^e^ siècles et n'a rien en commun avec l'atome philosophique des Grecs. Quant au grand public, l'atome fit une irruption brutale avec Hiroshima le 6 août 1945. Le jour même, Harry Truman, président des États-Unis, révèle lors d'une allocution l'existence de la bombe, dans une stratégie de peur soigneusement préparée pour accélérer la fin de la guerre avec le Japon. En lisant la presse mondiale de l'époque, on mesure à quel point la surprise fut totale. Tous les journalistes ou presque ignoraient l'existence de cette bombe dite atomique – bien qu'il s'agisse d'une bombe nucléaire, car exploitant l'énergie du noyau atomique. Dans la conscience collective, l'atome va continuer à être perçu comme extrêmement dangereux avec les menaces récurrentes de guerre nucléaire. Les premiers réacteurs nucléaires ont été construits à des fins militaires pour la fabrication du plutonium des bombes. Les réacteurs civils opérationnels et dédiés à la production d'électricité apparaissent au milieu des années 1950. Des applications grand public émergent, comme celle du récepteur radio à transistors : il doit son existence aux propriétés de semi-conducteur des réseaux cristallins de certains atomes, fondement du transistor découvert en 1947. Ensuite vont apparaître les circuits intégrés, puis les microprocesseurs qui peuvent contenir aujourd'hui plusieurs milliards de transistors. En définitive, bien peu de gens en ont conscience, mais bon nombre des innovations technologiques s'appuient sur la connaissance profonde des atomes !



JOËL POUTHAS, Historien des sciences et ingénieur de physique nucléaire. Retraité du CNRS/IN2P3.

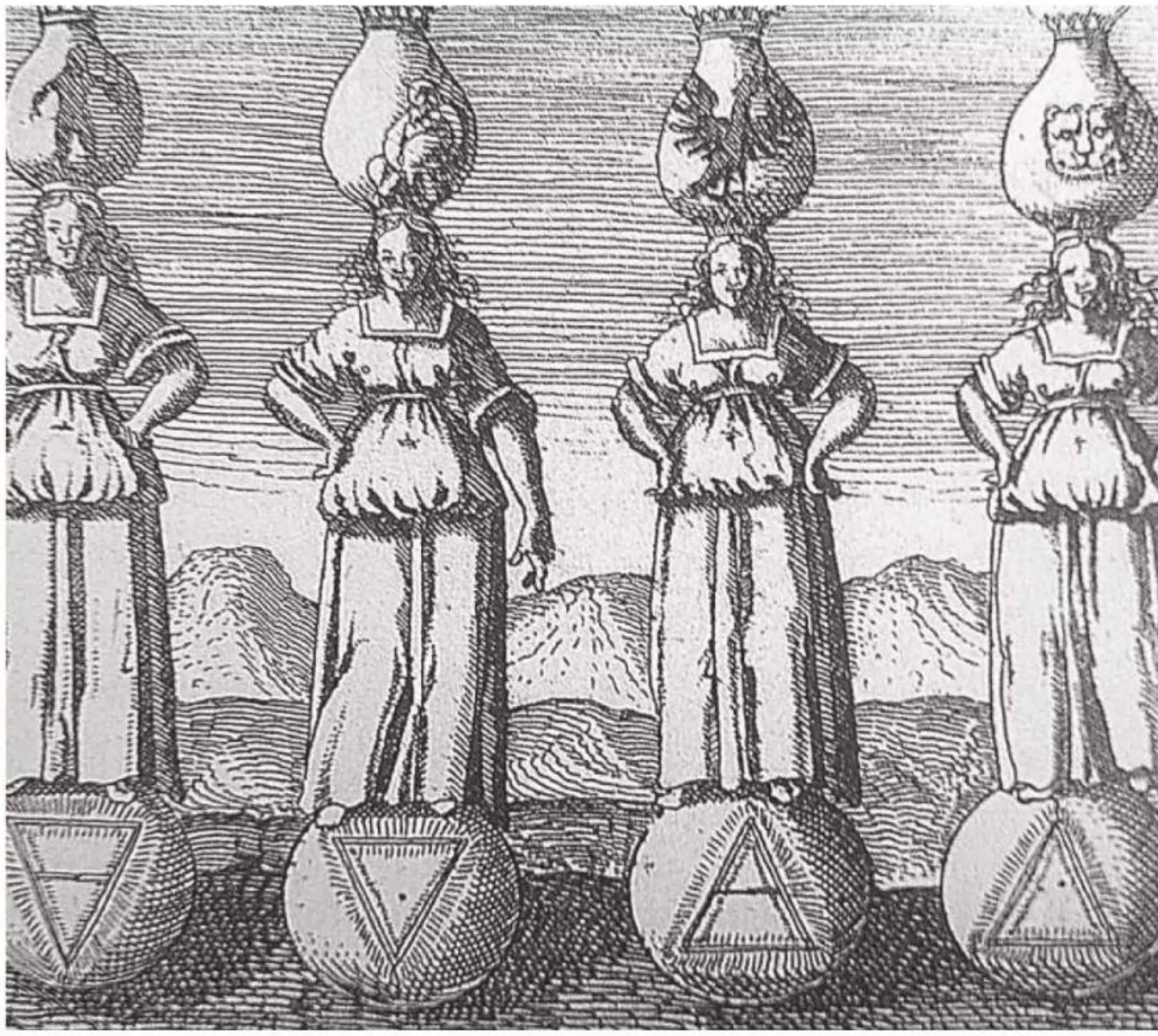
CSV : Revenons au mot atome. Que nous dit-il de la manière dont les Grecs cherchaient à penser la matière et le réel ?



Photo diffusée par les Forces de défense israéliennes (FDI) le 21 juin 2025, montrant le site nucléaire d'Ispahan et les installations de production de centrifugeuses frappées.

DR - ISRAEL DEFENSE FORCES / GPO / SIPA





CE FURENT LES IDÉES D'ARISTOTE QUI DOMINÈRENT AVEC UNE PHYSIQUE DU PLEIN ET NON DU VIDE

J.P.: Le mot atome est issu du grec ancien *« átomos »* qui signifie « insécable ». C'est la plus petite partie de matière obtenue à la fin de divisions successives. On cite généralement Leucippe, un philosophe du Ve siècle av. J.-C. et son disciple Démocrite, ou un peu plus tard Épicure. Beaucoup de textes ont disparu, mais les idées d'Épicure sur les atomes furent reprises par Lucrèce, poète latin du Ier siècle av. J.-C., dans son *De rerum natura* (De la nature des choses). On y trouve des atomes qui chutent dans le vide de manière plus ou moins parallèle, avec toutefois une inclinaison, ou *clinamen*, pouvant les dévier de leur trajectoire et les amener accidentellement à se rencontrer. Mais attention : à cette époque, l'enjeu n'était pas tant de comprendre la matière que d'établir un système matérialiste causal. L'héritage grec va revenir dans le monde médiéval avec quelques résurgences philosophiques autour des atomes. Ce furent cependant les idées d'Aristote qui dominèrent avec une physique du plein et non du vide.

CSV: Pourquoi les idées d'Aristote l'ont-elles emporté ?

J.P.: La physique d'Aristote combinant éléments – eau, terre, feu, air – et qualités – chaud, froid, humide, sec – était plus facile à saisir dans l'observation directe des phénomènes. Inversement, il est impossible de voir les atomes en raison de leur petitesse : il y a plus d'atomes dans une goutte d'eau que de gouttes d'eau dans la Manche ! La matière est un mélange complexe de différents éléments difficile à comprendre sans le recours à des méthodes expérimentales de séparation et d'analyse, pivots de la science moderne. Mais même ainsi, l'existence d'atomes est longtemps restée une hypothèse. Au XIXe siècle, de brillants chimistes français comme Jean-Baptiste Dumas ou Marcelin Berthelot y seront opposés, lui préférant le concept d'« équivalent ».

À gauche, Démocrite (par Johannes Moreelse, v. 1630), figure majeure de l'atomisme grec : pour lui, la matière est formée d'atomes indivisibles dans le vide. À droite, Les *Quatre Éléments* (Viridarium chymicum, 1624), image d'une théorie continue héritée d'Empédocle et d'Aristote, dominante au Moyen Âge. La pensée atomiste, restera marginale jusqu'à l'époque moderne.

CSV: Quelle place a donc l'atome aux débuts de la science expérimentale, dans les laboratoires de physique et de chimie du XVIIIe siècle ?

J.P.: *Le Mémoire sur la chaleur* publié par Antoine Lavoisier et Pierre Simon de Laplace en 1780 est sur ce point exemplaire. Ils s'interrogent sur la nature de la chaleur – *« fluide »* ou *« mouvements insensibles des molécules de matière »* – pour conclure que cela est sans importance pour leurs travaux en calorimétrie. Aujourd'hui, quand on a un minimum de culture scientifique, il nous est difficile d'ima-

DR - CENTRAAL MUSEUM D'UTRECHT



Transistor téléphonique au silicium diffusé, type 29, développé par Bell Laboratories au milieu du XX^e siècle. Fondé sur la maîtrise des propriétés atomiques du silicium, cet appareil marque une étape clé de la révolution électronique née de la compréhension approfondie de la structure de l'atome.

giner un monde sans atomes. Mais Lavoisier n'avait pas besoin de cette hypothèse pour faire de la chimie, pour s'intéresser à la combinaison des éléments et montrer ainsi que l'eau est un composé formé d'hydrogène et d'oxygène. Au début du XIX^e siècle, différentes lois sont proposées comme celle des proportions multiples de John Dalton pour expliquer les répartitions pondérales dans les combinaisons chimiques. Amadeo Avogadro postule que des volumes égaux de gaz différents contiennent le même nombre de ce qu'il appelle *« molécules »*. Il ne faut pas se méprendre sur les termes d'atome, molécule ou particule, qui à cette époque désignent, souvent indifféremment, de petits éléments de matière identiques : la molécule désignera peu à peu la combinaison d'éléments simples qui sont progressivement identifiés.

CSV : Plusieurs grands noms vont alors jalonner l'histoire de la théorie atomique…

J.P. : Au début du XIX^e siècle, on ne connaît qu'une vingtaine d'éléments, et les atomes restent hypothétiques, non mesurables, uniquement inférés à partir de lois pondérales. D'ailleurs à Karlsruhe en 1860, le congrès international de chimie est révélateur des oppositions entre atomistes et anti-atomistes. Cinq ans plus tard, Johann Josef Loschmidt va calculer le nombre de molécules dans un volume de gaz donné pour estimer leur taille. Il s'appuie sur des idées développées par Rudolph Clausius en thermodynamique. Bien que spéculatif, ce résultat attribue une bonne valeur à la dimension des particules de matière dans les gaz. Ce nombre de Loschmidt sera ensuite remplacé par le nombre d'Avogadro. Le terme de « poids atomique » est utilisé, mais pour quantifier les rapports pondéraux entre les éléments simples. C'est à partir de ces rapports, et en observant que les propriétés chimiques des éléments reviennent périodiquement, que Dimitri Mendeleïev propose en 1869 son remarquable tableau périodique des éléments, avec des cases vides pour les éléments restant à découvrir. Mais la théorie atomique n'est toujours pas consensuelle. En 1895, le futur prix Nobel de chimie Wilhelm Ostwald écrit ainsi : *« La tâche de la science n'est pas une recherche de forces que nous ne pouvons mesurer, agissant entre des atomes que nous ne pouvons observer. »* Lors de la réunion des scientifiques allemands qui se tient la même année à Lübeck, il s'oppose vivement à Ludwig Boltzmann, fervent défenseur de l'existence des atomes, hypothèse que ce dernier avait utilisée pour établir en 1872 l'équation qui porte encore son nom, puis pour l'interprétation statistique de l'entropie en 1877. Ce n'est finalement qu'au début du XX^e siècle que la réalité et l'utilité des atomes seront totalement admises. Le livre *Les Atomes* de Jean Perrin de 1913 rassemble treize approches méthodologiques différentes et convergentes de détermination du nombre d'Avogadro. Comme l'écrivait l'auteur : *« La théorie atomique a triomphé… mais les atomes ne sont pas ces éléments éternels et insécables »*.

LES ÉLECTRONS NE GRAVITENT PAS, MAIS SONT DANS DES ORBITALES DÉCRIVANT LEURS PROBABILITÉS DE PRÉSENCE

CSV : Niels Bohr fut l'étudiant d'Ernest Rutherford, lequel a séjourné dans le laboratoire de J.J. Thomson à Cambridge. Quels furent leurs apports respectifs à la connaissance de l'atome ?

J.P. : Joseph John Thomson travaillait sur la conduction de l'électricité dans les gaz en utilisant des tubes à rayons cathodiques. En 1897, il met en évidence l'existence d'un corpuscule d'électricité négative, l'électron, environ 2000 fois plus léger que l'atome d'hydrogène. C'est l'élément fondamental de son modèle d'atome où les électrons sont distribués de manière stable dans une sphère d'électricité positive. En 1895, Ernest Rutherford a choisi

THE GRANGER COLL NY / AURIMAGES

de rejoindre le laboratoire Cavendish de Cambridge dirigé par J. J. Thomson où il séjourne trois ans. Or, après la découverte de la radioactivité par Henri Becquerel en 1896 et les travaux de Pierre et Marie Curie sur le radium et le polonium, on s'intéresse aux particules alpha (Hélium) émises par des sources radioactives pour étudier la matière. En 1909 à Manchester, sous la direction de Rutherford, Hans Geiger et Ernest Marsden mettent ainsi en évidence une déviation à grand angle des particules alpha lorsqu'ils en bombardent différents métaux. Ce phénomène sera interprété par Rutherford en 1911 comme une diffusion par une *« charge centrale concentrée en un point »*. Dans cet article, il se garde bien de proposer un modèle planétaire d'atome, car il serait instable selon les lois de la physique classique : un électron en orbite devrait continuellement rayonner de l'énergie et finir par tomber sur le noyau. Au fameux Conseil de physique Solvay de 1913 sur *« la structure de la matière »*, un tel modèle n'est donc pas discuté. Pourtant, les deux premières parties d'un long article de Niels Bohr intitulé *Sur la constitution des atomes et des molécules* sont déjà publiées. Venu en 1912 à Manchester pour un stage de physique expérimentale, Bohr s'intéresse aux idées de Rutherford sur un éventuel atome planétaire avec un noyau massif en son centre. Pour résoudre le problème d'instabilité, il postule qu'il faut *« introduire une quantité étrangère à l'électrodynamique classique : la constante de Planck ou, comme elle a été souvent appelée, le quantum élémentaire d'action »*. Cela lui permet d'expliquer des résultats expérimentaux connus comme les spectres discontinus du rayonnement de l'atome d'hydrogène. L'atome est quantifié, mais pour bien en comprendre le caractère fondamental, il faudra les formulations de la mécanique ondulatoire et quantique au milieu des années 1920 : les électrons ne gravitent pas, mais sont dans des orbitales qui décrivent leurs probabilités de présence dans l'espace autour du noyau. En 1932, dans le laboratoire Cavendish dont Rutherford est devenu directeur, James Chadwick met en évidence l'existence du neutron. Les noyaux atomiques prennent la forme que nous leur connaissons aujourd'hui : un assemblage de protons et neutrons.

CSV : Et comment l'atome va-t-il passer de ce monde scientifique à celui de la géopolitique ?

J.P. : Le basculement sera extrêmement rapide, parce que le monde va entrer en guerre. La décennie qui précède le conflit est marquée par l'apparition des premiers accélérateurs, électrostatique à Cambridge (Royaume-Uni) et cyclotron à Berkeley (États-Unis). Les accélérateurs seront ensuite considérablement développés dans des collaborations internationales de la « Big Science ». Mais avant-guerre, à Paris, Berlin et Rome, les recherches s'appuient toujours sur des sources d'alphas ou de neutrons et sur l'analyse par des méthodes de radiochimie. C'est ainsi qu'Otto Hahn et Fritz Strassmann découvrent en 1938 un phénomène étrange, qui sera interprété immédiatement par Otto Frisch et Lise Meitner comme une fission du noyau d'uranium. Rapidement, Frédéric Joliot en France et Enrico Fermi aux États-Unis vont montrer que cette fission émet aussi d'autres neutrons. Une réaction en chaîne produisant de l'énergie serait alors possible. Des recherches, d'abord fondamentales, vont être initiées dans différents pays, et l'on peut commencer à imaginer que des bombes de très fortes puissances pourraient être construites. C'est le sens de la lettre que Léo Szilard prépare et qu'il convainc Albert Einstein d'envoyer au président Roosevelt en août 1939. Les États-Unis entreront officiellement en guerre après le bombardement de leur base de Pearl Harbour par les Japonais en décembre 1941. Dès lors, les travaux vont s'accélérer à travers le projet Manhattan, qui conduira à la réalisation d'une bombe à l'uranium 235 utilisée sur Hiroshima en août 1945 et de deux autres au plutonium 239 – l'une testée en juillet au Nouveau-Mexique, l'autre larguée en août sur Nagasaki. Le temps de la guerre froide sera ensuite celui de la course aux armements nucléaires, après l'explosion de la première bombe atomique soviétique en 1949 : les États-Unis développent la bombe H avec des essais expérimentaux dès 1951, l'URSS suit en 1955 et va plus loin en 1961, avec la « Tsar bombe » qui atteint 50 mégatonnes (plus de 3000 fois Hiroshima). Puis on s'orientera vers la miniaturisation des bombes H, qui n'en seront pas moins dangereuses, plusieurs têtes nucléaires pouvant armer un même missile. Et depuis la crise de Cuba, en 1962, la peur d'une guerre nucléaire resurgit régulièrement.

Propos reccueillis par Anne Lefèvre-Balleydier

Ernest Orlando Lawrence (1901-1958), physicien américain, inventeur du cyclotron, accélérateur de particules fondamental. Debout près du synchrocyclotron du laboratoire de radio de l'université de Californie, il fut lauréat du prix Nobel de physique (1939) et contribua à la séparation isotopique pour le projet Manhattan. Professeur à Berkeley, il impulsa la « Big Science ». Deux laboratoires portent son nom : Lawrence Livermore et Berkeley.



AKG-IMAGES / SCIENCE SOURCE

GRÈCE ANTIQUE ET INDE VÉDIQUE

PENSER L'INSÉCABLE

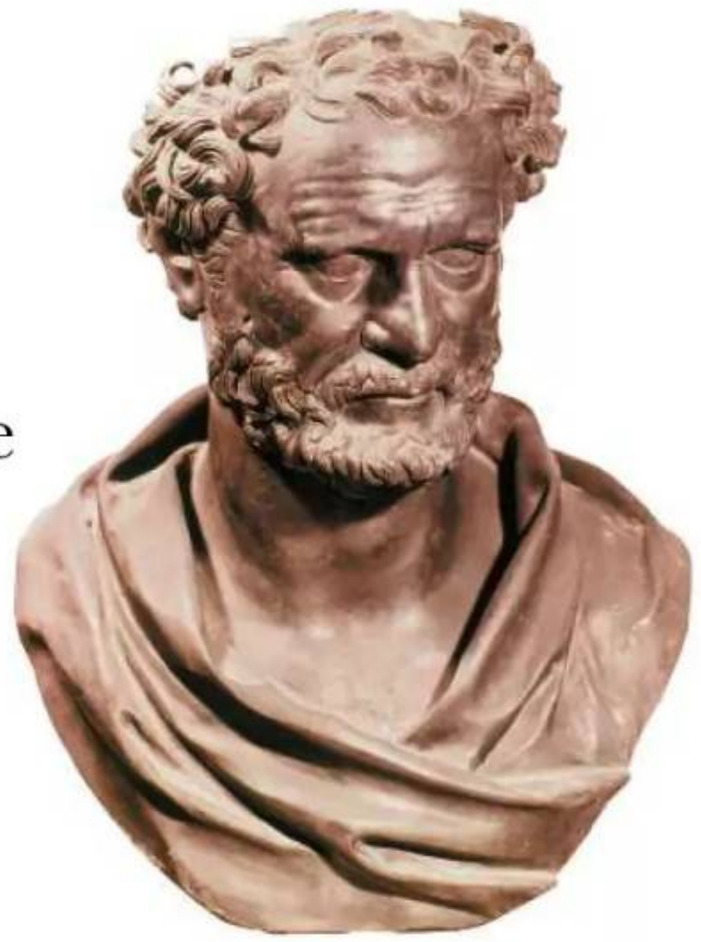
Avec leur noyau de protons et de neutrons entouré d'électrons, les atomes décrits par la physique moderne sont rentrés dans le langage courant et dans l'inconscient collectif. Moins connue est la première vie du concept d'atome, qui commence dès l'Antiquité grecque comme un postulat philosophique. Il permet de répondre à certaines questions épineuses concernant le changement, ainsi que la nature de la matière (continue ou non, une ou multiple).

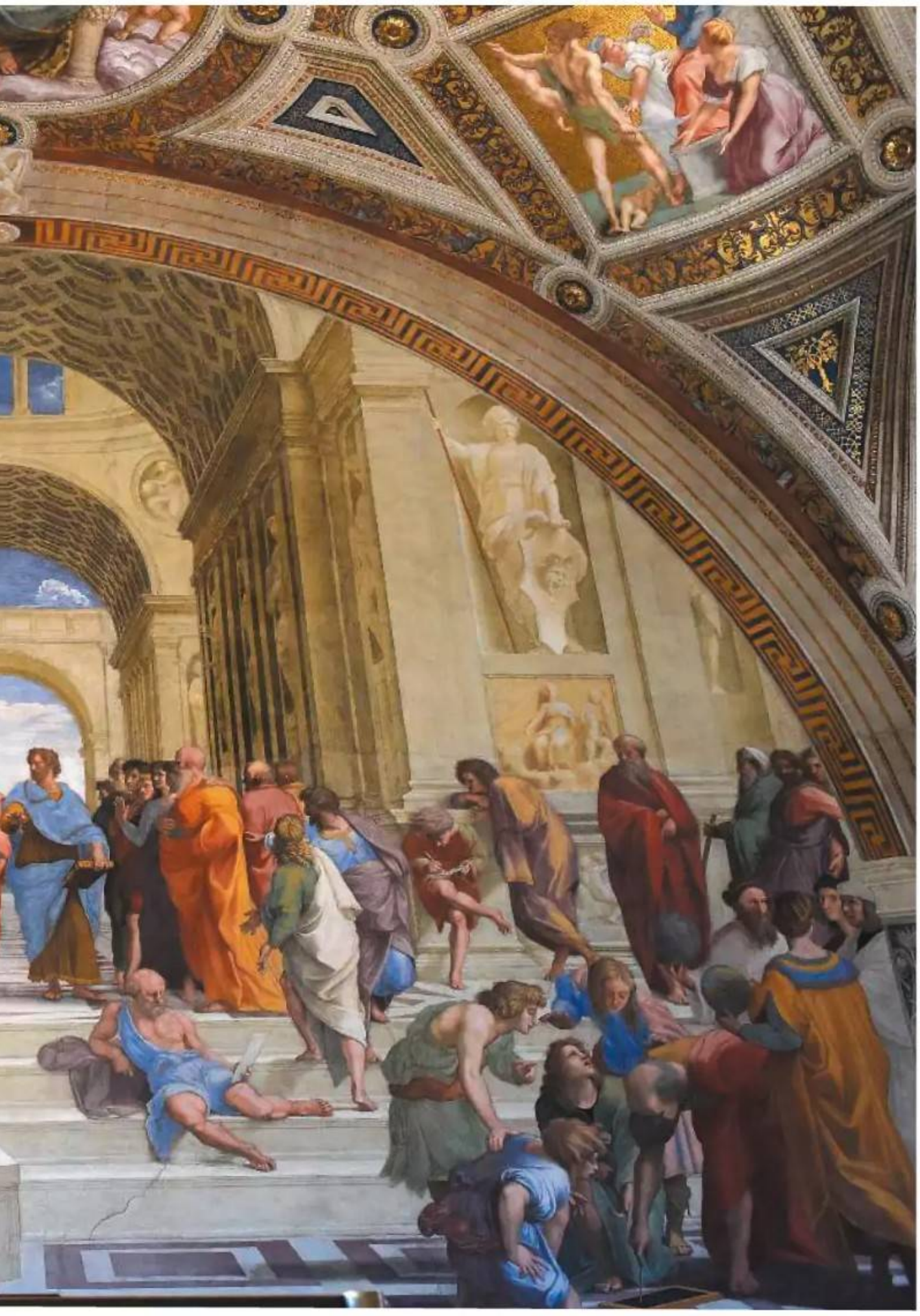
Les premiers atomistes grecs connus sont Leucippe (V^e^ siècle avant notre ère) et son disciple Démocrite d'Abdère (v. -460/-370), aujourd'hui rattachés aux « présocratiques » – des penseurs contemporains ou antérieurs à Socrate (v. -470/-399) qui ont posé les bases de la philosophie grecque. Leucippe reste mal connu, faute de sources – seule une de ses citations nous est parvenue : « *Aucune chose ne se produit fortuitement, mais toutes procèdent de la raison et de la nécessité.* » L'atomisme de Démocrite est mieux compris, ce dernier ayant bénéficié d'une certaine aura dans l'Antiquité en tant qu'adversaire commenté par certains philosophes grecs des plus illustres. « *Aristote cite beaucoup Démocrite et le critique, parce qu'il est très important*, révèle Pierre-Marie Morel, professeur d'histoire de la philosophie ancienne à l'université Paris 1 – Panthéon-Sorbonne. *Platon ne cite jamais Démocrite, mais on voit qu'il y fait également allusion.* » En l'absence de la



En haut à droite : buste en bronze hellénistique du philosophe atomiste grec Démocrite (v. 460 – v. 370 av. J.-C.).
Ci-contre : *L'École d'Athènes* (1508–1511), fresque de Raphaël (Raffaello Sanzio, dit).

Les premières intuitions d'une matière atomique émergent en Inde et en Grèce, sans qu'on puisse établir ni antériorité ni influence.
En Méditerranée, au Ve siècle av. J.-C., Démocrite imagine un monde de vide et d'atomes. Reprise par Épicure, sa théorie marquera la pensée antique jusqu'à Rome, avant de disparaître… pour mieux ressurgir à la Renaissance.





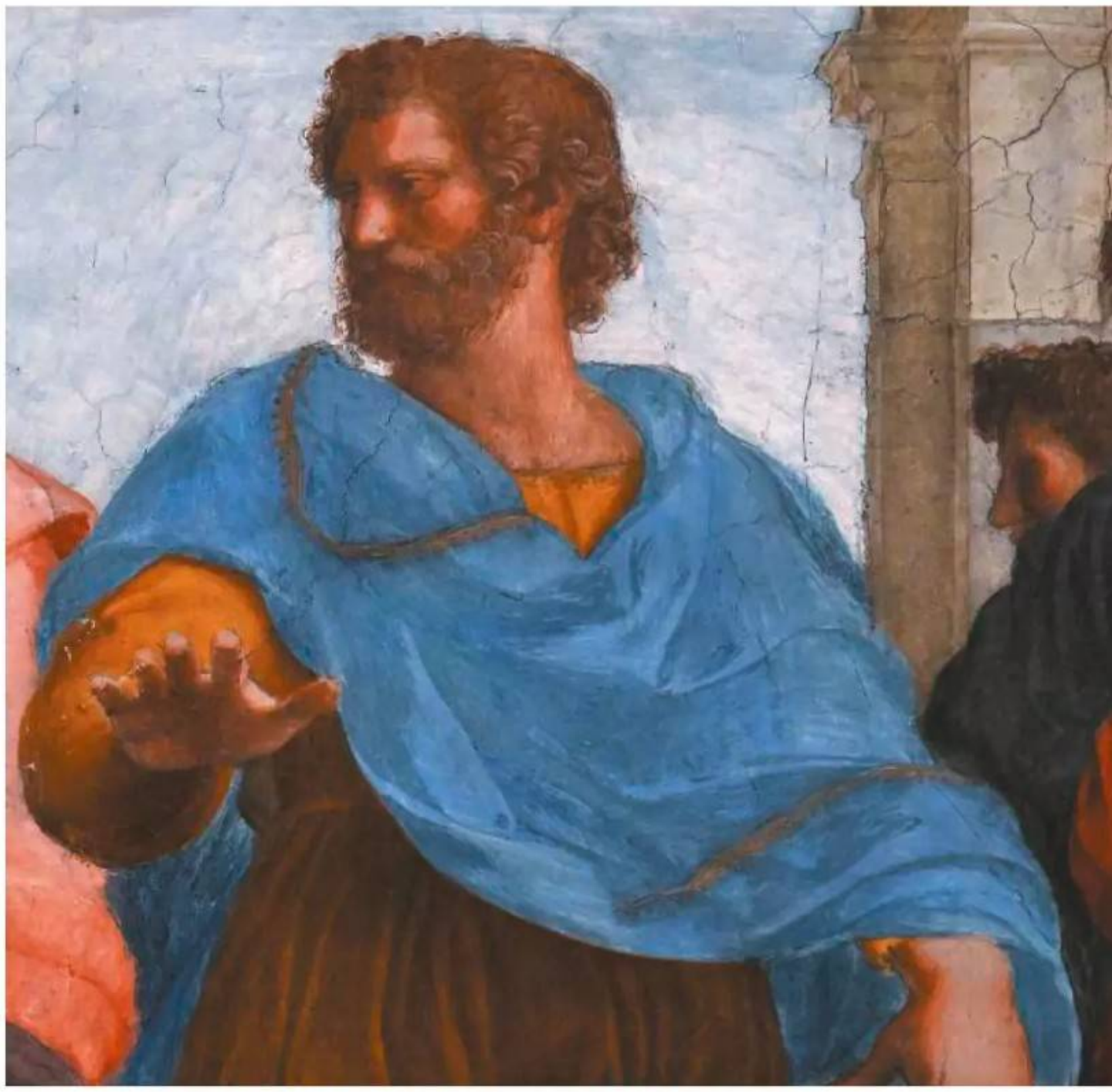
survie d'œuvres de Démocrite, pourtant connu pour avoir écrit des dizaines de traités sur une grande variété de sujets, c'est à travers quelques citations, rapportées avant tout par ses adversaires, que l'on connaît sa philosophie atomiste.

DÉMOCRITE OU EMPÉDOCLE

Le natif d'Abdère, au nord de la mer Égée, suppose que l'univers n'est constitué que de deux types de constituants : des éléments minuscules indivisibles et éternels, appelés atomes (du grec ancien *átomos*, insécable), et le vide, défini comme le non-être ou l'absence de matière. *« Convention que le doux, convention que l'amer, convention que le chaud, convention que le froid, convention que la couleur ; en réalité, il n'y a que des atomes et du vide »*, pour reprendre une de ses citations. À partir de ce présupposé, Démocrite fonde sa propre vision de l'histoire naturelle. Dans cette dernière, l'apparence ordonnée du monde actuel ne s'explique pas par des causes finales comme pour le futur Aristote (-384/-322), mais par le mouvement perpétuel des atomes, apparus dans un tourbillon à l'origine du monde. En s'entrechoquant et en se réorganisant en permanence, les atomes s'agencent par nécessité, déterminés par leurs trajectoires. Ils s'assemblent de manière temporaire en corps ordonnés, perceptibles par nos sens. Ainsi, tout ce que nous pouvons observer et percevoir à notre échelle humaine n'est qu'illusion, assemblage transitoire d'atomes éternels. *« Le monde n'est donc ordonné par aucune intelligence organisatrice ni aucune intention qui en définirait les fins. Il est le fait de la pure nécessité »*, souligne Pierre-Marie Morel dans son ouvrage *Atome et nécessité*.
D'où vient cette philosophie naturelle déterministe si novatrice ? S'il est possible que Démocrite, réputé avoir voyagé en Perse, ait rapporté de ses pérégrinations aux confins de l'Inde des concepts empruntés aux écoles atomistes du sous-continent

ERIC VANDEVILLE / AKG-IMAGES - THE GRANGER COLL NY / AURIMAGES

(voir *Kanada, l'Indien qui mange les atomes*, p. 31), rien ne permet de l'affirmer. Quoi qu'il en soit, son atomisme s'inscrit dans les grands débats intellectuels grecs de son temps, qui opposent différents penseurs présocratiques. Plus précisément, l'atomisme des origines semble faire écho à la conception du monde de Parménide (fin du VI^e^ siècle/milieu du V^e^ siècle). Pour ce dernier, la réalité forme une unité fondamentale éternelle, qui n'admet pas de division, pas de changement et pas de vide. Dès lors, dans cet univers plein et uniforme, le changement et le mouvement sont impossibles et ne sont qu'apparents. Mais, dans ce Un, comment expliquer notre perception de différents phénomènes ? En réaction à ce monisme – une doctrine où le monde n'est constitué que d'une substance –, d'autres philosophies, dont l'atomisme fait partie, proposent des systèmes de pensée pluralistes (avec plusieurs substances) pour expliquer les changements et les mouvements observables dans la vie quotidienne. *« L'atomisme, c'est d'abord une manière de rendre compte du mouvement. On peut le concevoir si on se représente la réalité cachée comme une infinité de corpuscules qui se déplacent dans le vide*, détaille Pierre-Marie Morel. *Du même coup, on explique les phénomènes observables empiriquement : la croissance et la génération des êtres vivants, les phénomènes géologiques, etc. »*

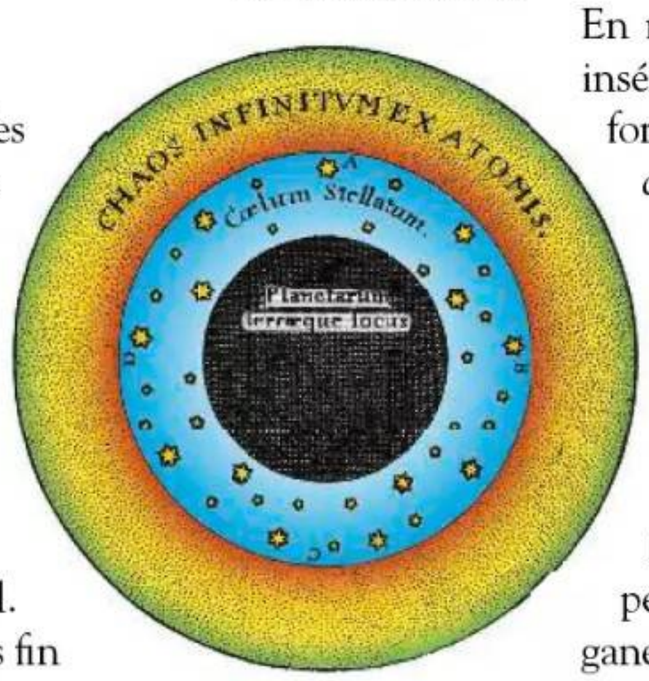


Les atomistes ne sont pas les seuls à répondre à la doctrine de Parménide. Empédocle (v. -494/-444), penseur et poète grec d'Agrigente, développe la théorie des quatre éléments peu avant l'atomisme de Démocrite. Pour lui, toutes les structures du monde sont composées dans des proportions variables de quatre « racines », ou éléments. Ce sont les fameux air, eau, terre, et feu, qui se meuvent sous l'effet de deux forces opposées, l'Amour (qui tend à rassembler les éléments vers l'Un) et la Haine (qui les divise et crée le multiple). Éléments et forces sont éternels. En imposant cycliquement la réunion et la séparation des éléments, les forces expliquent l'apparent paradoxe de l'évolution du monde, censé être éternel et immuable.

ATOMES RONDS ET LISSES, ATOMES HÉRISSÉS

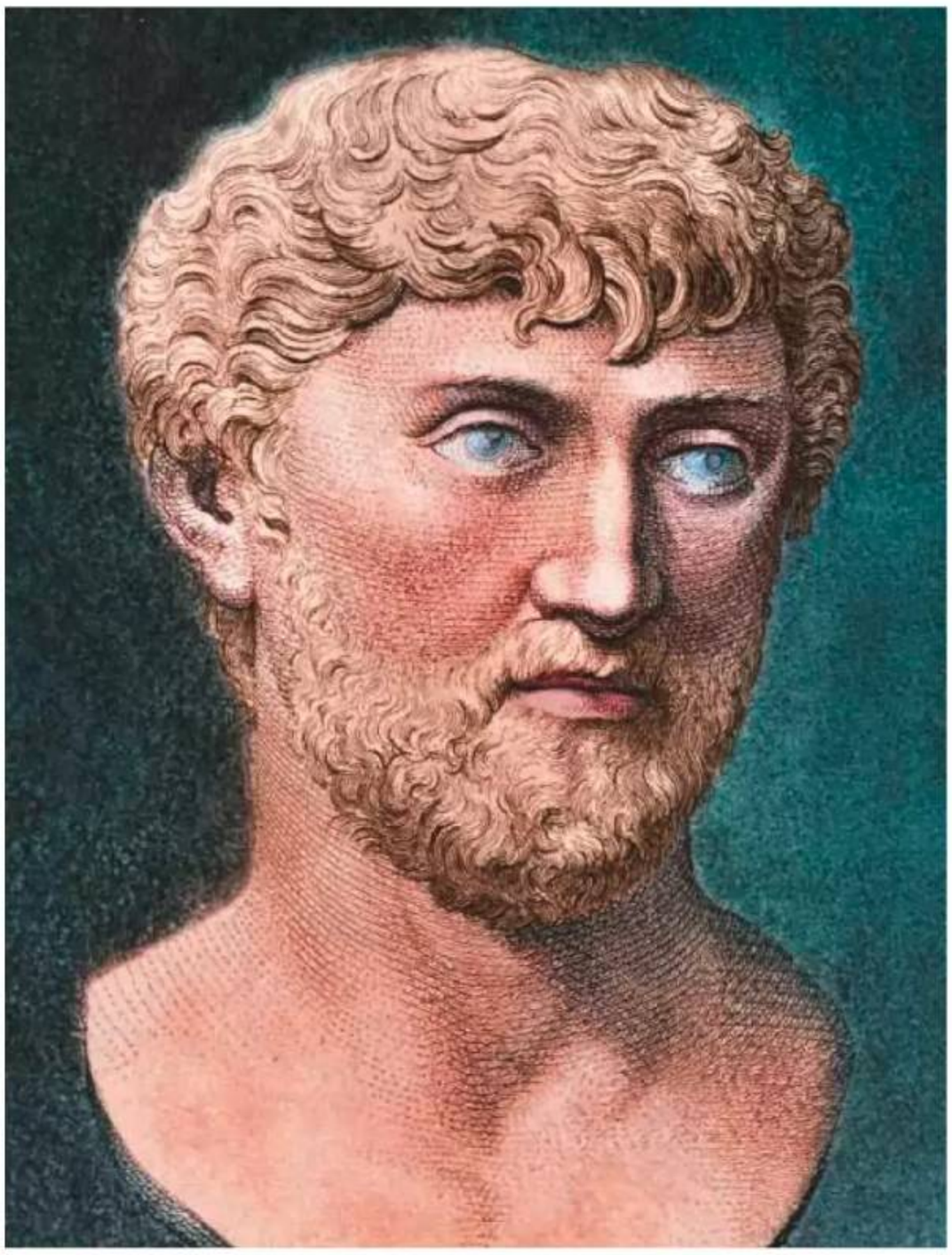
Mais, pour les atomistes, cette théorie des éléments fait fausse route en considérant que la matière est de nature continue, c'est-à-dire divisible « à l'infini ». Les atomistes introduisent l'idée novatrice que la matière est discontinue : elle est composée d'éléments constitutifs insécables, les atomes, séparés par du vide. En effet, pour Démocrite, considérer que la matière est continue est paradoxal. Selon lui, pouvoir diviser la matière sans fin signifie qu'elle n'a pas de constituants ultimes (comme chaque « plus petite particule » peut être divisée en particules encore plus petites), et donc *in fine* qu'elle n'existe pas, ce qui est absurde. Pour autant, Démocrite ne rejette pas en bloc la théorie des quatre éléments. *« Les atomistes grecs considèrent que les physiciens qui font appel aux éléments comme Empédocle se situent à un niveau d'explication de la matière qui n'est pas le niveau ultime*, analyse Pierre-Marie Morel. *Pour eux, il faut se placer au niveau des atomes et rendre compte des phénomènes en termes avant tout quantitatifs, en se fondant sur le nombre, la forme et le mouvement des atomes, et pas en termes qualitatifs, comme dans la physique des éléments. »* Par exemple, pour Démocrite, le feu est composé d'atomes de forme sphérique, plus mobiles.

Gravure du XVII^e^ siècle représentant la vision atomiste de l'univers formulée par le philosophe grec Démocrite (v. 460–370 av. J.-C.). Publiée en 1675, elle montre trois régions concentriques : au centre, la Terre et les planètes ; autour, les cieux étoilés ; à la périphérie, un chaos infini composé d'atomes.



En nombre infini, les atomes de Démocrite sont insécables et prennent une très grande variété de formes. *« Tous les solides sont envisageables pour décrire les formes possibles des atomes : des pyramides, des cylindres, des cônes, etc. »*, précise Pierre-Marie Morel. La théorie atomiste postule que les atomes, qui ne disposent pas de qualité intrinsèque outre leur forme, peuvent se lier temporairement les uns aux autres grâce à de petits crochets à leur surface, ou se repousser lors de collisions. La surface des objets s'érode et perd des films d'atomes, que perçoivent nos organes sensoriels. L'interaction de ces atomes arrachés

ERIC VANDEVILLE / AKG-IMAGES - AKG / SCIENCE PHOTO LIBRARY





aux objets avec nos propres atomes est à l'origine de nos sensations, et des différentes qualités que l'on attribue aux objets (le doux, l'amer, la couleur, etc.). Comme l'illustrera plus tard Lucrèce (v. -98/-55), un atomiste romain, *« quand elles peuvent toucher agréablement nos sens, les choses sont formées d'atomes ronds et lisses ; mais quand elles nous semblent âpres et amères, elles sont formées d'un tissu d'atomes plus hérissés »*.

Enfin, réduire le réel à des atomes se mouvant dans le vide va bien au-delà de la simple description du monde observable. *« L'atomisme n'est pas seulement une physique au sens où on l'entend aujourd'hui : c'est aussi une éthique et une théorie de la connaissance, qui expliquent les phénomènes par des causes naturelles en suivant une démarche rationnelle*, complète Pierre-Marie Morel. *C'est une philosophie de la rationalité confiante. Tout en connaissant ses limites, on considère que l'explication réelle des phénomènes passe par la raison et pas par la magie, le mystère ou l'irrationnel. »*

Si cet atomisme abdéritain (du nom de la cité natale de Démocrite) est bien connu de ses contemporains et de ses successeurs, il ne rencontre pas un franc succès. *« En ce qui concerne la Grèce de la période classique, aux Ve et IVe siècles avant notre ère, ce n'est manifestement pas une philosophie dominante*, explique Pierre-Marie Morel. *On n'est même pas sûr qu'il y ait eu une école structurée autour de Démocrite. Les écoles qui vont s'imposer à cette époque sont l'Académie platonicienne et le Lycée aristotélicien. »*

À gauche et à droite, détails de *L'École d'Athènes* de Raphaël : à gauche, Aristote (384-322 av. J.-C.), qui s'oppose à Démocrite en niant le vide et les atomes indivisibles ; à droite, Épicure (342-270 av. J.-C.), qui reprend la théorie atomiste en y associant le plaisir comme but de la vie. Au centre, portrait de Lucrèce (v. 98 – v. 55 av. J.-C.), poète et philosophe romain, popularisateur de l'atomisme grec dans *De rerum natura* (De la nature des choses).

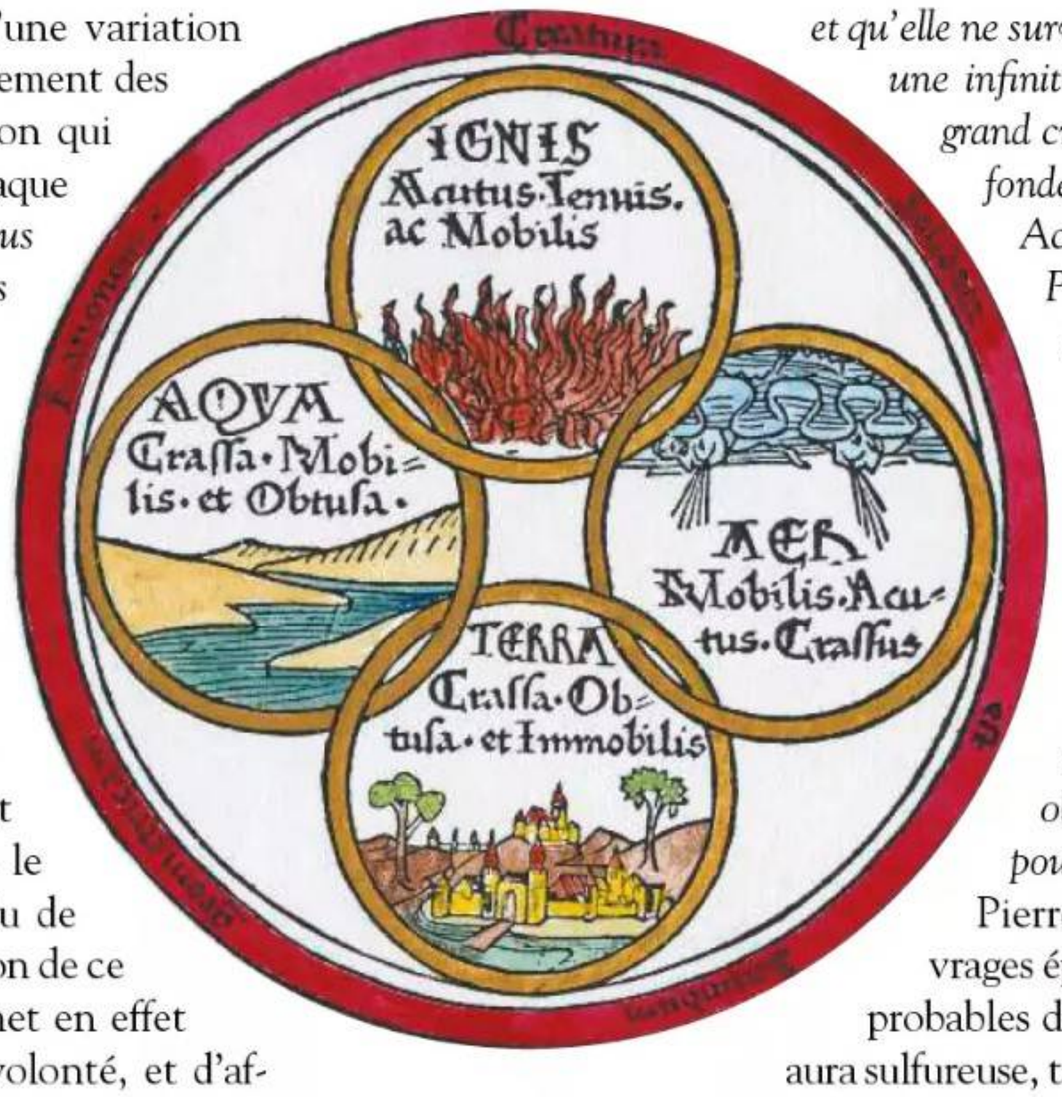
Face à ces deux poids lourds, et notamment en réaction aux objections d'Aristote, l'atomisme évolue avec Épicure (v. -342/-270). Né à la fin de la période classique et contemporain d'Aristote, Épicure n'a pas été l'élève direct de Démocrite, mais il est influencé par sa pensée, qu'il modifie sur certains points pour répondre aux critiques aristotéliciennes. Par exemple, Épicure précise que les atomes, physiquement indivisibles, sont pourtant constitués de parties distinctes. La raison de cette précision ? *« Dans la physique d'Aristote, si l'on imagine le franchissement d'un seuil par un atome, il y aura d'abord un huitième de l'atome qui passera le seuil, puis un quart, puis la moitié, etc.*, détaille Pierre-Marie Morel. *Cela oblige à concevoir l'atome comme constitué de parties géométriques, même s'il est physiquement indivisible. »*

LE CLINAMEN ÉPICURIEN

Ensuite, les atomes épicuriens se déplacent à la même vitesse dans le vide quel que soit leur poids, et ce poids entraîne l'atome dans son mouvement originel à choir vers le bas. En comparaison, *« Démocrite conçoit le mouvement originel des atomes comme un "éclaboussement en tous sens", qui n'est initialement déterminé par aucune direction préférentielle »*, souligne Pierre-Marie Morel dans l'ouvrage précité. Épicure introduit enfin le concept de *parenklisis*, qui sera plus tard traduit en latin et transmis dans l'histoire

AKG-IMAGES / SCIENCE SOURCE - ERIC VANDEVILLE / AKG-IMAGES

comme le *clinamen*. Il s'agit d'une variation infime et imprévisible du mouvement des atomes, une sorte de déclinaison qui individualise la trajectoire de chaque atome. « *Si les atomes tombaient tous vers le bas selon des trajectoires parallèles à la même vitesse, ils ne se rencontreraient jamais et il n'y aurait pas d'agrégats, de corps, de mondes*, remarque Pierre-Marie Morel. *Or il y en a, donc cela oblige à supposer que dans sa trajectoire l'atome dévie légèrement, ce qui lui permet de rencontrer d'autres atomes.* » Ce concept autorise aussi, d'un point de vue moral, à rompre avec le perturbant déterminisme absolu de l'école abdéritaine. L'introduction de ce degré de liberté atomique permet en effet aux épicuriens d'expliquer la volonté, et d'affirmer qu'il est possible d'agir librement.



Les quatre éléments d'Empédocle : la terre, l'air, le feu et l'eau (gravure sur bois en couleurs tirés d'une édition de 1472 du *De rerum natura* de Lucrèce)

LE PLAISIR ATOMIQUE

À partir de cette base physique, Épicure élabore un système moral singulier, fondé sur le plaisir. L'âme est constituée d'atomes très fins distribués dans tout le corps et qui sont à l'origine de nos sensations de douleur et de plaisir, étalons respectifs du mal et du bien. « *Notre conduite morale doit être réglée par référence au plaisir, puisqu'il nous indique la conduite la plus appropriée pour nous et notre entourage* », récapitule Pierre-Marie Morel. Connue sous le nom d'épicurisme, cette nouvelle mouture de l'atomisme atteint son apogée quelques siècles plus tard dans le monde romain, où il devient une école philosophique de premier plan du II^e^ siècle avant notre ère au I^er^ siècle. « *Le contexte romain du I^er^ siècle avant notre ère, avec des épicuriens comme Lucrèce (v. -98/v. -55) et Philodème (v. -110/v. -40), voit une confrontation très forte d'une part entre l'atomisme et le stoïcisme, et d'autre part entre l'atomisme et la Nouvelle Académie, c'est-à-dire les héritiers de l'Académie platonicienne* », synthétise Pierre-Marie Morel. Membre fameux de cette Nouvelle Académie, Cicéron (-106/-43) s'offusque du succès de l'épicurisme, le décrivant comme une philosophie populaire scandaleuse qui s'est répandue dans toute l'Italie et à travers toutes les classes sociales.

Malgré sa forte influence dans la philosophie des débuts de l'Empire romain, l'atomisme épicurien perd progressivement en importance jusqu'à finir complètement discrédité. « *Les critiques éthiques vont jouer un grand rôle dans la marginalisation de l'épicurisme, et je pense qu'il y a eu une convergence de ses adversaires sur ce point*, avance Pierre-Marie Morel. *L'atomisme épicurien implique que l'âme est corporelle et qu'elle ne survit pas à la mort du corps, qu'il y a une infinité de mondes, qu'il n'y a pas de grand créateur, que la conduite morale se fonde sur le plaisir, etc. La Nouvelle Académie, les stoïciens et plus tard les Pères de l'Église vont donc s'acharner contre lui, ce qui entraîne sa marginalisation.* » Par la caricature qu'en font ses détracteurs, l'épicurisme se confond dès lors avec une recherche effrénée et superficielle du plaisir corporel – à mille lieues de son éthique réelle, « *extrêmement subtile et qui oblige à renoncer à certains plaisirs pour en privilégier d'autres* », note Pierre-Marie Morel. Nombre d'ouvrages épicuriens disparaissent, victimes probables d'un manque d'intérêt et de leur aura sulfureuse, tandis que la physique qualitative des éléments triomphe jusqu'à l'ère moderne.

Pour autant, l'héritage de l'atomisme grec n'est pas mort. Même s'il sert avant tout d'épouvantail idéologique, l'épicurisme continue d'être commenté et étudié tout au long du Moyen Âge dans les traditions latine, musulmane et rabbinique. La pensée atomiste grecque est même adoptée dans une version revisitée par des philosophes arabes adeptes du *kalam*. Basée sur la recherche rationnelle de la vérité, cette forme de théologie musulmane se développe à partir du VIII^e^ siècle. De son côté, la scolastique du Moyen Âge européen est influencée par la redécouverte des épicuriens antiques, puis par les grands penseurs atomistes musulmans, à l'image d'Al-Ghazali (1058/1111) (voir *Al-Ghazali contre Aristote*, p. 37). Il faudra attendre le XVII^e^ siècle pour voir la première grande réhabilitation d'Épicure en Occident, par Pierre Gassendi (1592/1655). Ce savant français réintroduit la notion d'atomes et de vide dans sa physique. Enfin, en 1803, le physicien britannique John Dalton (1766/1844) énonce sa théorie atomique, qui fait définitivement rentrer l'atome dans la physique moderne. D'abord considéré comme une unité de matière indivisible, compacte et immuable, l'atome est aujourd'hui reconnu comme une structure divisible, instable, et composée de particules plus élémentaires encore. « *Les atomes de la physique actuelle ne ressemblent que par leur nom aux atomes de Démocrite*, conclut Pierre-Marie Morel. *Mais je pense qu'il y a une forme de continuité avec l'intuition philosophique fondamentale de l'atomisme : rendre compte rationnellement de la matière et de ses changements d'état, à partir de constituants discontinus définis en termes quantitatifs.* »

François Mallordy

À LIRE

Atome et nécessité. Démocrite, Épicure, Lucrèce, Pierre-Marie Morel, Presses Universitaires de France (2013).

Démocrite. Fragments et témoignages, Pierre-Marie Morel, Vrin (2020).

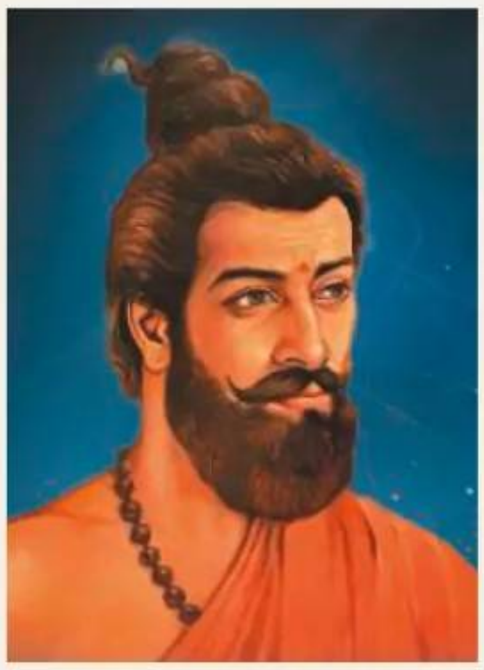
Le Plaisir et la nécessité. Philosophie naturelle et anthropologie chez Démocrite et Épicure, Pierre-Marie Morel, Vrin (2021).

THE GRANGER COLL NY / AURIMAGES

KANĀDA, L'INDIEN QUI MANGE LES ATOMES

L'atomisme du *Vaiśeṣika Sūtra*, attribué à Kanāda entre le VI^e^ et le II^e^ siècle avant notre ère, est l'un des plus anciens systèmes de physique, avec celui du Grec Démocrite, reposant sur l'idée d'unités ultimes de matière.

Dans la poussière d'un temple, un homme s'accroupit, ramasse un grain de riz tombé au sol et le porte à ses lèvres avec un soin cérémonieux. Geste modeste, presque imperceptible, mais chargé d'une attention radicale à l'infime. Il évoque l'esprit de *Kaṇāda* – « celui qui mange les atomes » – surnom donné au sage indien, non pour son appétit, mais pour son effort de penser la matière jusque dans ses composants ultimes. On lui attribue la rédaction du *Vaiśeṣika Sūtra*, entre le VI^e^ et le II^e^ siècle avant notre ère – une datation encore débattue, tant le texte a connu de strates et de réécritures. Ce traité inaugure un système que l'on peut qualifier de protophysique philosophique : l'univers y est conçu comme un assemblage d'unités indivisibles, les *paramāṇu*.



Portrait contemporain de Kanāda, tel qu'on le représente dans les manuels scolaires indiens.

Cet atomisme s'inscrit dans un paysage où six grandes écoles – les *darśana* – proposent des visions concurrentes du réel. Étroitement lié au *Nyāya*, école de logique et d'épistémologie, le *Vaiśeṣika* développe une ontologie non théiste, où les dieux, s'ils existent, n'interviennent pas dans l'explication des phénomènes. Tout ce qui est, selon lui, se compose d'éléments ultimes, éternels, qualitativement distincts et soumis à des lois constantes.

Ce système repose sur deux sources de connaissance : la perception directe et l'inférence. Certaines réalités, invisibles, sont accessibles par déduction. Pour expliquer les effets sans cause manifeste, le texte introduit le concept d'*adṛṣṭa* (« l'invisible ») : une force latente, principe causal discret, qui relie des effets à des causes hors de portée des sens.



Les commentaires anciens précisent que certains phénomènes n'apparaissent qu'en lien avec la conscience qui les saisit. Ainsi, la dualité – le fait qu'il y ait deux objets – ne devient perceptible que « par une cognition combinative » issue de deux unités distinctes (*Praśastapādabhāṣya*, 131). Comme le souligne le philosophe Jonardon Ganeri, cette articulation entre un atomisme rigoureux et une dépendance cognitive fait du *Vaiśeṣika* un réalisme original, l'un des premiers systèmes philosophiques pleinement structurés, et singulièrement novateurs.

Ce savoir, transmis oralement, n'était pas destiné à tous. Il exigeait des esprits formés, jugés aptes à recevoir un enseignement qui engageait autant l'intellect que l'éthique. Comprendre la matière sans transformation intérieure revenait, pour les maîtres, à manier un pouvoir sans conscience. Si l'Inde ancienne n'a pas – à notre connaissance – conçu de technologie nucléaire, elle n'en avait pas moins pressenti qu'un savoir soustrait à son cadre initiatique – éthique, rituel, intérieur – pouvait devenir destructeur.

En citant la *Bhagavad Gītā* – *« Je suis devenu la Mort, le destructeur des mondes »* – Oppenheimer suit une sagesse : celle du détachement dans l'action. Mais il en méconnaît une autre, plus ancienne encore : celle qui réserve les secrets du réel aux seuls initiés. Arraché à son silence sacré, l'atome devient bombe.

J.N.

La doctrine atomiste est aussi attestée dans la religion jaïne dès les premiers textes sacrés, comme le Pañcāstikāya-sūtra, aux III^e^–II^e^ siècles av. J.-C. (Pārśvanātha cosmique, v. 1525).

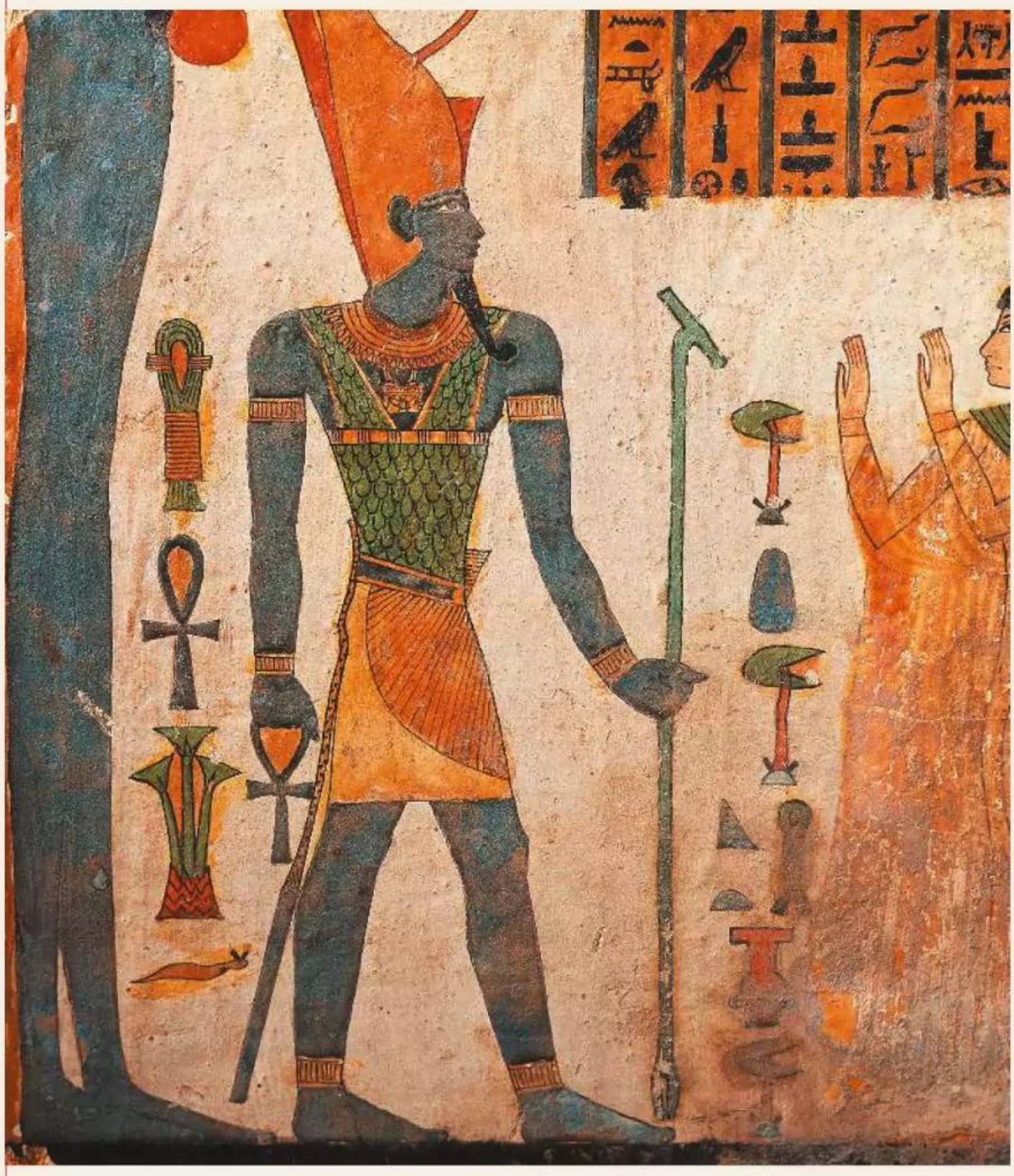
AURIMAGES - ARTOKOLORO / QUINT LOX / AURIMAGES

INTUITIONS PREMIÈRES

Par Fabienne Lemarchand et Julien Nénault

Bien avant que la Grèce ou l'Inde antique ne formulent l'hypothèse d'unités ultimes indivisibles, les grandes civilisations qui les précédaient avaient, chacune à leur manière, tenté de percer les mystères de la matière.

En Mésopotamie, en Égypte, en Mésoamérique ou en Chine, l'homme s'est efforcé de décrire la trame invisible du monde, d'en comprendre les transformations, les équilibres, les dynamiques profondes. Diverses conceptions de la matière prévalaient, inscrites dans une vision holistique où le divin et le mythe tenaient un rôle central. À travers elles se dessine déjà une idée structurante : celle d'un monde régi par des lois d'organisation (cosmique), par des agents actifs (surnaturels), par des relations fondamentales (mythiques) entre les principes du réel.

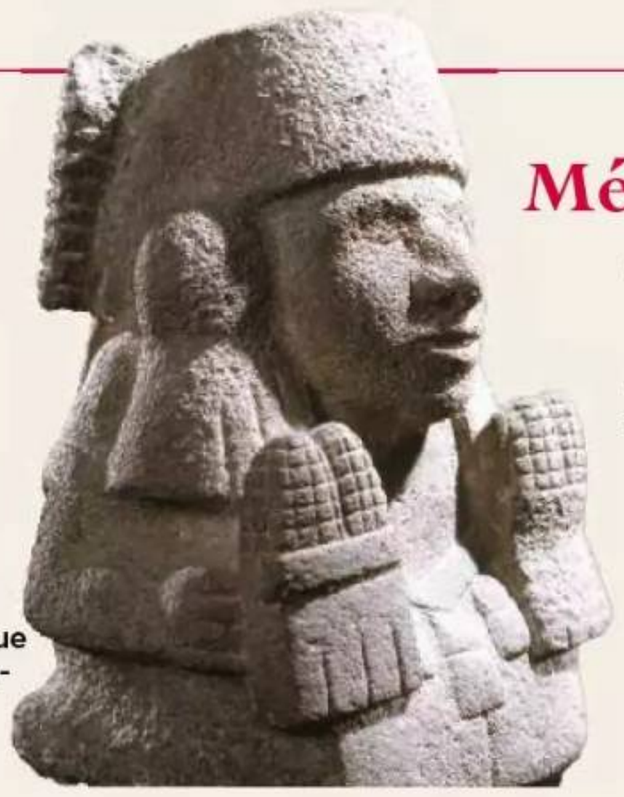


COLLECTION DAGLI ORTI / MUSÉE DU LOUVRE PARIS / GIANNI DAGLI ORTI / AURIMAGES

Égypte

En Égypte ancienne, tout commence avec *Noun*, sorte d'océan primordial indifférencié, obscur et chaotique, d'où émerge un îlot de terre sur lequel apparaît le démiurge *Atoum* (toute ressemblance avec un certain mot grec est purement fortuite…), ancêtre de tous les dieux. Ceux-ci animent et gouvernent l'univers, les hommes, la matière, la nature et ses phénomènes cycliques, etc. Le monde doit sa survie à la *Maât*, fondement de l'harmonie universelle, auquel tous doivent se conformer pour prévenir le retour du chaos. Pas d'analyse atomistique, mais une forte insistance sur un ordre fondamental, soumis à des lois immuables, et soutenu par une architecture invisible garantissant son équilibre.

Atoum, dieu créateur héliopolitain, parfois considéré comme l'ancêtre des dieux. Il incarne l'univers à l'état originel et donne naissance aux premiers êtres divins par autoengendrement. 22e dynastie (v. 945–715 av. J.-C.).



Figurine en céramique zapotèque représentant le dieu du maïs.

Mésoamérique

Pour les peuples mésoaméricains, mayas, aztèques ou autres, l'univers tout entier repose sur la dualité. Toutes choses, tous phénomènes existent comme un tout parce que des forces contraires (homme/femme, vie/mort, jour/nuit, ordre/chaos, mouvement/immobilité, etc.) sont en équilibre. Loin d'être figée, cette dualité est créatrice. Des contraires naît en effet la complémentarité. Le maïs, plante sacrée dont les dieux façonnèrent les hommes, en est le symbole vivant : il porte en lui fleurs mâles et femelles, unies pour produire le grain. Un grain qui, certes, n'a pas grand-chose d'un corpuscule élémentaire… mais dans cette pensée de la polarité féconde, ne serait-ce pas un pressentiment, végétal et mythique, que la matière s'organise selon des forces complémentaires, en interaction permanente ?

Mésopotamie

Pour les Mésopotamiens, l'univers entier est une œuvre divine ordonnée. Les hommes eux-mêmes ont été façonnés à partir d'argile pour servir les dieux fatigués de devoir travailler pour se nourrir. Rien ne se fait qu'ils n'aient décidé. Chaque créature, chaque réalité du monde, chaque élément constitutif du cosmos est assigné à une divinité particulière qui les gouverne et les anime. Les dieux assurent par leur présence surnaturelle la bonne marche du monde. Cette représentation d'un ensemble de réalités multiples, incarnées par des agents distincts, esquisse déjà l'idée d'un monde structuré en puissances agissantes – un reflet mythique lointain de ce que formuleront plus tard les atomistes.



Tablette du Dieu Soleil, bas-relief de Sippar, v. 860–850 av. J.-C., dynastie néo-babylonienne.



Pangu, l'être primordial de la mythologie chinoise, sépara le ciel et la terre en brisant l'œuf cosmique. Dynastie Song (960–1279).

Chine

La pensée chinoise, notamment à travers le taoïsme, cherche à rendre compte de la « marche » du monde plus que de sa création. Le monde matériel, les cycles naturels, comme le rythme des saisons ou la variation de la durée des jours, tout est rythmé par l'alternance de deux forces opposées, combinatoires et complémentaires, le *yin* et *yang*, en interaction constante avec les cinq phases fondamentales (*Wu Xing*) : bois, feu, terre, métal et eau. Chacun d'eux peut nourrir ou au contraire affaiblir l'autre : le bois alimente le feu, l'eau nourrit le bois, mais est absorbée par la terre, etc. Ce modèle dynamique propose une conception relationnelle de la matière, que la physique moderne reprendra à sa manière – sans tao, mais avec équations.

THE GRANGER COLL NY / AURIMAGES - AURIMAGES - BRITISH MUSEUM / AURIMAGES

DE L'ANTIQUITÉ À LA RENAISSANCE

HÉRÉTIQUES DE LA MATIÈRE, ENTRE ALCHIMIE ET SCIENCE

Dès le XV^e^ siècle, la redécouverte de textes antiques ravive l'intuition d'un univers fait de grains indivisibles. Une petite révolution, alors que science naissante et pensée magique marchent encore main dans la main.

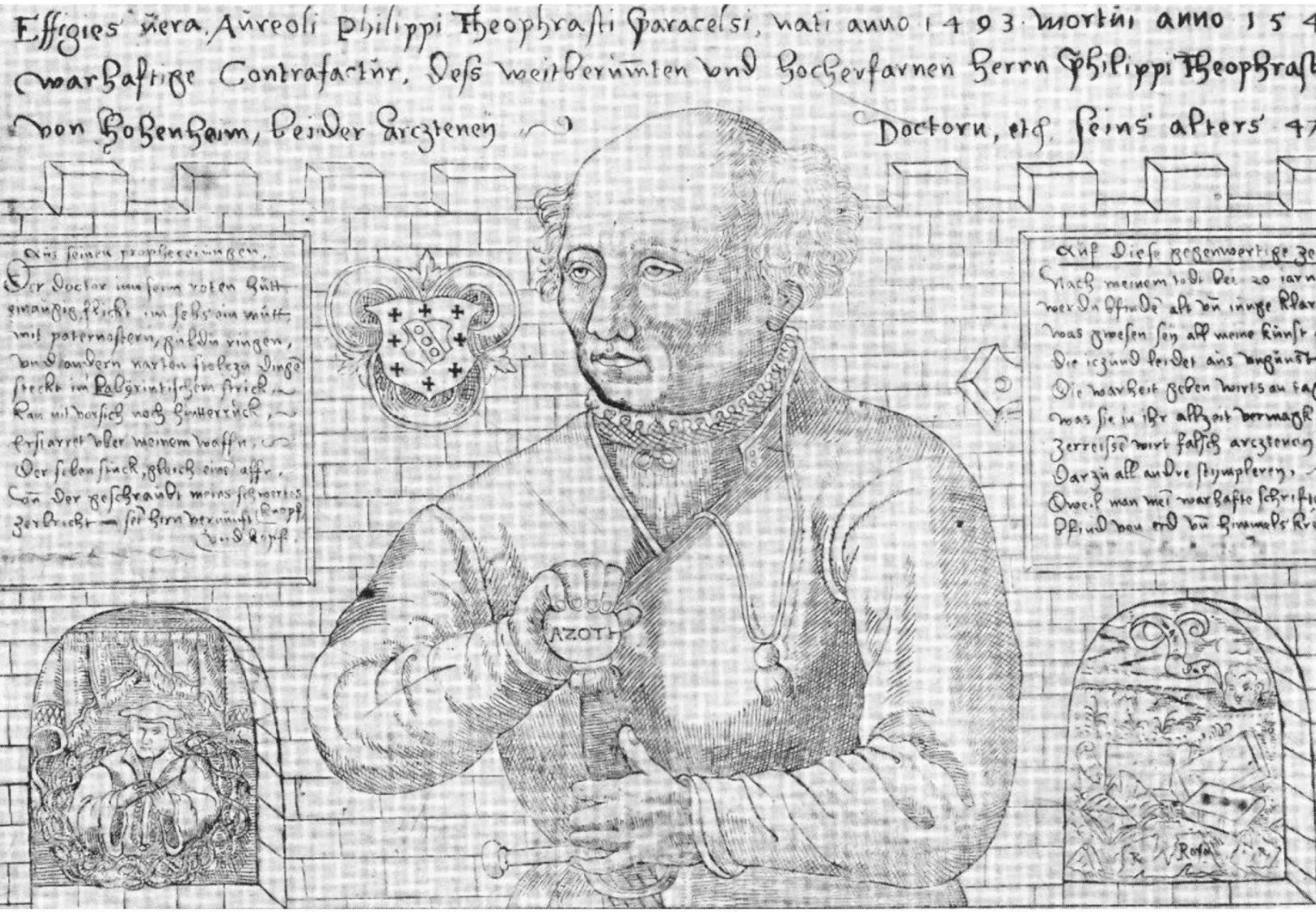
À la Renaissance, de Florence à Cracovie, le mouvement humaniste embrase les milieux intellectuels européens. À la faveur de ce tourbillon de connaissance, les textes atomistes antiques font leur retour dans les cercles érudits. Une résurgence discrète, car défier Aristote, dont la physique domine encore les universités, reste risqué. L'atome n'est pas encore une théorie scientifique : c'est une thèse sulfureuse, associée à l'athéisme, doublée d'une hérésie philosophique. L'idée n'est pourtant pas nouvelle. Deux millénaires plus tôt, vers le V^e^ siècle avant notre ère, le Grec Leucippe et son disciple Démocrite imaginaient un monde constitué de vide et d'atomes, des particules indivisibles qui s'assemblent pour former toute chose. Puis le philosophe Épicure (342-270 av. J.-C.) reprenait cette idée, avant que le poète latin Lucrèce ne la popularise dans *De rerum natura* (I^er^ siècle av. J.-C.), décrivant un univers régi par le hasard et la nécessité. Mais avec la chute de Rome, ces théories s'effacent devant le dualisme platonicien et la physique aristotélicienne, pour qui la matière est continue et régie par les quatre éléments (la terre, l'eau, l'air, le feu).



Robert Boyle (1627-1691), chimiste irlandais. Fondateur de la chimie moderne, il rejette la théorie des quatre éléments et formule la loi selon laquelle, à température constante, pression et volume d'un gaz sont inversement proportionnels.

AKG-IMAGES / SPL / SHEILA TERRY

Si l'Occident a tôt fait d'oublier les atomistes, le monde islamique, lui, préserve leur mémoire. Dès le VIII^e^ siècle, les califes abbassides de Bagdad financent la traduction des textes grecs en arabe. Des savants comme Al-Kindi (801-873), fondateur de la philosophie islamique, et les Frères de la Pureté – une société secrète d'auteurs anonymes qui, entre le début du IX^e^ siècle et la fin du X^e^ siècle, composent une encyclopédie en 52 épîtres compilant le savoir connu à l'époque – intègrent l'atomisme à leur cosmologie, tandis que le médecin Rhazès (865-925) l'évoque dans ses traités alchimiques. Cependant, *« ces idées restent marginales, car l'atomisme grec heurte la conception divine d'un monde créé ex nihilo »*, note Lawrence Principe, historien des sciences à l'Université Johns Hopkins. En Europe, Lucrèce sombre complètement dans l'oubli. Jusqu'à ce que, en janvier 1417, l'humaniste Poggio Bracciolini exhume, dans un monastère allemand, un manuscrit de *De rerum natura*. Diffusé grâce à l'imprimerie, le texte fascine autant qu'il scandalise : Lucrèce y nie l'immortalité de l'âme et décrit un monde sans dieu ! Pour Lawrence Principe, *« la redécouverte de ces écrits est une bombe à retardement intellectuelle. La théorie de l'atomisme qui y est déve-*



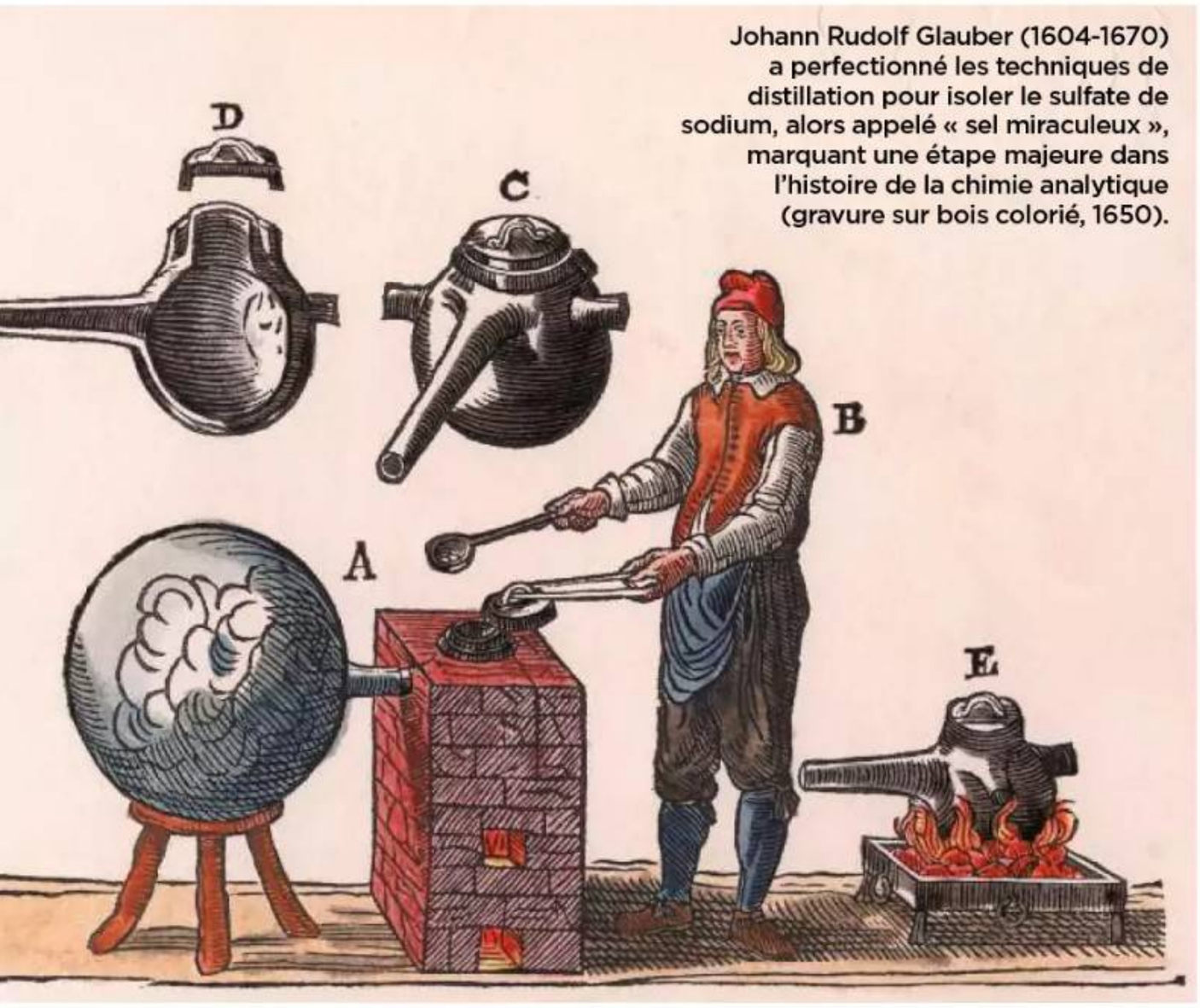
Paracelse (1493-1541), alchimiste et médecin suisse, rejette les quatre éléments d'Aristote et leur préfère trois principes : soufre (âme), mercure (esprit) et sel (corps). Expérimentant sur les métaux, il pressent l'existence de « corpuscules » invisibles. Sur la garde globulaire de son épée figure le mot « Azoth », nom alchimique du mercure et symbole du remède universel selon lui (affiche allemande, v. 1550 ; gravure de Balthazar Jenichen).

loppée ne convainc pas immédiatement, mais va lentement infuser les esprits ». À travers toute l'Europe, des penseurs de premier plan tels qu'Érasme, Montaigne et Giordano Bruno s'en inspirent, mais l'Église veille. Pour elle, l'atomisme reste suspect, car associé au matérialisme et à l'athéisme. Pourtant, il intrigue les esprits curieux, en particulier les alchimistes.

TRANSFORMER LA MATIÈRE

Dans leurs ateliers enfumés, ces derniers cherchent à percer les secrets du monde matériel. Pour eux, *« transformer le plomb en or n'est pas une quête naïve, mais une entreprise intellectuelle visant à comprendre les principes cachés gouvernant la transformation de la matière*, analyse Lawrence Principe. *Les adeptes de ces pratiques voyaient dans leurs fourneaux un microcosme des processus naturels »*. Le Suisse Paracelse (1493-1541) révolutionne la discipline en rejetant les quatre éléments d'Aristote pour les remplacer par trois principes : soufre (âme), mercure (esprit) et sel (corps). Ses expériences sur les métaux le conduisent à envisager des « corpuscules » invisibles, une intuition proche de l'atomisme. D'autres, comme le médecin anglais George Starkey, dit Eyrénée Philalèthe (1628-1665), croient en un « mercure philosophique », une substance ultime capable de *« dissoudre tous les métaux en leurs atomes primordiaux »*. Dans un ouvrage posthume publié en 1669, il décrit des expériences où l'or semble *« se réduire en une poussière si fine qu'elle traverse le verre »*. *« Les alchimistes opératifs – ceux qui manipulaient creusets et fourneaux – ont développé une "science de la matière" fondée sur l'observation tactile et visuelle*, détaille Pamela Smith, historienne des sciences à l'université Columbia.

THE GRANGER COLLECTION NY / AURIMAGES



Johann Rudolf Glauber (1604-1670) a perfectionné les techniques de distillation pour isoler le sulfate de sodium, alors appelé « sel miraculeux », marquant une étape majeure dans l'histoire de la chimie analytique (gravure sur bois colorié, 1650).



Les alchimistes, à travers leurs symboles et la quête d'une « materia prima » indestructible, ont posé les bases d'une pensée sur la divisibilité et la recomposition de la matière, préfigurant la chimie moderne (*L'Alchimie*, par Jan van der Straet Stradanus, 1570).

AKG-IMAGES - AKG-IMAGES / RABATTI & DOMINGIE

Leur conviction que la matière avait une structure discrète émergeait de la pratique, bien avant d'être théorisée. » L'Anglais Robert Boyle, souvent considéré comme le père de la chimie moderne, pousse plus loin cette idée dans *Le Chimiste sceptique* (1661). En mesurant les réactions chimiques, il défend une « philosophie corpusculaire », où la matière est composée de particules en mouvement. « *Boyle, souvent célébré comme un pionnier de la chimie mécaniste, puisait largement dans le lexique et les pratiques alchimiques*, souligne Lawrence Principe. *Sa "philosophie corpusculaire" était moins une rupture qu'une synthèse entre l'expérience des ateliers et la résurgence des atomistes antiques.* » Son contemporain Isaac Newton, mieux connu pour sa théorie de la gravitation, s'intéressera lui aussi à l'alchimie. Dans ses manuscrits secrets, publiés après sa mort, il évoque des « *particules plus petites que les pores des corps* ». « *Newton a consacré plus de trente ans à l'étude alchimique, convaincu que les textes anciens détenaient des vérités sur la structure corpusculaire de la matière*, détaille Lawrence Principe. *Ses manuscrits révèlent une quête obsessionnelle : découvrir comment des "particules subtiles" unissent et divisent les corps sous l'effet de forces invisibles.* »

Ce qui distingue les alchimistes de la Renaissance de leurs prédécesseurs, c'est l'attention portée à la quantification. L'Allemand Johann Rudolf Glauber (1604-1670) pèse ses distillats et isole le « sel miraculeux » (sulfate de sodium), tandis que Robert Boyle utilise des balances précises pour étudier la combustion. Cette rigueur, couplée à la pensée atomiste, ouvre la voie à la chimie moderne. « *Les alchimistes ont transformé l'artisanat en science en faisant de la matière un objet de mesure*, résume Pamela Smith. *Peser les réactifs n'était pas un geste banal : cela traduisait une volonté de rendre compte du principe de conservation derrière les métamorphoses apparentes – une intuition clé de l'atomisme.* » Si les creusets des alchimistes n'ont jamais produit d'or, un bien plus précieux encore en a émergé : une science nouvelle, où la matière se mesure, se pèse et se divise jusqu'à l'invisible.

Cécile Gérardin

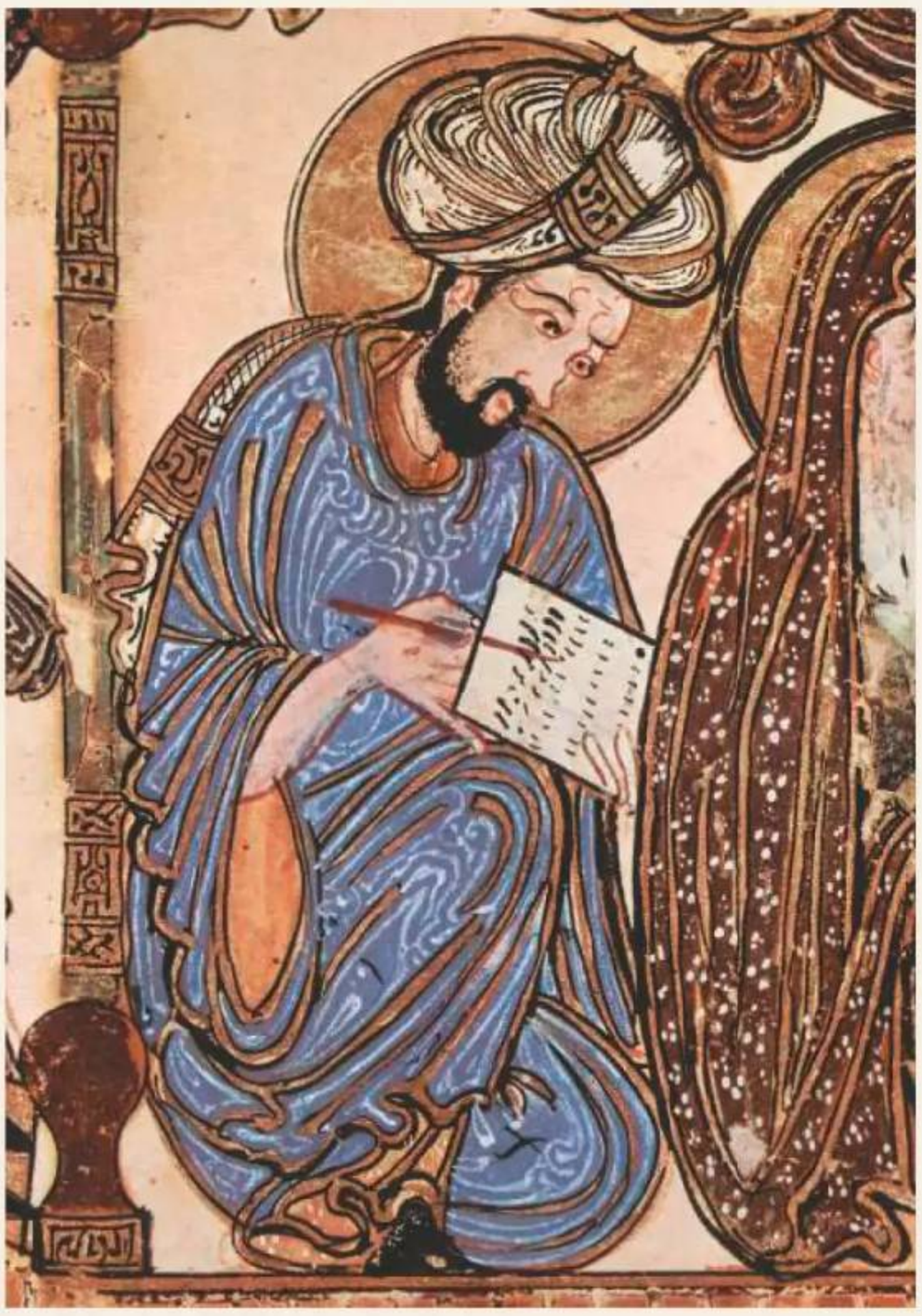
Des symboles alchimiques à la formule chimique

Les alchimistes croyaient-ils aux atomes ? Difficile de trancher. Dans leurs laboratoires, ils tentent certes d'isoler les « principes » de la matière. Mais ils décrivent ces processus comme une « division infinie »… tout en cherchant bel et bien une limite : une « *materia prima* » (matière première universelle) indestructible, dont le processus de création et de destruction est symbolisé par l'*ouroboros*, le serpent qui se mord la queue. Quant à leurs symboles – ☉ (or), ☽ (argent), ♃ (étain) –, ils remplissent une double fonction, langage codé pour les initiés et barrière contre les profanes. « *Les recettes alchimiques, avec leurs symboles hermétiques, n'étaient pas que des codes secrets*, précise Pamela Smith. *Elles structuraient une pensée complexe sur la divisibilité et la recomposition de la matière, anticipant les formules chimiques modernes.* »

AL-GHAZALI
CONTRE ARISTOTE

En défendant une cosmologie mêlant atomisme et toute-puissance de dieu, ce théologien s'attaque frontalement à Aristote. Ses travaux influenceront des siècles de pensée islamique.

Au XIe siècle, dans les madrasas de Nishapur et de Bagdad, un débat agite les cercles intellectuels : l'univers est-il éternel, comme le pense Aristote, ou créé à chaque instant par Dieu ? C'est dans ce contexte que le théologien, philosophe et mystique Abu Hamid al-Ghazali (1058-1111) va redessiner durablement les frontières du savoir légitime, déplaçant les priorités de la philosophie vers la théologie. Tout commence par une crise existentielle. À 33 ans, al-Ghazali, alors étoile montante de l'enseignement sunnite, est rongé par le doute. Dans *Erreur et délivrance*, il confie : *« J'examinais mes motivations et découvrais que je n'étais pas poussé par la seule recherche de Dieu […], mais par la soif de gloire et d'influence. »* Il abandonne tout en 1095, erre comme un ascète pendant onze ans, puis revient avec une conviction : la raison seule ne suffit pas ; comprendre le monde exige de concilier logique et révélation divine.



Les Épîtres des Frères en pureté (Ikhwân al-Safâ ; manuscrit de 1287) : 52 traités anonymes mêlant savoirs grecs et pensée musulmane, fondés sur un atomisme spiritualisé.

DES AIGUILLES SANS HORLOGE

Al-Ghazali puise dans le *kalām* – soit la recherche de principes théologiques par l'argumentation rationnelle – une arme conceptuelle pour défendre l'omnipotence divine. Il s'inscrit ainsi dans la tradition atomiste développée par les théologiens acharites. Selon eux, le cosmos n'est pas un continuum, mais une mosaïque d'« atomes » et d'« accidents » – des qualités comme la couleur ou le mouvement –, recomposés à chaque instant par Dieu. Le temps lui-même est fragmenté en instants disjoints. Al-Ghazali va un cran plus loin. Dans son univers, il n'y a même pas d'« horloge » réglée par Dieu, seulement des aiguilles apparaissant miraculeusement à la bonne place. Dans *L'Incohérence des philosophes*, il attaque Aristote et Avicenne, pour qui les causes naturelles (le feu brûle, la pierre tombe) sont autonomes, alors que pour lui, cette régularité n'est qu'une *« habitude divine »* : Dieu pourrait très bien faire tomber un objet vers le ciel !

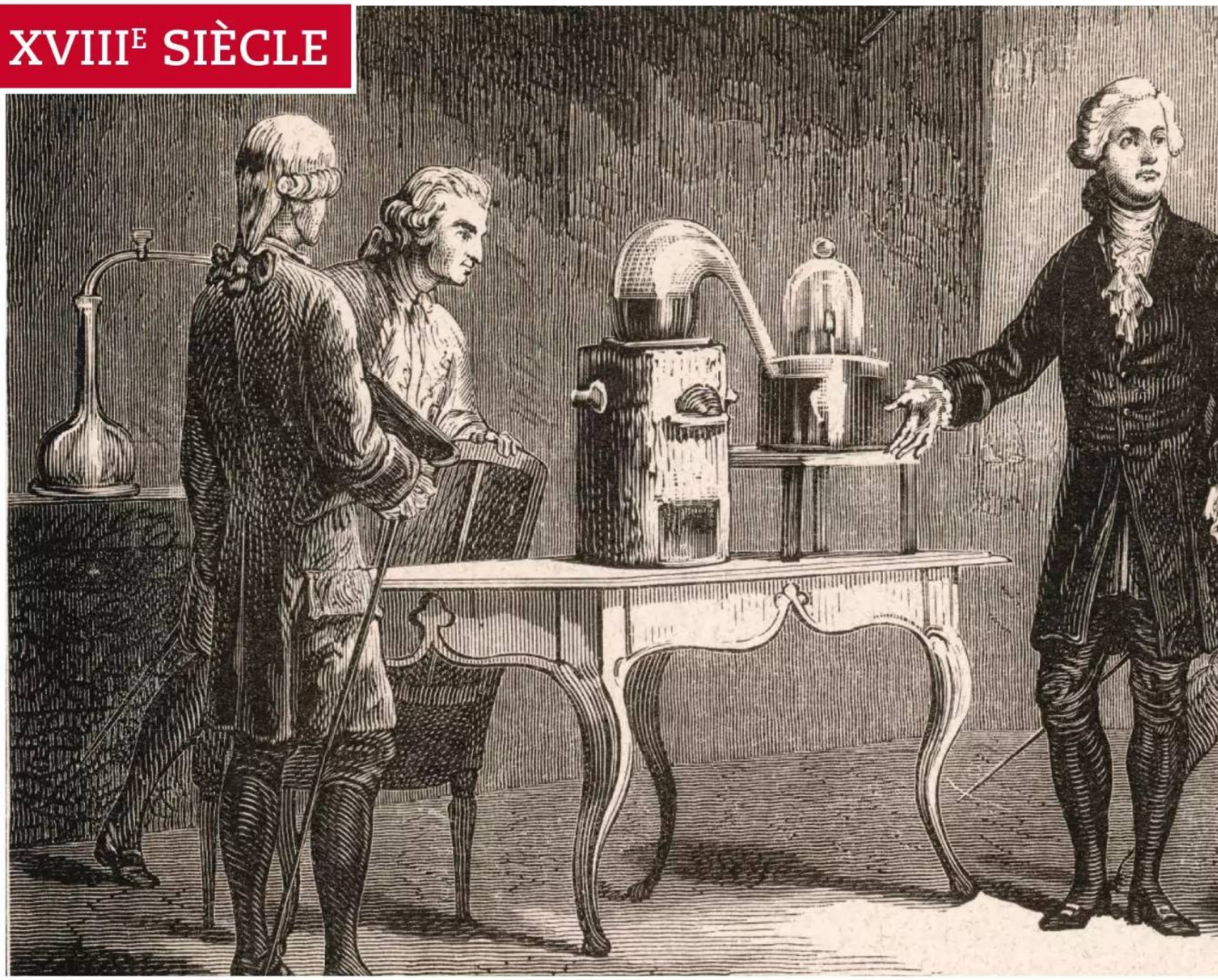
Cette vision bouleverse la physique. Si les atomes ne persistent pas d'eux-mêmes, toute causalité devient une illusion. Le feu ne brûle pas « naturellement » ; c'est Dieu qui, à chaque instant, associe la flamme et la combustion. Pour al-Ghazali, cela prouve que le monde n'est qu'un mirage dépendant entièrement de la volonté divine. Cette théorie répond à un enjeu théologique crucial : défendre le libre arbitre de Dieu contre le déterminisme grec. En 1111, al-Ghazali s'éteint à Tous, en Perse. Selon la légende, ses derniers mots furent : *« L'ultime vérité, je la vois maintenant. »*

C.G.

AURIMAGES

LA CHIMIE MODERNE OUVRE LA VOIE

XVIII[E] SIÈCLE



Au XVIII[e] siècle, alors que la chimie renouvelle ses concepts et ses méthodes, les expériences de laboratoire – notamment celles menées sur les gaz – permettent une nouvelle compréhension de la nature de la matière. Les savants commencent à se pencher sur le concept d'atome, qui était jusque-là un objet de spéculation philosophique.

Antoine-Laurent Lavoisier (1743-1794) a défini les éléments chimiques comme substances simples indécomposables et formulé la théorie de la combustion fondée sur l'oxygène. Sa loi de conservation de la matière — « rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme » — fonde la chimie moderne et ouvre la voie à une réinterprétation atomique de la matière.



Sur la piste des lois des gaz

L'étude des propriétés des gaz a été déterminante dans la compréhension de la constitution de la matière. *« Les lois des gaz ont formulé des relations de proportionnalité entre deux grandeurs physiques qui leur sont associées, dans des conditions particulières : pression et volume pour Boyle (1662), volume et température pour Charles (1787), pression et température pour Gay-Lussac (1802),* indique le chimiste Éric Jacques. *Avogadro en 1811 et Ampère en 1814 s'aventurent quant à eux à relier la quantité de molécules de gaz à son volume, mais cette loi n'est alors pas vérifiable expérimentalement. »* Vers 1840, ces lois seront réunies pour formuler la loi dite « des gaz parfaits ».

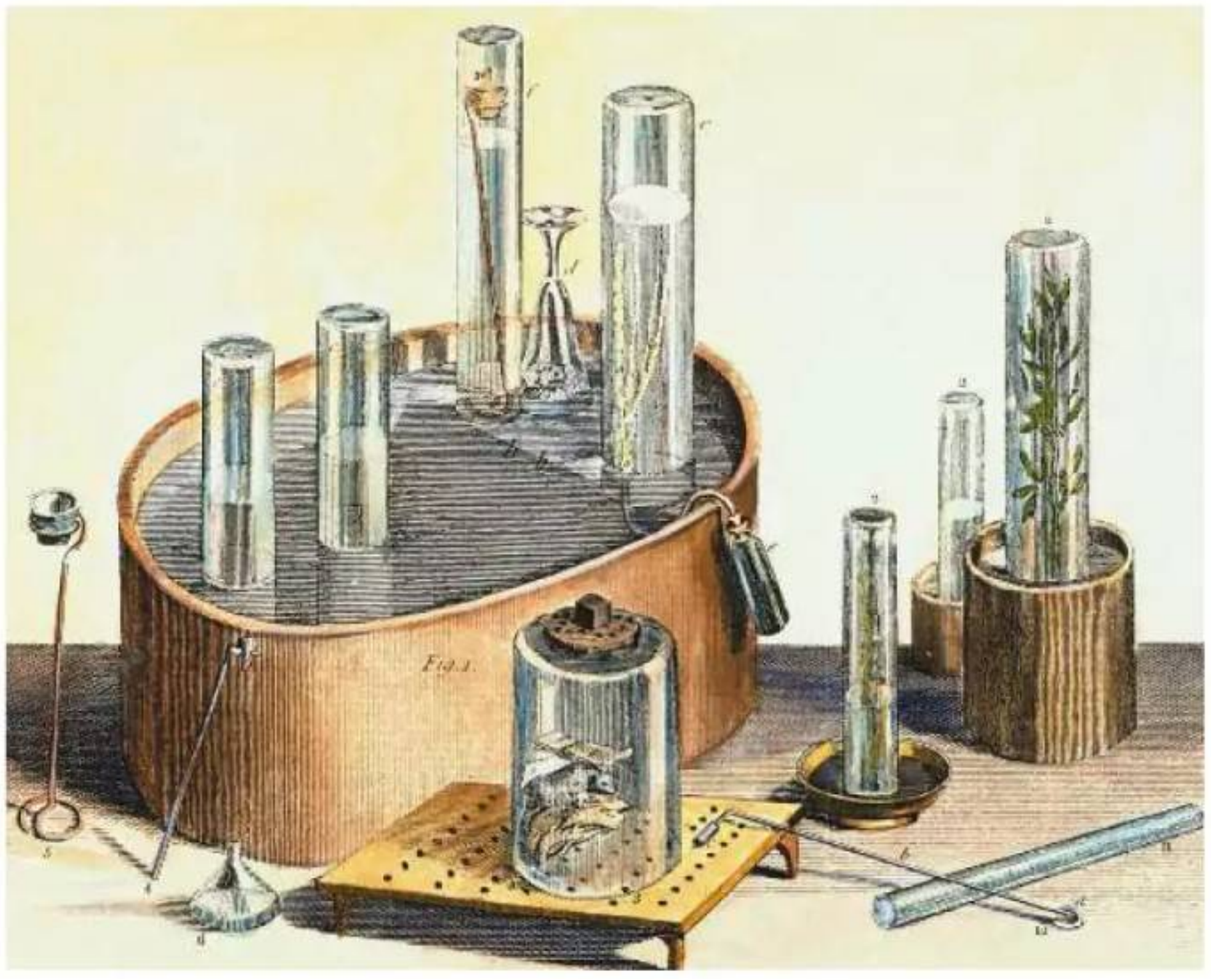
Si la nature intime de la matière interroge les philosophes depuis l'Antiquité, l'hypothèse atomique n'est entrée en laboratoire qu'à partir du XVIII[e] siècle, accompagnant la révolution de la chimie. Pour passer de la théorie aristotélicienne des quatre éléments (la terre, l'eau, l'air et le feu) à un monde matériel fait de corpuscules insécables, il a fallu d'abord définir les notions de corps simples et composés et d'éléments chimiques…

Dès le XVII[e] siècle, le chanoine Pierre Gassendi substitue aux doctrines d'Aristote un univers composé de vide et d'atomes. Pour réconcilier Épicure et sa foi chrétienne, il abandonne l'idée qu'il existe de toute éternité une infinité de mondes et d'atomes et déplace la réalité épicurienne dans un monde fini créé par Dieu, ouvrant la voie à une nouvelle science. En 1662, le physicien irlandais Robert Boyle publie *The Sceptical Chymist*. Fervent défenseur des conceptions atomistes, il promeut une réforme des méthodes expérimentales et introduit la notion d'élément chimique, défini comme une substance indécomposable.

À la même époque, un alchimiste allemand, Johann Joachim Becher, propose la théorie du phlogistique (du grec *phlogiston*), formalisée ensuite par son compatriote Georg Ernst Stahl. Ce principe énigmatique serait présent dans tout corps combustible. *« Pour les chimistes du XVIII[e] siècle, il s'agit de la matière du feu, qui s'échappe durant la combustion »*, précise l'historien de la chimie Éric Jacques. Les métaux se transformeraient ainsi en chaux métallique sans éclat en perdant le phlogistique, qui en émanerait sous forme de chaleur et de lumière.

Cette doctrine va être mise à l'épreuve par une nouvelle « chimie pneumatique » qui étudie les propriétés des différentes « formes » d'air. Joseph Black, un Écossais né à Bordeaux, découvre dès 1754 le dioxyde de carbone, baptisé alors « air fixe ». Autre grand nom de cette discipline, Henry Cavendish se fait connaître dès 1766 par ses expériences sur « l'air inflammable », c'est-à-dire l'hydrogène, considéré comme du phlogistique pratiquement pur. Son compatriote Joseph Priestley est un pasteur célèbre pour ses *Expériences et observations sur différentes espèces d'air*. *« En chauffant de la chaux rouge de mercure, il parvient à la décomposer en mercure métallique et en air qu'il appelle air déphlogistiqué »*, rapporte Éric Jacques. Si Joseph Priestley est un partisan convaincu de la théorie du phlogistique, ce n'est pas le cas d'Antoine Laurent de Lavoisier. *« À partir de 1772, celui-ci a réalisé des expériences de combustion notamment sur le soufre et le phosphore et observé que lorsque ces matières brûlent, la masse du produit final est supérieure à la masse du produit initial »*, raconte Éric Jacques. Or, si du phlogistique s'en échappait, elle devrait logique-

WORLD HISTORY ARCHIVE / AURIMAGES



Appareillage utilisé par le chimiste anglais Joseph Priestley dans les années 1770 pour ses expériences sur la composition de l'air, illustré dans une gravure en couleur extraite de son ouvrage *Experiments and Observations on Different Kinds of Air* (1774-1777).

ment diminuer… Le Français reprend les expériences de Priestley avec l'approche mathématique et physique rigoureuse qui le caractérise. « *Il utilise des instruments de mesure de grande précision ou les invente si nécessaire pour déduire de la mesure des conclusions théoriques* », remarque l'historien de la chimie.

En faisant bouillir du mercure dans une enceinte fermée, Lavoisier provoque la formation de chaux de mercure tandis que l'air s'appauvrit en « air vital », c'est-à-dire en oxygène. Ce processus est réversible et ses analyses, complétées par celles de Cavendish un peu plus tard, révèlent que l'air n'est pas un élément, mais un mélange comportant environ 20 % d'oxygène et 80 % d'azote. La théorie générale de la combustion formulée par Lavoisier en 1777 établit que la combustion d'un corps implique toujours la consommation de l'oxygène de l'air tandis que le poids du combustible augmente au prorata de la quantité de l'oxygène absorbé. Elle lui permet d'énoncer sa fameuse loi de conservation de la matière résumée par la formule « *rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme* ».

La théorie des quatre éléments a du plomb dans l'aile… Après avoir mis en évidence le caractère composé de l'air, Cavendish et Lavoisier vont dévoiler celui de l'eau. Cavendish obtient de la vapeur d'eau en provoquant la combustion de l'hydrogène par l'oxygène. Cette combustion consomme deux fois plus d'hydrogène que d'oxygène, conformément à la formule « H_2O ». Peu après, Lavoisier et son collaborateur Meusnier effectuent devant un parterre de plus de trente savants la démonstration éclatante qu'il est possible de décomposer l'eau, les gaz produits étant aussitôt employés à la recomposer. Dans son *Traité élémentaire de chimie* de 1789, Lavoisier définit des corps purs simples constitués d'un seul élément chimique, qui peuvent se combiner comme les lettres d'un alphabet pour former des corps purs composés. Il distingue trente-deux éléments chimiques, catégorisés selon leurs propriétés. « *Puisque nous n'avons aucun moyen de les séparer, ils agissent à notre égard à la manière des corps simples, et nous ne devons les considérer comme composés qu'au moment où l'expérience et l'observation nous en auront fourni la preuve* », écrit-il. À cette époque, les mots atomes et molécules, employés indifféremment, désignent de très petites quantités. Cette approche va s'avérer fertile… Au tournant du siècle, l'Allemand Jeremias Benjamin Richter et le Français Joseph Proust montrent que, lors de réactions chimiques, les corps se combinent dans des rapports de masse constants (loi des proportions définies). L'Anglais John Dalton, quaker pieux et professeur de sciences, explique ces observations en postulant dès 1803 l'existence de particules invisibles et indivisibles dont la masse est propre à chaque élément. Dans son *Nouveau système de philosophie chimique* (1808) qui présente son hypothèse atomique, il dénombre 36 éléments et calcule leur masse atomique relativement à celle de l'hydrogène. « *L'intuition d'un modèle particulaire est* a posteriori *remarquable*, estime Éric Jacques. *Elle pourra permettre de distinguer clairement atome et molécule quand le moment sera venu, mais chez Dalton, ces mots sont encore confondus. Pour lui, un atome d'eau est composé d'un atome d'oxygène et d'un atome d'hydrogène.* » La formule de l'eau serait donc HO… Et non H_2O ! C'est que le savant suppose que les combinaisons entre atomes s'effectuent dans les rapports les plus simples possibles : cela fausse évidemment son calcul de la masse atomique de l'oxygène, qui pâtit en outre de l'imprécision des mesures.



John Dalton (1766–1844), chimiste britannique, formalise l'idée que chaque élément est constitué d'atomes indivisibles.

Qu'importe, désormais, les scientifiques n'auront de cesse de perfectionner leurs méthodes et leurs concepts. La cristallographie apporte un moyen de penser la structure de la matière à partir de l'observation de l'ordre géométrique des solides. « *Elle introduit la notion de molécule intégrante, qui est constituée de molécules élémentaires et se répète à l'infini dans un cristal* », explique Éric Jacques. À la suite de l'invention de la pile Volta, la découverte de l'électrolyse (décomposition de composés chimiques sous l'effet d'un courant électrique) ouvre par ailleurs la voie à l'électrochimie, qui permet la découverte du sodium et du potassium en 1807, et par la suite du calcium, du magnésium, etc. En 1813, le Suédois Jacob Berzelius invente le système actuel de notation chimique ; en 1818, sa table de poids atomiques comprend 47 des 49 substances connues. Il proposera une théorie électrique des combinaisons chimiques qui se heurtera à de nombreux contre-exemples. Les débats sur la nature des atomes et des molécules sont loin d'être clos…

Marielle Mayo

À LIRE

Lavoisier, Éric Jacques, coll. Biographies et mythes historiques, éd. Ellipses, 2019.

THE GRANGER COLLECTION NY / AURIMAGES - AKG / SCIENCE PHOTO LIBRARY

CHARLES A. WURTZ, LE DÉFRICHEUR

Mai 1877 : la controverse atomique, qui dure depuis plus de 70 ans, se ranime en France. L'atome a trouvé son héraut en la personne du Strasbourgeois Charles-Adolphe Wurtz, fils d'un pasteur luthérien. Tout en rondeurs, l'homme arbore d'épais favoris ; à bientôt 50 ans, il est au faîte de sa carrière et a déjà reçu nombre de distinctions. Admis à l'Académie des sciences dès 1867 (il en deviendra président en 1881), il est reconnu comme un brillant chimiste. Doyen de la faculté de médecine de 1866 à 1875, il a été président de l'Académie de médecine en 1871. Devant l'Académie des sciences, il s'oppose à Marcellin Berthelot, de dix ans son cadet, qui a été nommé inspecteur général de l'enseignement supérieur l'année précédente et est un anti-atomiste convaincu.

Au début du siècle, l'hypothèse atomique de Dalton et son système de poids atomiques ont connu un vif succès, mais très vite, les « équivalentistes » ont proposé de s'en tenir aux « poids équivalents », pouvant être directement mesurés dans les réactions chimiques. *« Si j'en étais le maître, j'effacerais le mot atome de la science, persuadé qu'il va plus loin que l'expérience »*, a même déclaré en 1836 Jean-Baptiste Dumas, chef de file de la chimie française. Les arguments sont d'ordre philosophique. *« L'atome n'est pas visible et n'est qu'une hypothèse, à une époque où la chimie se cherche une identité en tant que science fondée sur les observations et les expérimentations »*, explique l'historienne des sciences Natalie Pigeard-Micault.



Charles-Adolphe Wurtz (1817-1884), défenseur de l'hypothèse atomique en chimie.

LA FRANCE CONTRE L'ATOME

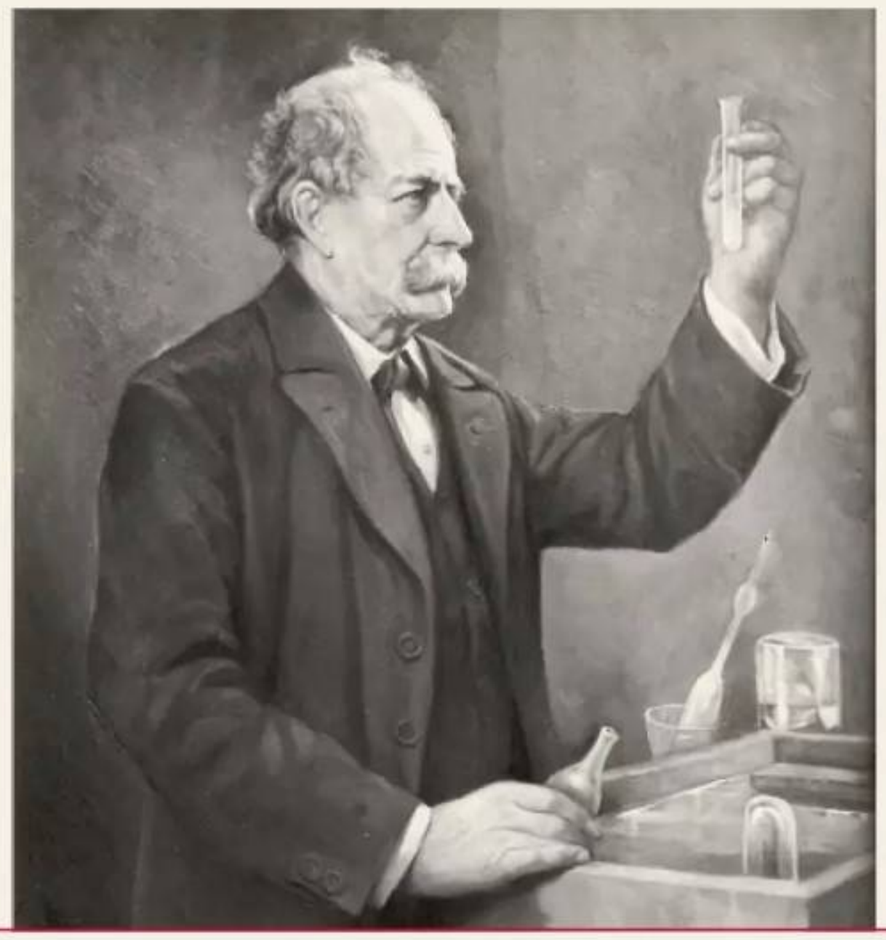
Ancien élève de Dumas, Wurtz a commencé par adopter les poids équivalents… Jusqu'à ce qu'il hérite de la chaire de son maître à la Faculté de médecine en 1853 et affirme son indépendance. En 1860, il est aux côtés de l'Allemand Kekulé lorsque celui-ci organise le premier congrès international de chimie à Karlsruhe. Il s'agit d'harmoniser les pratiques, car les chimistes ne s'entendent ni sur les théories utilisées ni sur les systèmes de notation. *« Il existe par exemple 19 formules pour écrire l'acide acétique*, relève Natalie Pigeard-Micault. *Après ce congrès, la notation atomique va s'imposer partout comme une vérité pratique, toutefois non absolue. »*

Partout, sauf en France, où l'anti-atomisme reste puissant, même si Wurtz, qui entretient d'étroites relations à l'international et a créé une importante école de recherche, l'enseigne à ses élèves ! Quand Berthelot, chantre d'un positivisme triomphant, affirme que l'atome n'est qu'une croyance, Wurtz, qui se dit lui aussi positiviste, reconnaît le caractère hypothétique de son existence et offre une démonstration magistrale de l'intérêt de cette hypothèse dans le champ expérimental. *« Mais c'est Berthelot qui a le pouvoir politique… »*, relève l'historienne des sciences. Le mot « atome » restera banni de l'enseignement officiel jusqu'en 1896…

M.M.

À LIRE

Charles-Adolphe Wurtz, un savant dans la tourmente, Natalie Pigeard-Micault, Coll. Histoire des sciences, éd. Hermann, 2011.



Marcellin Berthelot (1827-1907), chimiste défenseur d'une science strictement empirique, opposé à Wurtz sur l'usage de l'hypothèse atomique.

AKG-IMAGES / WORLD HISTORY ARCHIVE - AKG-IMAGES / SCIENCE SOURCE

XIX[E] SIÈCLE

LA TRAQUE AUX ATOMES EST OUVERTE !

Au XIX[e] siècle, l'atome sort du champ de la spéculation pour devenir un objet de mesure et de calcul pour les chimistes. Mais déjà se prépare une nouvelle révolution conceptuelle avec l'entrée en scène des physiciens.

Au XIX[e] siècle, atomes et molécules se cherchent encore une identité… Pour la cerner, les chimistes s'escriment à isoler et à synthétiser de nouvelles substances, fixent les masses atomiques et ordonnent les éléments dans des tableaux. Durant cette période, la théorie atomique est d'abord laissée de côté par les physiciens. Elle fera véritablement son entrée dans leur discipline dans la seconde moitié du siècle…

Quatre bouteilles, quatre couleurs, autant de molécules différentes composées d'atomes variés. Cette illustration pédagogique de 1925 montre que, malgré leurs différences, des volumes égaux de gaz contiennent le même nombre de molécules : c'est l'idée d'Avogadro.

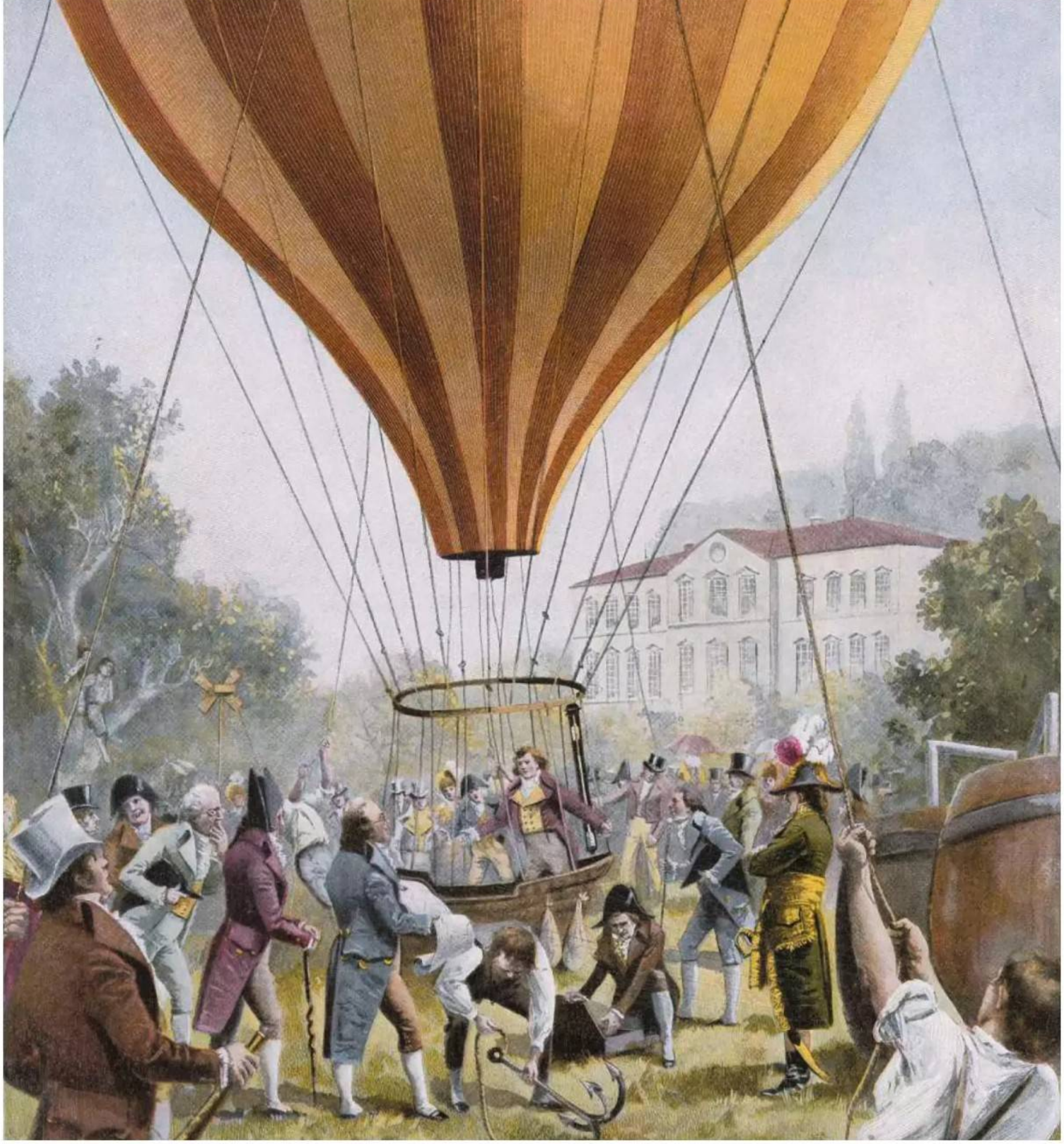
METTRE DE L'ORDRE DANS LA MATIÈRE

Le Britannique John Dalton a fixé un cap (voir *La chimie moderne ouvre la voie*, p. 38). Selon lui, *« du rapport des poids dans la masse du composé on peut déduire les poids relatifs des particules ultimes, ou atomes, des corps, et avec cette donnée, le poids et le nombre de ces atomes vont se montrer dans d'autres combinaisons »*. Le grand défi pour les chimistes va donc être de peser les atomes. Leurs travaux s'appuient sur l'analyse chimique, qui vise à décomposer les substances pour récupérer leurs éléments constitutifs ainsi que sur la chimie de synthèse naissante, qui cherche à créer de nouveaux composés. *« De nombreux chimistes se lancent dans l'aventure et trouvent des valeurs et des résultats différents à la fois pour le poids des atomes et pour celui des molécules*, souligne Éric Jacques, président de la Société française d'histoire de la chimie. *En n'étant pas d'accord sur les masses, ils ne sont pas d'accord sur les formules. »* Ceux qui suivent Dalton quand il postule que deux éléments se combinent de façon privilégiée atome à atome (un atome d'hydrogène et un d'oxygène pour former l'eau, etc.) ne calculent évidemment pas les mêmes poids atomiques que ceux qui partent de densités gazeuses en s'appuyant sur les travaux du chimiste français Gay-Lussac, qui a montré que deux volumes d'hydrogène se combinent avec un volume d'oxygène pour former deux volumes de vapeur d'eau.



AKG-IMAGES / COLLECTION MANSARD

La confusion entre atome et molécule ne facilite pas la tâche des savants. *« Lorsqu'Ampère propose qu'une molécule intégrante de phosphore puisse contenir quatre atomes de phosphore, un tel agrégat, si petit en taille, est inconcevable pour Dalton »*, remarque Éric Jacques. *« Faire de la synthèse chimique sans penser les atomes et la place de l'atome dans la molécule, c'est un peu difficile »*, constate pour sa part l'historienne des sciences Natalie Pigeard-Micault. De fait, un enjeu majeur reste de comprendre comment les éléments



En 1804, Gay-Lussac réalise une ascension scientifique à Paris, première utilisation d'un ballon habité pour mesurer température, pression et propriétés de l'atmosphère. Ces observations seront à la base de ses lois sur la combinaison volumétrique des gaz.

s'associent. Une théorie géométrique fondée sur la cristallographie postule que les constituants les plus intimes de la matière sont des polyèdres réguliers, modélisant la formation de l'eau par interpénétration d'un tétraèdre d'hydrogène et d'un tétraèdre d'oxygène !

L'hypothèse Avogadro et Ampère permet d'envisager que les molécules des gaz simples comme l'hydrogène ou l'oxygène sont constituées de deux atomes (H_2, O_2). Hélas, la théorie dualistique avancée par le Suédois Berzelius suggère que tout composé chimique est décomposable en deux entités porteuses de charges électriques opposées ; dans ce cadre, l'union de deux éléments identiques, de même polarité, est inconcevable. *« Cette théorie va bloquer le développement des concepts d'atome et de molécule jusque dans les années 1850 »*, remarque Éric Jacques.

Dans cette cacophonie, le besoin d'ordre se fait sentir. Le classement des éléments chimiques en fonction de leur seule masse atomique n'est pas suffisant, car il ne rend pas compte de leurs propriétés chimiques. *« De nombreuses idées émergent : Gay-Lussac classe les éléments en se fondant sur leur combinaison possible avec l'oxygène et l'hydrogène, Ampère distingue les métaux leucolytes (blancs et à faibles points de fusion) des métaux chroîcolytes (colorés) »*, explique Éric Jacques. On introduit aussi le concept de « triade » : le chlore, le brome et l'iode sont des halogènes tandis que le lithium, le sodium et le potassium sont des métaux alcalins, etc. En 1859, Jean-Baptiste Dumas, grand ponte de

MEMENTO IMAGES / AURIMAGES

la chimie française, ajoute un quatrième élément à ces triades, les transformant en tétrades. À l'aube des années 1860, une soixantaine d'éléments sont connus. En 1862, le minéralogiste français Émile Béguyer de Chaucourtois propose un étonnant système de « vis tellurique » qui révèle l'apparition périodique de similitudes dans une suite d'éléments classés suivant leurs masses atomiques. *« Il les dispose en spirale autour d'un cylindre et parvient à montrer que des éléments aux propriétés similaires se retrouvent les uns au-dessus des autres »*, rapporte Éric Jacques. L'année suivante, l'Anglais John Newlands remarque que des analogies apparaissent tous les huit éléments – ce qu'il appelle « la loi des octaves ».



Sir Joseph John Thomson (1856-1940). Physicien britannique. Dans le laboratoire Cavendish de Cambridge, Thomson étudie le comportement des rayons cathodiques. En 1897, il découvre l'électron et divise l'atome, qui entre alors dans l'ère subatomique.

DES CHIMISTES AUX PHYSICIENS

Le Russe Dmitri Mendeleïev va mettre tout le monde d'accord avec son tableau périodique, qui organise les éléments chimiques de masse atomique croissante de manière à faire apparaître la périodicité de leurs propriétés physiques et chimiques. Cette classification dans un tableau à double entrée, plusieurs fois remaniée, reste à la base de notre actuel tableau périodique des éléments. *« Il a l'audace de laisser des "cases vides". Ce qui fera l'exemplarité et la validité de son travail, c'est qu'il permet effectivement de prédire des densités ou des températures de fusion des espèces qui seront découvertes par la suite »*, souligne Éric Jacques. Tandis que la chimie range les atomes en ordre de bataille, deux physiciens allemands, Gustav Kirchhoff et Robert Bunsen permettent d'identifier de nouveaux éléments comme le césium grâce à une méthode novatrice d'étude de leur spectre lumineux (analyse spectrale), fondée notamment sur des travaux pionniers du Suédois Anders Jonas Ångström.

Une autre révolution s'amorce du côté des physiciens. En Allemagne, Rudolf Clausius fonde la thermodynamique, qui s'intéresse aux variations d'énergie et éclaire les comportements thermiques des corps. *« Il introduit la théorie cinétique des gaz et la représentation de l'énergie dans les gaz par l'intermédiaire de l'agitation thermique des espèces qui les composent »*, précise Éric Jacques. Selon Clausius, de minuscules particules dont le mouvement obéit aux lois de la mécanique composent les gaz, leur énergie cinétique étant proportionnelle à leur masse. Le physicien écossais James Clark Maxwell s'empare de cette théorie en 1860. Il comprend que les variations de vitesse et d'énergie des particules doivent obéir à des lois statistiques et cherche à modéliser leur distribution. Il s'intéresse aussi au second principe de la thermodynamique énoncé par Clausius en 1865 et peaufine son concept d'entropie, une grandeur mesurant le degré de « désordre » d'un système. À Vienne, Ludwig Boltzmann a vent de ses travaux… Ce jeune physicien a pour mentors Josef Stefan et Josef Loschmidt, tous deux ouverts à la théorie atomique – Josef Loschmidt est même le premier à avoir fourni une estimation vertigineuse du nombre d'Avogadro, qui est de 600 000 milliards de milliards de molécules (6×10^{23}) dans 22 litres d'air à pression et température ambiante ! Boltzmann formalise l'entropie par le biais d'une formule audacieuse ($S = k \log$), établissant un lien inédit entre le comportement de particules invisibles à l'échelle microscopique et les propriétés physiques de la matière à l'échelle macroscopique.

L'année 1897 marque un autre tournant, avec la découverte de l'électron par le Britannique Joseph John Thomson. Celui-ci montre que le faisceau de « rayons cathodiques » émis entre deux électrodes soumises à une forte tension dans un tube cathodique est dévié par un champ électrique et en déduit qu'il est constitué de particules de charge négative. Ces particules ont une masse environ 2 000 fois inférieure à celle de l'hydrogène. La découverte de l'électron conduira Thomson à proposer en 1904 le modèle atomique dit du *« plum pudding »* (pudding aux prunes), dans lequel les électrons (les fruits) se répartissent dans une sorte de pâte chargée positivement. La mise au jour de ce premier composant interne étaye la matérialité de l'atome, mais en fissurant l'idée de son indivisibilité, elle ébranle déjà l'édifice conceptuel hérité des Anciens. Et ce n'est qu'un début : car un autre mythe s'apprête à tomber – celui de l'atome éternel. On va bientôt le découvrir instable, vibrant, capable de se désintégrer… C'est la révolution radioactive.

Marielle Mayo



Le tableau périodique de Dmitri Mendeleïev, en 1925, dans lequel les éléments sont classés par masse atomique et regroupés selon leurs propriétés chimiques et physiques similaires.

THE GRANGER COLL NY / AURIMAGES -

CANNIZZARO, LE RÉVOLUTIONNAIRE

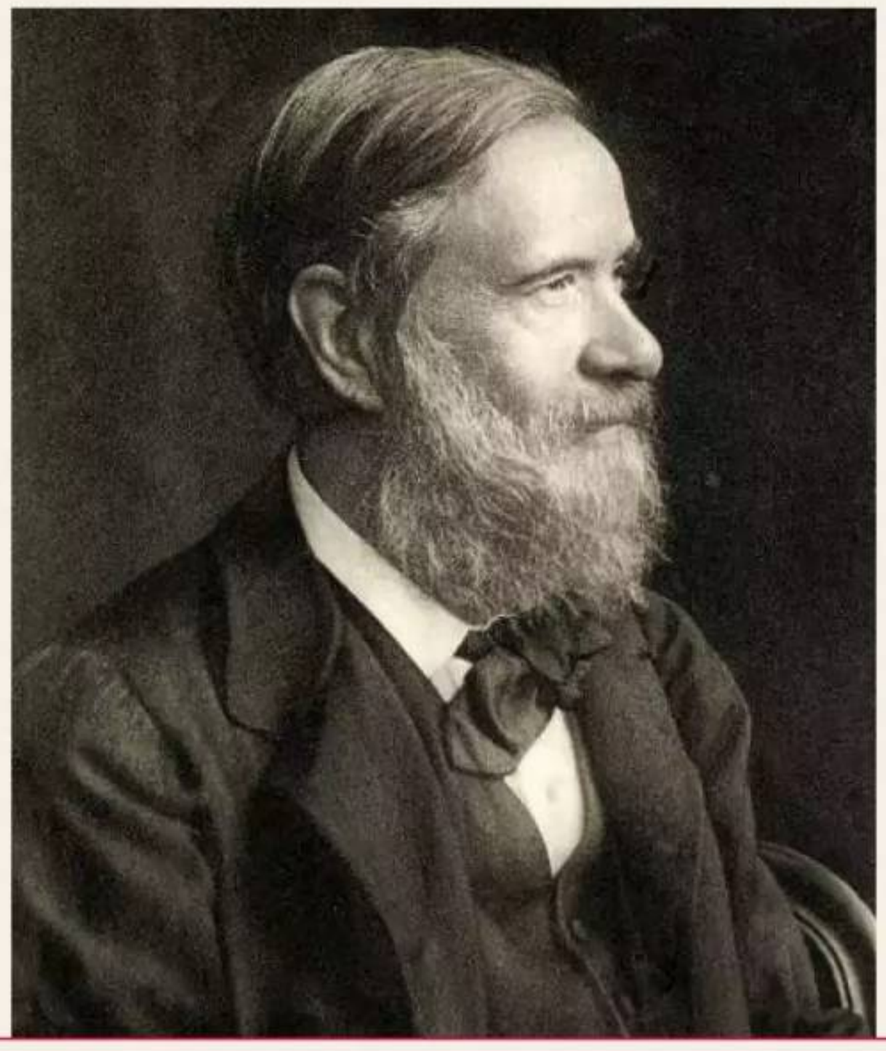
Chimiste de génie et révolutionnaire ardent, Cannizzaro a posé les bases de la chimie moderne tout en prenant part aux luttes du Risorgimento.



Sunto di a corso di filosofia chimica **(Résumé d'un cours de philosophie sous forme de lettre), par Stanislao Cannizzaro.**

Né en 1826 à Palerme, Stanislao Cannizzaro est surtout connu en France comme l'auteur d'un mémoire intitulé *Sunto di a corso di filosofia chimica* (résumé d'un cours de philosophie chimique sous forme de lettre), qui a apporté pour la première fois une compréhension claire des concepts d'atome, de molécule et de masse équivalente. Chimiste de grand renom, très impliqué dans les activités scientifiques et universitaires de son temps, Cannizzaro a aussi marqué l'histoire de l'Italie en participant activement aux luttes politiques de la période révolutionnaire.

Rien ne semblait pourtant le prédestiner à un tel avenir… Dernier des dix enfants d'Anna di Benedetto, issue de la noblesse sicilienne, et de Mariano Cannizzaro, directeur de la police de Sicile, il a été envoyé dans un pensionnat à l'âge de 10 ans, à la mort de son père, où il a reçu une éducation plutôt tournée vers les humanités. De plus, alors que sa famille soutenait le régime des Bourbons, qui dominaient alors la Sicile, Cannizzaro devint un fervent antimonarchiste et un soutien convaincu de Garibaldi. Après des études à la Faculté de Médecine de l'Université de Palerme, il découvre la chimie aux côtés de Raffaele Piria, professeur de chimie à l'Université de Pise, qui l'emploie comme assistant de laboratoire. Contraint à l'exil en 1849 après avoir participé au mouvement insurrectionnel sicilien, Cannizzaro séjourne ensuite brièvement à Paris. De retour dans son pays en 1851, il participe à la création d'une école de chimie, fonde un laboratoire de recherche et y réalise certains de ses travaux en chimie organique les plus aboutis, dont la découverte en 1853 d'une réaction qui porte son nom.



Stanislao Cannizzaro (1826-1910), chimiste italien. S'appuyant sur la loi d'Avogadro — longtemps ignorée —, qui établit que des volumes égaux de gaz contiennent le même nombre de molécules, il clarifie la distinction, souvent confondue jusque-là, entre atomes et molécules.

CLARIFICATION DÉCISIVE

C'est à l'université de Gênes, où il a été nommé professeur de chimie en 1855, qu'il écrit son fameux *Sunto*, publié en 1858. L'année 1860 constitue un apogée : au printemps, il se range aux côtés de Garibaldi et en septembre, il présente son essai au congrès international de chimie de Karlsruhe. Cette synthèse magistrale clarifie l'hypothèse d'Avogadro, selon laquelle les volumes égaux de corps gazeux différents, soumis à la même température et à la même pression, contiennent le même nombre de molécules. Cannizzaro s'avère aussi très novateur dans sa manière d'unifier la chimie minérale et la chimie organique, et de s'approprier des concepts issus de la physique, ce qui ne plait d'ailleurs pas à tous les chimistes… Mendeleïev, lui, revendiquera son influence décisive sur son travail. Après cette consécration, Cannizzaro connaîtra une longue et brillante carrière universitaire, qu'il mènera de front avec ses responsabilités politiques. Il s'éteint à Rome en 1910, à l'âge de 84 ans.

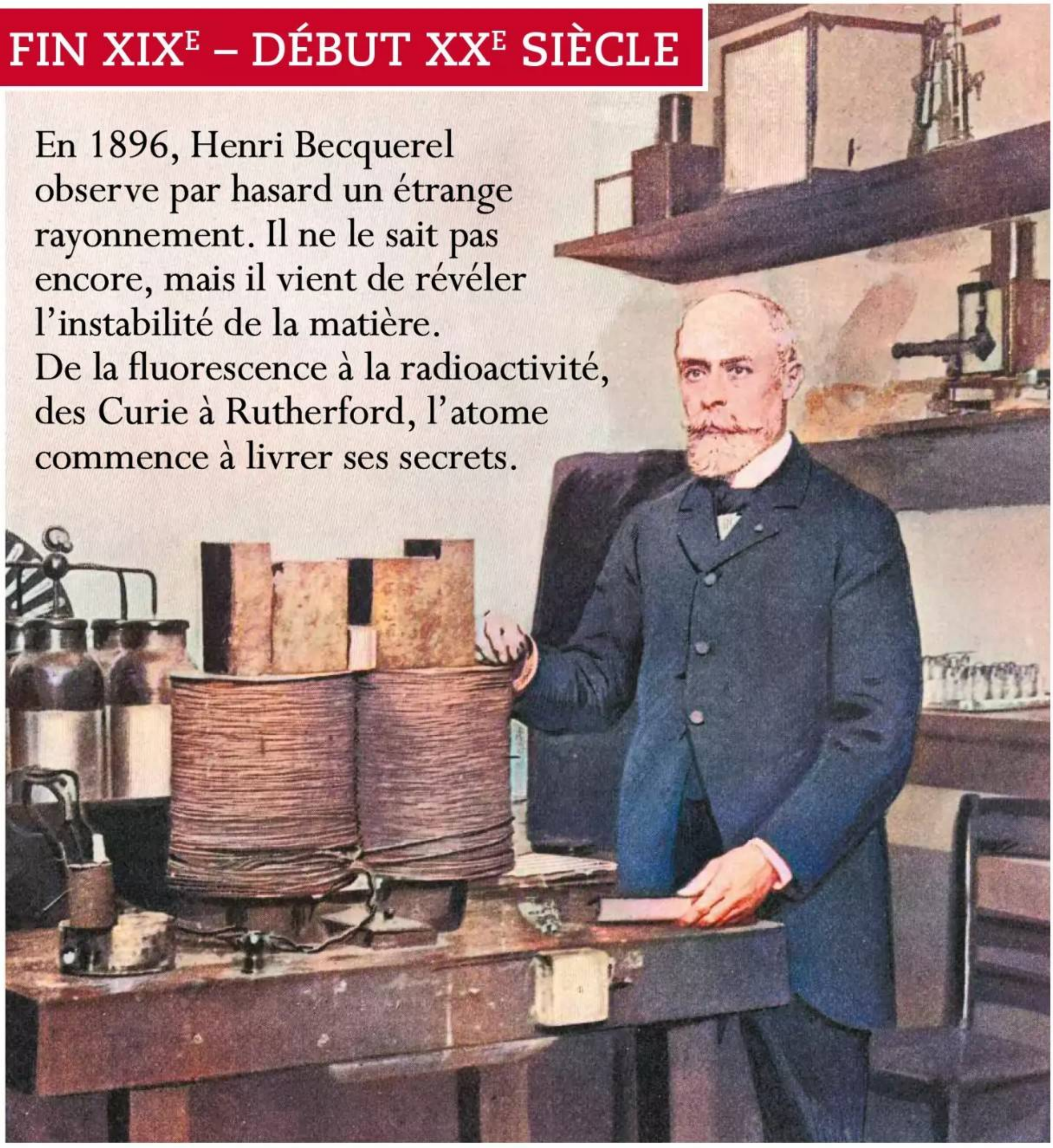
M.M.

AKG-IMAGES / SCIENCE PHOTO LIBRARY / NATURAL HISTORY MUSEUM, LOND - DR

LA RÉVOLUTION **RADIOACTIVE**

FIN XIX^E – DÉBUT XX^E SIÈCLE

En 1896, Henri Becquerel observe par hasard un étrange rayonnement. Il ne le sait pas encore, mais il vient de révéler l'instabilité de la matière. De la fluorescence à la radioactivité, des Curie à Rutherford, l'atome commence à livrer ses secrets.



Paris, février 1896. Le ciel est bas, la lumière rare. Dans les galeries glacées du Muséum d'Histoire naturelle, Henri Becquerel marche d'un pas mesuré. Redingote sombre, silhouette droite, moustache en guidon et barbiche taillée comme un petit sapin : il perpétue une lignée de physiciens. À 43 ans, il étudie la fluorescence : ces lueurs éphémères émises après exposition à la lumière. L'époque raffole d'invisible – ondes, hypnose, tables tournantes – mais Becquerel reste sobre. Il ne cherche pas un miracle, juste un reste lumineux, un simple reliquat.

Depuis quelques semaines, il teste des sels d'uranium. Irradiés par le soleil, peuvent-ils émettre à leur tour un rayonnement, comme les rayons X découverts récemment par Röntgen ? Ce jour-là, le ciel reste couvert. Becquerel place machinalement une plaque photographique dans un tiroir, avec un échantillon de sulfate d'uranyle et une croix de cuivre. Le tout à l'obscurité.

Quelques jours plus tard, il développe la plaque. Surprise : elle est noircie. Mieux, la croix a laissé une empreinte nette. Sans lumière, sans contact, quelque chose a traversé la matière. Il réitère l'expérience à l'obscurité totale : même résultat. Dans une communication à l'Académie des sciences du 2 mars, il écrit : « *Les mêmes lamelles cristallines, placées (…) à l'obscurité, produisent encore les mêmes impressions photographiques.* » L'uranium rayonne par lui-même. La matière émet sans stimulation extérieure. La radioactivité – encore innommée – vient d'être observée.

Mais personne ne s'en émeut. « *Le rayonnement est trop faible, on n'envisage pas d'applications immédiates* », explique Camilla Maiani, physicienne et médiatrice au musée Curie. « *Et les esprits sont galvanisés par les rayons X.* » L'*Almanach Hachette*, en 1897, s'enflamme : « *Reproduire l'os sous la chair, l'arme dans la blessure ; lire dans le corps – dans la pensée, peut-être !* » En comparaison, trop terne, trop abstrait, le rayonnement de Becquerel passe inaperçu. Et pourtant : ce n'est ni fluorescence ni phosphorescence. L'énergie ne vient pas de l'extérieur mais du cœur même de la matière. L'atome vient de se trahir.

Becquerel parlera de hasard. Mais, comme le souligne Bernard Fernandez, historien de la physique nucléaire : « *Le propre du vrai physicien, c'est de s'étonner à bon escient.* »

Certains avancent même, précise Camilla Maiani, qu'il aurait été influencé – peut-être inconsciemment – par les travaux de Niépce de Saint-Victor, que son père avait rejetés.

Le fil est tendu. Mais nul ne le saisit.



En 1898, les Curie détectent une radioactivité anormale dans la pechblende, un minerai d'uranium, et en déduisent l'existence de deux éléments inconnus : le polonium et le radium.

LE FEUILLETON DU RADIUM

C'est Marie Curie qui s'en empare. D'autres, comme Gerhard Carl Schmidt, avaient noté l'étrangeté des sels d'uranium. Elle en fait sa thèse. En 1897, peu après la naissance d'Irène, cette jeune Polonaise exilée à Paris se lance dans la mesure systématique du phénomène, avec l'aide de Pierre Curie et d'un électromètre ultrasensible. Ensemble, dans le froid du laboratoire, ils prolongent l'intuition de Becquerel.

Très vite, une anomalie : certains minerais, comme la pechblende, émettent plus que l'uranium pur. Inexplicable. Il faut un autre élément. C'est Marie qui nomme le phénomène : *radioactivité*.

Juillet 1898 : le polonium, en hommage à la Pologne. En octobre : le radium, deux millions de fois plus actif que l'uranium. Cette fois, le rayonnement ne peut plus s'expliquer par un simple changement d'état, ni par une transformation chimique. « *Il est émis spontanément, quelles que soient les conditions chimiques* », rappelle Camilla Maiani. Solide, liquide, chauffé ou non, il émane du cœur même de la matière. La généralisation du phénomène – de l'uranium au thorium, du polonium au radium – pousse les Curie à une hypothèse vertigineuse : le rayonnement serait une propriété atomique. « *L'atome ne serait donc pas stable, contrairement à ce que l'on croyait* », appuie Natalie Pigeard-Micault, historienne des sciences et auteure notamment d'une biographie de Marie Curie. Une révolution souterraine s'annonce.

1903 : le Nobel de physique entérine la bascule. Becquerel est distingué pour la découverte de la radioactivité naturelle ; les Curie pour leurs recherches sur les rayonnements qu'il a révélés. Une reconnaissance, mais surtout l'acte de naissance d'une science nouvelle, à la frontière de la physique et de la chimie.

À LIRE

De l'atome au noyau : Une approche historique de la physique atomique et de la physique nucléaire, Bernard Fernandez, Ellipses, 2018.

Le feuilleton du radium, Nathalie Huchette et Camilla Maiani, Musée Curie, 2019.

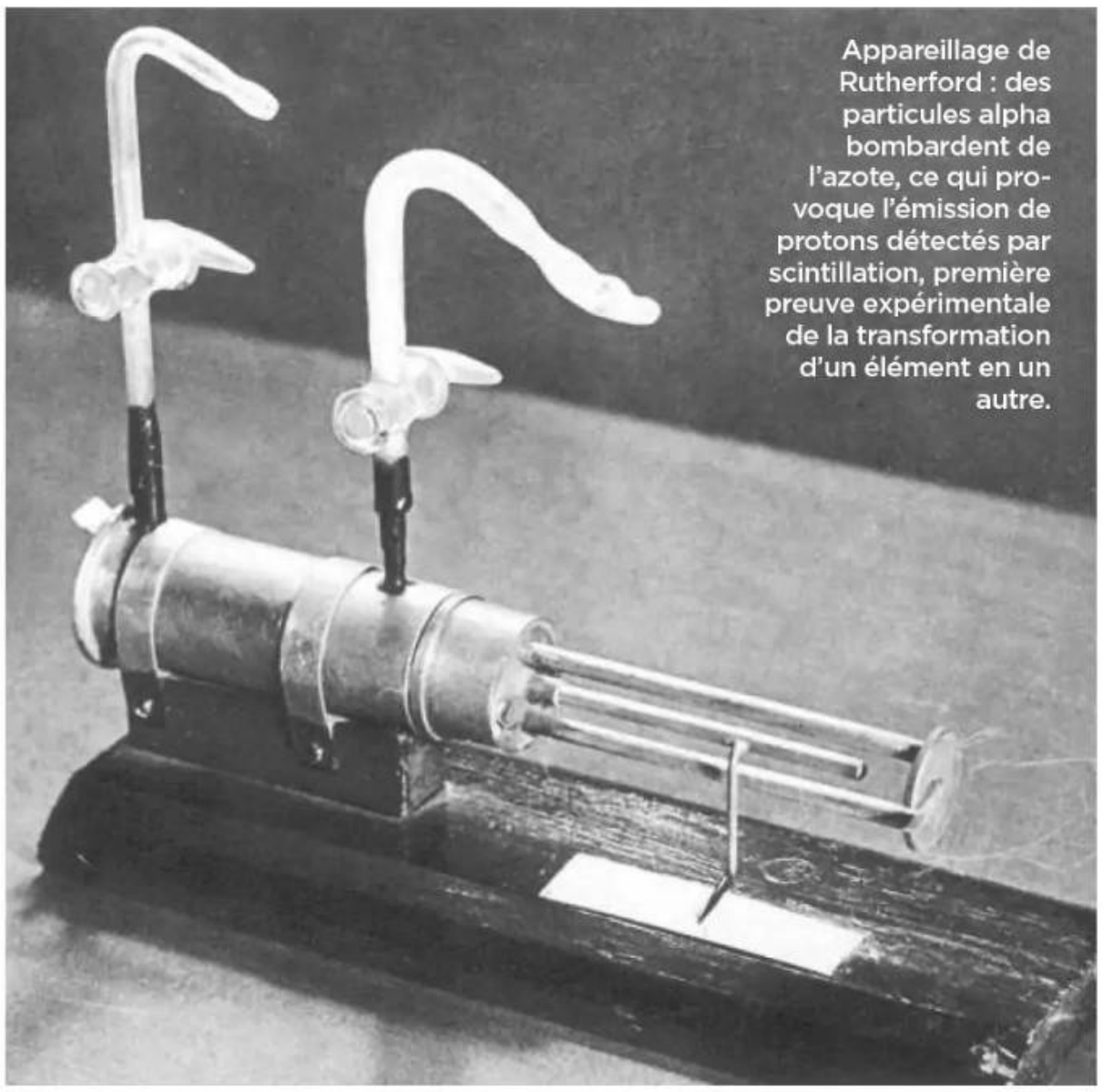
Marie Curie, une femme dans son siècle, Natalie Pigeard-Micault, Éditions Gründ, 2017.

UN DIXIÈME DE GRAMME CONTRE LE MONDE

Mais isoler le radium est une gageure. En 1898, ils n'en ont qu'un soupçon, une « signature ». Pour convaincre, il faut déterminer sa masse atomique – et donc traiter des tonnes de minerai. En 1901, Pierre Curie persuade l'industriel Armet de Lille de se lancer dans l'aventure avec les résidus de pechblende. Il faudra quatre longues années pour obtenir un dixième de gramme de radium pur. L'industrie prend le relais. Il faut des usages. Ils affluent : antiseptiques, eaux radioactives, cosmétiques. Le radium devient miracle, promesse de régénération.

Antoine-Henri Becquerel (1852-1908), physicien français, découvre la radioactivité naturelle en 1896 et partage le prix Nobel de physique avec Marie et Pierre Curie en 1903.

MEMENTO IMAGES / AURIMAGES



Appareillage de Rutherford : des particules alpha bombardent de l'azote, ce qui provoque l'émission de protons détectés par scintillation, première preuve expérimentale de la transformation d'un élément en un autre.

À la Belle Époque, avide de progrès, l'imaginaire s'emballe. *« Le radium touche au mystère de la vie »*, rappelle Nathalie Huchette, responsable de l'action culturelle et de la communication du musée Curie, co-auteure avec Camilla Maiani du *Feuilleton du Radium*. *« Il a cette aura – au sens de Walter Benjamin – d'une substance presque magique, presque surnaturelle. »* Brevets de rouges à lèvres luminescents, crèmes irradiantes, lotions « énergisantes » se multiplient. La marque Thoradia vante une peau rajeunie selon « la formule du docteur Alfred Curie » – homonyme sans lien avec la famille, mais parfait pour la réclame.

Mais très tôt, des effets inquiétants apparaissent : brûlures, affaiblissements, morts suspectes. *« Dans l'industrie ou les mines, on s'en soucie peu, mais dans les laboratoires, notamment à l'Institut du Radium, on commence à observer, à poser les bases balbutiantes d'une radioprotection »*, explique Nathalie Huchette. Les années 1920 sont tragiques : les *Radium Girls*, ouvrières américaines peintres de cadrans lumineux, meurent les unes après les autres. Leurs os brillent dans le noir. L'eau radioactive, elle, continue à se vendre.

À la fin des années 1930, les cosmétiques radioactifs sont interdits. Le radium reste cantonné à la médecine, encadrée. Mais son aura subsiste : entre science et magie, entre remède et poison.



Avant d'inquiéter, le radium faisait rêver : la gamme Tho-Radia promettait éclat et santé grâce à des crèmes, dentifrices ou poudres « enrichis » au radium et au thorium.

THE GRANGER COLL NY / AURIMAGES - DR

UN BÛCHERON CHEZ LES HORLOGERS

Tandis que le public s'éblouit, la physique avance en silence. Ernest Rutherford, massif, jovial, peu soucieux des modes, n'est pas du genre à flairer des mystères : il abat les problèmes comme un bûcheron. Ce n'est pas l'éclat du radium qui l'intéresse, mais sa régularité. Peut-on prédire sa décroissance ? Avec Frederick Soddy, Rutherford avance une hypothèse déroutante : les atomes se transforment. Une substance devient une autre, plus banale. À l'échelle atomique, la matière est instable. En 1902, ils montrent que l'intensité d'un rayonnement décroît selon une loi constante : la « période radioactive ». C'est une rupture. Jusque-là, seuls les composés chimiques évoluaient avec le temps. L'atome aussi, désormais, a une durée. Il n'est plus éternel. Les Curie découvrent un phénomène spontané, sans en comprendre la source d'énergie. Rutherford, lui, s'en sert pour sonder la matière. Il identifie les rayons alpha et bêta : des projectiles émis du cœur de l'atome. La transmutation devient un fait. L'atome n'est plus immuable. Le rayonnement devient symptôme.

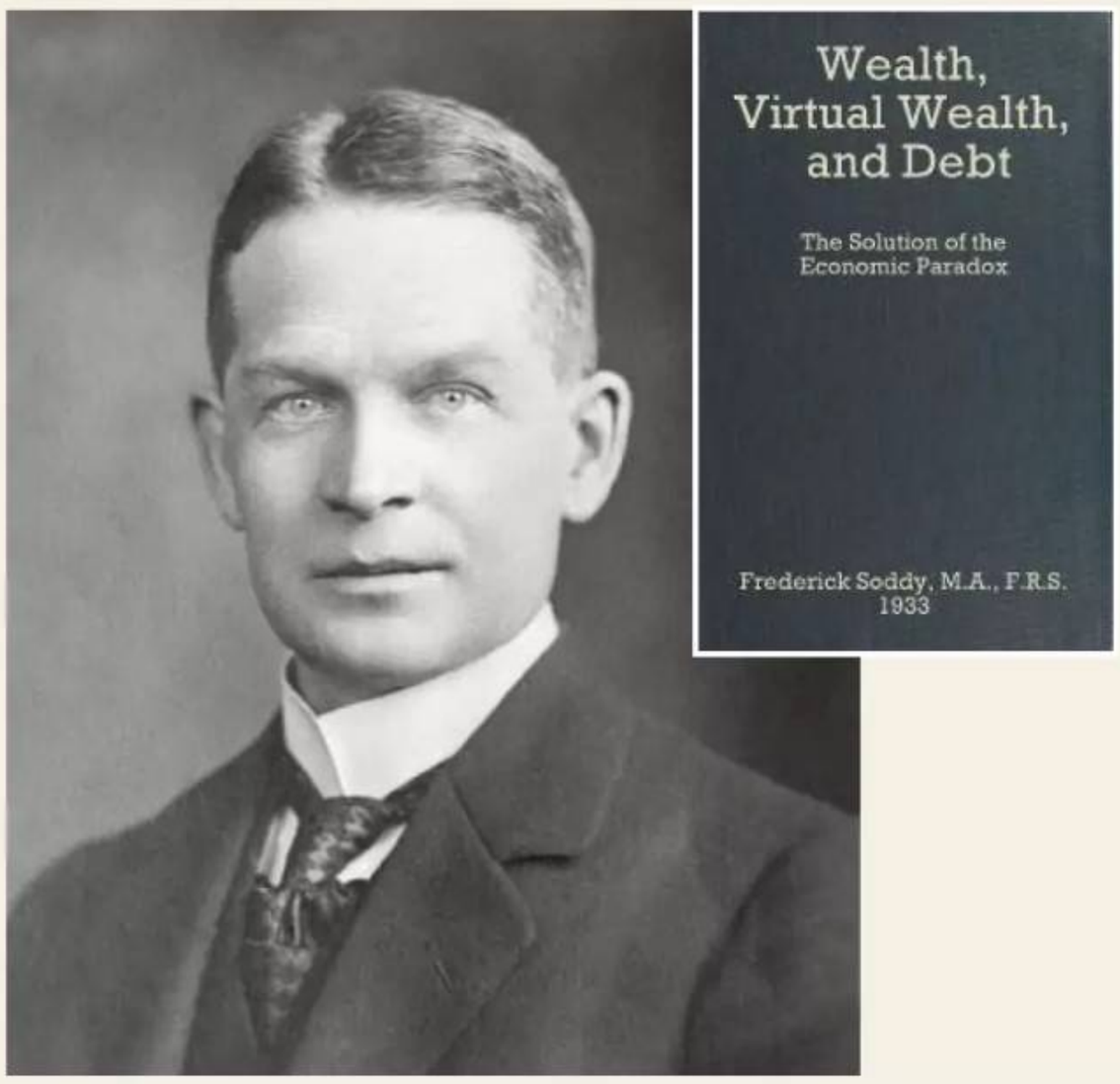
Mais Rutherford ne s'arrête pas là. Avec ses jeunes assistants Hans Geiger et Ernest Marsden, il conçoit une expérience d'une simplicité brutale : bombarder une feuille d'or avec des particules alpha. La plupart traversent la matière sans dévier. Mais certaines – rares, imprévisibles – rebondissent à angle vif. Comme si elles avaient percuté un mur. Stupéfait, Rutherford dira plus tard : *« C'était presque aussi incroyable que si vous aviez tiré un obus de 15 pouces sur une feuille de papier de soie, et qu'il était revenu vous frapper. »* Une image à la mesure du choc. *« Il fournit ainsi la première preuve expérimentale qu'un atome a une structure »*, résume Camilla Maiani. L'atome a un cœur : un noyau dense. Autour, presque rien.

La matière ? Un échafaudage subtil dressé sur du vide. *« Une idée radicale*, insiste Natalie Pigeard- Micault, *qui pulvérise l'ancien concept d'éther, cette substance supposée remplir les interstices de la matière. »* Camilla Maiani synthétise : *« Il y a l'atome de Dalton, plein et indivisible. Celui des Curie, instable. Celui de Rutherford, structuré, avec un noyau. C'est une révolution. On découvre que l'atome existe vraiment – et qu'il est surtout fait de vide. Et ce vide, on peut le sonder. »* Ce n'est plus un simple modèle, c'est une bascule. Une matière traversée de tensions, de durées, de métamorphoses. Une matière qui vacille. Qui devient phénomène.

Julien Nénault

FREDERICK SODDY, NÉO-ALCHIMISTE

Découvreur des isotopes et prix Nobel de chimie, il fut aussi l'un des premiers à alerter sur les dangers de l'énergie nucléaire. Marginalisé pour ses théories économiques inspirées de la physique, son œuvre visionnaire reste méconnue.



Né en 1877, ce chimiste britannique entre dans l'histoire scientifique grâce à sa collaboration avec Ernest Rutherford, à l'université McGill de Montréal (1902–1903). Ensemble, ils démontrent que certains éléments radioactifs se désintègrent spontanément, passant d'un élément à un autre – une découverte qui ruine l'idée d'une matière stable, continue et indestructible.

Soddy comprend que cette transformation libère une énergie colossale, liée à la structure intime de l'atome. Lors d'une conférence prononcée en 1904 devant les Royal Engineers, il déclare : « *Il est probable que toute matière lourde possède – latente et liée à la structure même de l'atome — une quantité d'énergie comparable à celle que renferme le radium. Si un jour l'homme parvient à l'exploiter et à la maîtriser, quelle force ce serait pour façonner le destin du monde ! Celui qui mettrait la main sur ce levier… disposerait d'une arme avec laquelle il pourrait, s'il le voulait, détruire la Terre.* » Visionnaire, il pressent aussi que ce pouvoir, promesse de maîtrise, portait en lui un risque de démesure.

Frederick Soddy (1877-1956), chimiste britannique, a démontré la transmutation des éléments et approfondi la compréhension de la radioactivité. Il a aussi cherché à appliquer les lois de la thermodynamique à l'économie.

En 1913, il introduit le terme isotope pour désigner des variantes d'un même élément chimique, identiques dans leurs propriétés mais différant par leur masse atomique – une avancée déterminante pour la physique nucléaire et ses futurs prolongements civils ou militaires. Il reçoit le prix Nobel de chimie en 1921 « pour ses travaux sur la chimie des substances radioactives et ses recherches sur l'origine et la nature des isotopes. »

THERMODYNAMIQUE APPLIQUÉE

Peu à peu, Soddy s'éloigne des laboratoires pour s'attaquer aux fondements de l'économie classique, qu'il accuse d'ignorer les lois physiques. Dans *Wealth, Virtual Wealth and Debt* (1926), il oppose la richesse réelle, fondée sur l'énergie, à la richesse virtuelle, faite de dettes et d'abstractions comptables. Il y dénonce l'illusion d'une croissance sans limite dans un monde aux ressources finies, anticipant les critiques bioénergétiques de l'économie d'un Georgescu-Roegen et des penseurs de la décroissance.

Frederick Soddy meurt en 1956 à Brighton, près de dix ans après Hiroshima, alors que le nucléaire civil émerge à peine. Oublié du grand public, il reste l'un des premiers savants atomistes à avoir pressenti l'écart vertigineux entre puissance technologique et maturité politique de l'humanité. Tandis que d'autres rêvent encore d'exploits quantiques ou de réacteurs miracles, Soddy nous avertit que l'énergie nucléaire n'est pas un jouet, mais un seuil – qu'on ne franchit pas sans conséquences.

J.N.

AKG-IMAGES / SCIENCE SOURCE - DR

MÉCANIQUE QUANTIQUE, LUMIÈRE OU TÉNÈBRES

DÉBUT DU XX^{E} SIÈCLE

Le 1er congrès mondial de physique a eu lieu en 1911 aux Instituts Solvay de Bruxelles, qui accueillent ces rencontres tous les trois ans. En 1927, la 5e conférence sur les électrons et photons a réuni 29 physiciens, dont 17 prix Nobel, parmi lesquels Curie, Einstein et Bohr.



Au tournant du XX[e] siècle, l'atome cesse d'être un rêve de philosophe pour devenir une réalité de laboratoire. Mais cette victoire de la science classique ouvre sur un vertige nouveau, celui d'un univers quantique difficilement concevable.

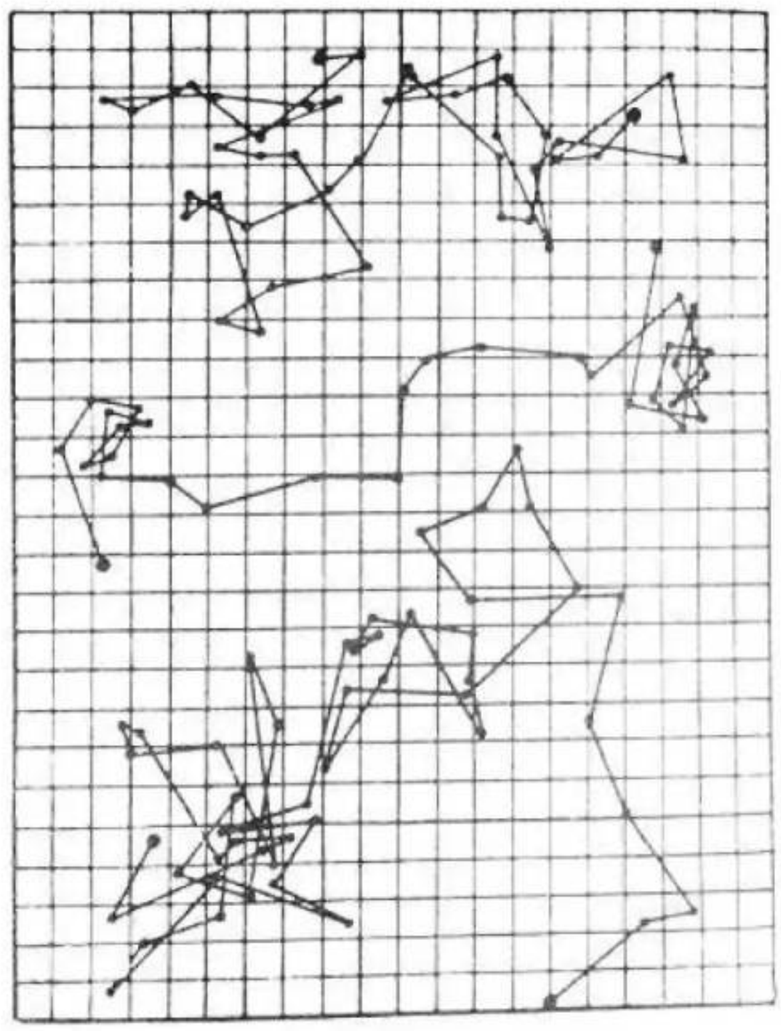


Au Ve siècle avant notre ère, Démocrite imagine déjà l'atome comme un grain insécable, ultime fondement de la matière. Mais pendant plus de deux millénaires, cette idée demeure une spéculation philosophique. À la fin du XIXe siècle, les scientifiques parlent encore des atomes avec prudence : ce sont des outils mathématiques commodes, non des entités réelles. Tout bascule en 1905, lorsqu'un jeune employé du bureau des brevets de Berne, Albert Einstein, publie une explication du « mouvement brownien » – ces infimes secousses des particules dans un fluide – par les chocs invisibles entre atomes. Pour la première fois, l'invisible devient mesurable.

En 1827, le botaniste Robert Brown observe au microscope des grains de pollen agités de mouvements désordonnés. Phénomène intrigant, mais inexplicable… jusqu'à ce qu'Einstein, dans son article de 1905, y voie la preuve de l'existence des atomes. Selon lui, ces soubresauts résultent des collisions incessantes entre les molécules d'eau et les particules visibles. *« Si le mouvement brownien existe, alors les atomes aussi »*, résume-t-il. *« Einstein a abordé le mouvement brownien comme un ingénieur : en isolant les paramètres mesurables pour contourner l'inobservable »*, note l'historien des sciences Olivier Darrigol (CNRS). Quelques années plus tard, le Français Jean Perrin relève le défi de valider cette hypothèse. Entre 1908 et 1909, ses expériences minutieuses sur des émulsions de gomme-gutte confirment les prédictions d'Einstein. Les atomes ne sont plus une abstraction : ils ont une taille (environ 10^{-10} mètre) et une masse. *« L'atome, entité chimique, devient une réalité physique »*, écrit Perrin dans *Les Atomes* (1913). Cette victoire empirique s'inscrit dans un mouvement plus large : depuis les premières recherches sur la radioactivité, les physiciens multiplient les observations indirectes de la matière. Peu à peu, l'atome se dévoile, bien loin de la sphère pleine des Grecs : il est creux, instable, et ses électrons gravitent dans un vide vertigineux. Pire, il n'est plus indivisible.

RÉVOLUTIONNAIRES MALGRÉ EUX

En 1900, le physicien allemand Max Planck affronte une énigme expérimentale, le « rayonnement du corps noir » – soit la lumière émise par un objet chauffé. Les lois physiques classiques échouent à expliquer ses mesures. Contre ses convictions, il propose alors une solution radicale : l'énergie ne s'échange pas de façon continue, mais par sauts discontinus, les quanta. Dès ce moment, la notion de « saut quantique » – un changement brusque et sans transition – s'impose au cœur de la matière. Cette hypothèse, qu'il qualifie d'*« acte de désespoir »*, impose que l'énergie soit toujours quantifiée à l'échelle atomique. Planck vient d'introduire le grain dans la nature, sapant les fondements de la physique classique. *« Planck et Einstein étaient des révolutionnaires malgré eux*, estime l'historienne des sciences Bernadette Bensaude-Vincent, professeure émérite à l'Université Paris-I Panthéon-Sorbonne. *Leurs découvertes ont émergé du désir de sauver la physique classique, non de la détruire. »* Lors d'une promenade avec son fils, Max Planck confie : *« Je viens peut-être de faire une découverte aussi im-*



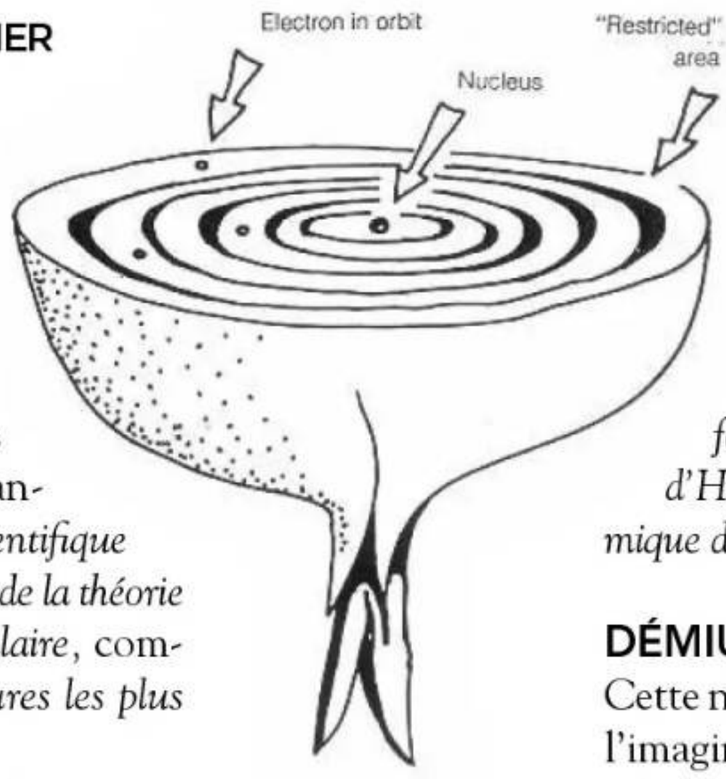
Mouvement brownien observé par Robert Brown en 1827 : les trajectoires de grains de pollen dans l'eau révèlent une agitation constante due aux chocs aléatoires des molécules, preuve de leur existence confirmée plus tard par Einstein et Perrin.

AKG-IMAGES / SCIENCE SOURCE - AKG-IMAGES / ALBUM / ORONOZ

portante que celle de Newton. » Mais, prudent, il limite les quanta à un artifice mathématique. Contrairement à Einstein, qui, en 1905, expose sa théorie selon laquelle la lumière elle-même serait composée de grains d'énergie, les « quanta de lumière », ancêtres des photons. « *La communauté scientifique est choquée : après deux siècles de triomphe de la théorie ondulatoire, la lumière redevient corpusculaire*, commente Olivier Darrigol. *Ce sont les heures les plus révolutionnaires de la physique.* »

En 1913, Niels Bohr, jeune physicien danois, applique les quanta à l'atome d'hydrogène. Selon son modèle, les électrons ne peuvent orbiter qu'à certaines distances précises du noyau, sautant d'un niveau à l'autre en émettant ou absorbant un quantum de lumière. Ces « sauts quantiques », désormais élevés au rang de concept central, expliquent expliquent les raies spectrales de l'hydrogène, une sorte de signature lumineuse de l'atome, observées depuis des décennies sans être comprises. « *L'atome de Bohr n'est plus un objet, mais un événement*, analyse Bernadette Bensaude-Vincent. *Cette dématérialisation est un choc culturel autant que scientifique.* » Le modèle de Bohr, mélange audacieux de physique classique et d'idées nouvelles, est accueilli avec scepticisme, mais les calculs collent aux observations. Pour la première fois, l'atome est à la fois réel et régi par des lois étranges.

Les années 1920 voient émerger la mécanique quantique, avec ses équations probabilistes. En 1927, le physicien allemand Werner Heisenberg énonce son principe d'incertitude : on ne peut connaître simultanément et avec précision la position et la vitesse d'une particule. Pour Bohr, c'est la clé d'une nouvelle philosophie. « *Ceux qui ne sont pas choqués par la théorie quantique ne l'ont pas vraiment comprise* », assène-t-il. Einstein, lui, résiste. « *Dieu ne joue pas aux dés !* », lance-t-il à Bohr lors du cinquième Congrès Solvay de physique, en 1927. Le Danois rétorque : « *Cessez de dire à Dieu ce qu'il doit faire !* » Les débats entre les deux scientifiques deviennent légendaires. Einstein tente de démontrer des contradictions dans la théorie, mais Bohr parvient toujours à le contrer. Einstein ne le digérera jamais… « *Jamais une théorie ne s'est construite dans un tel climat de désaccords fondateurs*, observe Olivier Darrigol. *Le génie d'Heisenberg a été d'accepter que la physique atomique doive renoncer aux images intuitives.* »

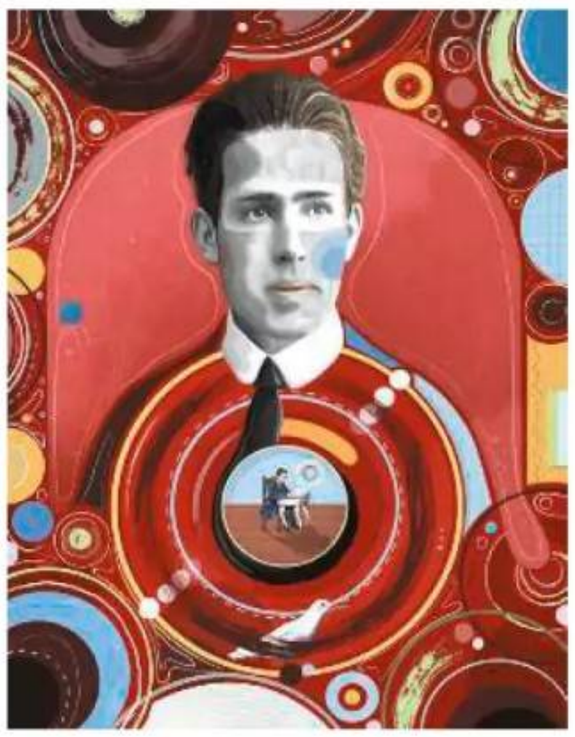


L'atome-oignon de Niels Bohr (1885-1962). En 1921, le physicien danois imagine les électrons disposés en couches autour du noyau.

DÉMIURGE CHAOTIQUE

Cette nouvelle vision de la matière bouleverse aussi l'imaginaire collectif. Le déterminisme laplacien, selon lequel l'état futur du monde peut être calculé si l'on connaît ses lois et conditions initiales, s'effondre. « *La physique quantique a imposé un choc existentiel : l'univers n'est plus une machine prévisible*, analyse Bernadette Bensaude-Vincent. *Elle a remplacé l'univers horloger de Newton par un théâtre de probabilités où l'observateur lui-même influe sur le scénario. Cette indétermination radicale a nourri autant l'angoisse que la créativité artistique.* » Dès les années 1920, la presse populaire s'empare du sujet : *Le Petit Parisien* titre en 1928 « L'atome, ce démiurge chaotique ». Cette révolution imprègne aussi les avant-gardes : Francis Picabia peint l'électron comme un « fantôme » changeant (*La Nuit espagnole*, 1922) ; René Clair filme des trajectoires saccadées évoquant le principe d'incertitude (*Entr'acte*, 1924) ; dans son *Manifeste du surréalisme* (1924), André Breton théorise un « *hasard objectif* » inspiré des sauts quantiques… Le choc culturel est aussi profond que la révolution copernicienne. Aujourd'hui, l'atome incarne toujours cette dualité : objet tangible – on peut en capturer des images grâce aux microscopes électroniques – et entité insaisissable, où une particule peut être ici et là à la fois. Le XX^e siècle a donc scellé ce paradoxe : avoir prouvé l'existence de l'atome, c'est avoir révélé l'étrangeté radicale de la matière. En rendant l'atome réel, puis insaisissable, Max Planck, Albert Einstein et Niels Bohr ont ouvert une ère où la science, selon les mots d'Heisenberg, « *ne décrit plus la nature elle-même, mais notre relation à elle* ».

Cécile Gérardin



Niels Bohr (1885-1962), physicien danois et prix Nobel 1922, célèbre pour son modèle atomique quantifié.

THE GRANGER COLL NY / AURIMAGES - AKG-IMAGES / SAM FALCONER, DEBUT ART / SCIENCE PHOTO LIBRARY

Penser l'infiniment petit

En 1905, Albert Einstein, dans son article sur le mouvement brownien, entreprend de calculer la taille des atomes. Il obtient un diamètre d'environ 10^{-10} cm. En 1911, le chimiste français Jean Perrin utilise cette prédiction pour répondre à une question surprenante : « *Combien d'atomes contient un grain de pollen ?* » Sa réponse : environ 300 milliards. Mais la comparaison la plus parlante vient d'un conférencier anonyme, dans les années 1920 : « *Si un atome était un petit pois, alors une pomme atteindrait la taille de la Terre.* » Cette image frappante, reprise dans les journaux de l'époque, a popularisé l'infiniment petit auprès du grand public.

ETTORE MAJORANA, LE GÉNIE DISPARU

Dès 1937, le jeune physicien italien a théorisé la symétrie des particules neutres, au cœur des recherches actuelles sur la matière noire. Avant de disparaître mystérieusement…

Au fil de sa brève existence (1906-1938), Ettore Majorana a peu publié, mais l'histoire de sa vie fait encore couler beaucoup d'encre. Dans le dernier appartement qu'il a occupé à Naples avant de disparaître dans des circonstances mystérieuses à l'âge de 31 ans, il a aussi laissé une vingtaine de carnets remplis de calculs. *« C'est dans ces documents, aujourd'hui conservés au Centre d'histoire des sciences du Domus Galilaeana de Pise, que j'ai plongé pour mieux cerner son œuvre scientifique »*, raconte le physicien et philosophe des sciences Étienne Klein dans son livre-enquête *En cherchant Majorana. Le physicien absolu* (Folio-Gallimard, 2015).



Ettore Majorana (1906-disparu en 1938), physicien italien.

ANTIPARTICULE ET DISPARITION

Ce théoricien fulgurant surgit sur la scène scientifique dans l'Italie des années 1920. Né à Catane dans une riche famille d'industriels et politiques siciliens et doté d'impressionnantes capacités de calcul, il est parti étudier les mathématiques à Rome, puis y a rejoint le groupe de savants italiens réunis autour du physicien Enrico Fermi. Bien que d'un caractère sombre et timide, Majorana se distingue rapidement pour ses extraordinaires capacités d'abstraction et sa compréhension des nouveaux concepts de la physique atomique. D'abord à Rome puis à Leipzig, où il a rejoint son collègue Werner Heisenberg, il travaille alors sur la structure des noyaux et la mécanique quantique naissante. En 1932, alors que le positron, l'antiparticule de l'électron, vient d'être découvert, il conteste la théorie de l'antimatière du français Paul Dirac. Dans un article de 1937, il avance une idée aussi étrange que novatrice : certaines particules neutres – comme le neutrino – pourraient être identiques à leur antiparticule. Contrairement aux particules chargées, dont l'antiparticule possède une charge opposée, elles ne présenteraient aucun moyen de distinction avec leur double. Ce caractère auto-identique pourrait expliquer leur masse extrêmement légère. Incomprise à l'époque, l'hypothèse est aujourd'hui centrale : elle alimente les recherches sur la matière noire, notamment dans l'expérience de Gran Sasso, menée sous les tonnes de roche du massif des Abruzzes. Les résultats pourraient éclairer la masse manquante de l'Univers – et confirmer, un siècle plus tard, l'intuition du physicien italien.

Cette même année 1937, Majorana obtient une chaire à l'Université de Naples, mais semble atteint d'une profonde mélancolie. À peine un an plus tard, le 26 mars 1938, il disparaît après avoir embarqué sur le bateau reliant Naples à Palerme. Suicide, fuite volontaire, enlèvement ? La question continue de nourrir des dizaines d'articles. *« Tel le chat de Schrödinger, à la fois vivant et mort, l'énigmatique et visionnaire Majorana a fini par s'essentialiser dans sa disparition »*, conclut Étienne Klein.

P.D.



Schéma du faisceau de neutrinos CNGS entre le CERN et Gran Sasso (Italie). L'expérience OPERA a mesuré une avance de 60 nanosecondes sur la vitesse de la lumière.

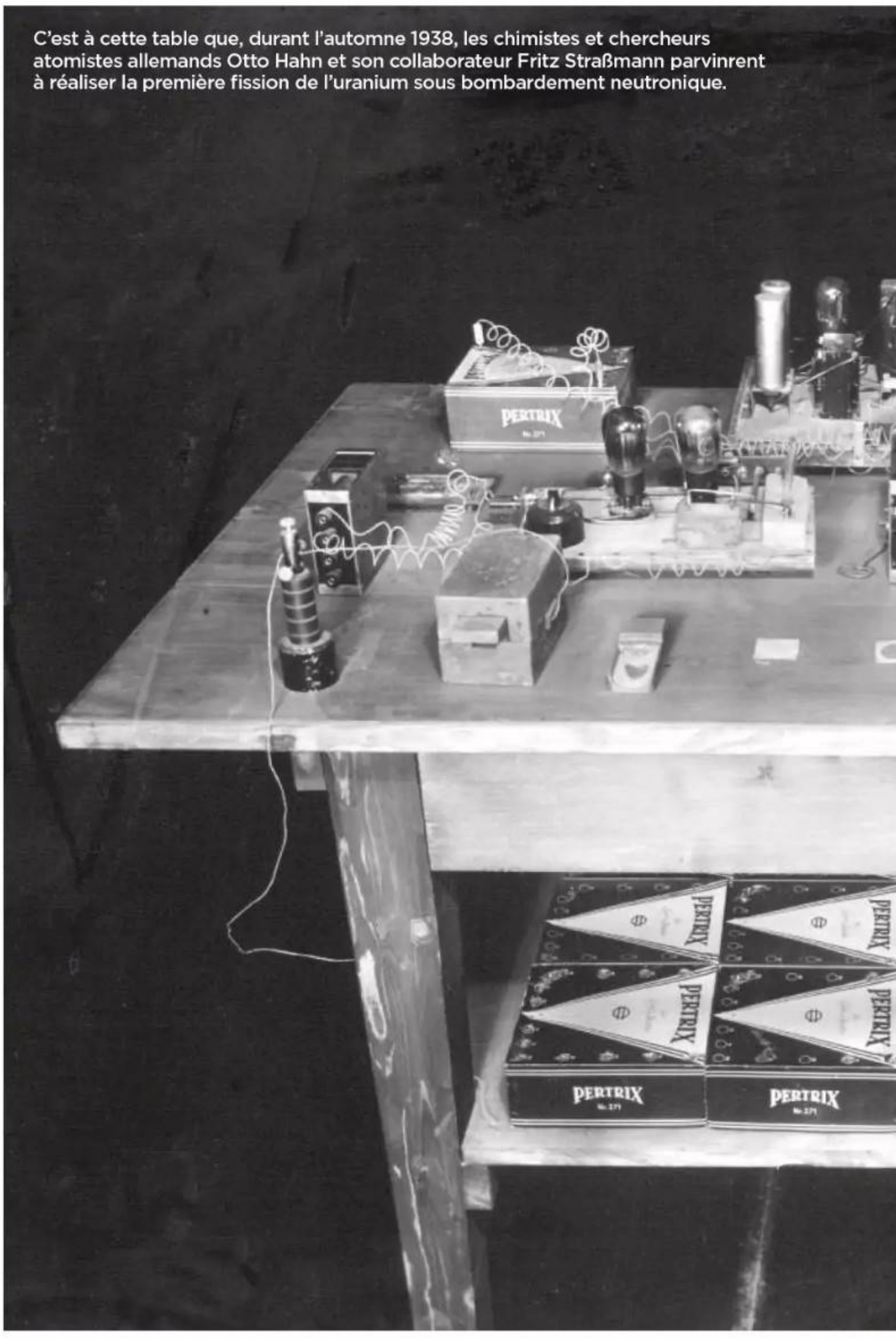
AKG-IMAGES / FOTOTECA GILARDI / DARIUSH - CNRS

SECONDE GUERRE MONDIALE

DU NEUTRON AU CHAMPIGNON

En décembre 1938, la physicienne Lise Meitner, juive autrichienne en exil au Danemark, rend visite à son neveu, le jeune physicien Otto Frisch, à Kungälv, près de Göteborg, en Suède. Jusqu'à l'Anschluss, elle était la collaboratrice d'Otto Hahn avec lequel elle a conduit des travaux sur la radioactivité. Celui-ci vient de bombarder des atomes d'uranium avec des neutrons qui semblent alors se fragmenter en plusieurs éléments plus légers, sans doute du baryum. Il transmet les résultats à Meitner pour avoir son avis. L'air frais stimule les neurones. La veille de Noël, la physicienne et son neveu partent s'asseoir sur un banc dans la forêt enneigée voisine et calepin en main refont les calculs. Quelques griffonnages plus tard, tout s'éclaire : le noyau d'uranium s'est brisé en deux fragments. Meitner s'appuie sur « le modèle de la goutte » du savant danois Niels Bohr avec qui elle travaille désormais : le noyau d'un atome n'est pas une masse solide, mais doit être interprété comme une goutte de liquide capable de se diviser. Et lors de la division, l'énergie qui soude l'atome est libérée conformément à la formule d'Einstein $E=MC^2$. Inspiré par la division cellulaire des biologistes, Otto Frisch baptise le phénomène « fission nucléaire ». Et c'est ainsi, bien loin des paillasses des laboratoires et des conseils de comités militaires, que commence la folle histoire de la bombe atomique.

Avec la découverte de la fission, de nombreux scientifiques estiment qu'il est désormais possible de créer une réaction en chaîne, de l'énergie à volonté, mais aussi une explosion et donc une arme de destruction massive. *« Frédéric Joliot-Curie dépose ainsi en mai 1939 un brevet secret portant sur la possibilité d'utiliser une réaction en chaîne nucléaire à des*



C'est à cette table que, durant l'automne 1938, les chimistes et chercheurs atomistes allemands Otto Hahn et son collaborateur Fritz Straßmann parvinrent à réaliser la première fission de l'uranium sous bombardement neutronique.

Libérer l'énergie de l'atome pour en faire
une arme de destruction massive :
telle est l'idée vertigineuse qui échauffe
dangereusement les esprits scientifiques
en ce début de guerre mondiale.
L'Allemagne nazie dispose de tous les atouts :
des physiciens de génie, des ressources,
un appareil industriel puissant. Et pourtant.



Lise Meitner (à gauche) interprète la fission de l'uranium observée par Otto Hahn (à droite), ouvrant la voie à l'énergie atomique... et à la bombe.



fins explosives », rappelle Jean-Marc Le Page, historien, chercheur associé au laboratoire Tempora de l'université Rennes 2. « *Des chercheurs comme Enrico Fermi, Leó Szilárd, Eugene Wigner ou Edward Teller, des Européens réfugiés aux États-Unis à la suite des persécutions nazies, comprennent rapidement les implications militaires de la fission.* » Szilárd, un juif hongrois installé aux USA depuis 1938, est l'un des premiers à être convaincu de la faisabilité à court terme d'une bombe atomique et du danger qu'elle représenterait si elle se retrouvait entre de mauvaises mains. Il souhaite prévenir les autorités de cette menace, mais comment faire ? Une lettre semble le meilleur moyen de s'adresser à Roosevelt, mais Szilárd est inconnu du grand public et les chances que le président lise ses avertissements sont bien maigres. Alors il se rend à Long Island où réside son ancien professeur de Berlin, Albert Einstein. La fameuse « lettre d'Einstein » est en fait celle de Szilárd, seulement signée par le prix Nobel. Celui-ci regrettera plus tard de ne pas s'être impliqué davantage. Peu importe, la missive parvient – du moins dans une version allégée par un conseiller – sur le bureau du président qui lui demande, histoire d'être sûr d'avoir bien compris le message : « *Ce que vous cherchez à me dire, c'est d'éviter que les nazis nous pulvérisent ?* » Tout juste M. le Président. À partir de ce moment et jusqu'à la fin de la guerre, une angoisse va tarauder en permanence la cervelle des dirigeants et des scientifiques américains et britanniques : et si l'Allemagne, berceau des découvertes fondamentales en physique nucléaire, était sur le point de réaliser un engin capable de rayer les grandes villes de la carte ? Dans la foulée, un « Comité consultatif pour l'uranium » est créé en novembre 1939 afin d'évaluer le potentiel militaire de la fission nucléaire. Mais avec

AKG-IMAGES / PICTURE-ALLIANCE / DPA - AKG-IMAGES / RAINER EHRT

ce modeste organisme à simple visée exploratoire, les États-Unis ne font que tremper un orteil dans la grande piscine de refroidissement tandis que de l'autre côté de l'Atlantique, la recherche atomique s'organise rondement.

Dès le mois d'avril 1939, Abraham Esau, patron du département physique du Reichsforschungsrat (RFR) rassemble l'ensemble des physiciens nucléaires du pays dans un projet appelé Uranverein pour examiner la faisabilité d'un réacteur nucléaire (Uranmaschine) et l'éventualité d'une bombe nucléaire. Il s'agit donc au départ d'un projet scientifique piloté par des chercheurs, à l'orientation encore assez floue : production d'énergie ? Arme destructrice ? Mais très vite, au cours de 1939, la Wehrmacht, par le biais de la HWA (Heereswaffenamt, le bureau des armes de l'armée de terre) prend le contrôle du programme. Si l'Uranverein n'est pas dissous, il est intégré dans une logique militaire, ce qui semble contrarier un bon nombre des scientifiques impliqués. Car l'Uranverein rassemble une soixantaine de physiciens d'opinions fort variées, allant de membres du parti comme Diebner ou Bagge à des antinazis plus ou moins affirmés comme Heisenberg, Laue ou Gentner. La HWA leur assigne une série d'études fondamentales pour répondre aux multiples problèmes posés par la réalisation d'une bombe atomique : il faut déterminer si une réaction en chaîne contrôlée est réalisable, trouver le modérateur idéal, inventer une méthode efficace pour obtenir en quantité de l'uranium 235, examiner les effets destructeurs théoriques d'une bombe… Pour l'heure, les Allemands soutiennent une recherche encore très théorique, avec des moyens limités, mais qui pourrait bien déboucher sur un projet plus ambitieux.



Oppenheimer (à gauche), directeur scientifique du projet Manhattan pendant la Seconde Guerre mondiale, inspecte un site d'essai atomique dans le désert de Los Alamos (Nouveau-Mexique) en compagnie du général Leslie Groves, directeur militaire du projet.

MANHATTAN PROJECT

Côté américain, la course à la bombe en est encore au stade du footing d'échauffement. Les budgets sont étriqués, les équipes peu coordonnées. À Columbia University, Fermi travaille sur la faisabilité d'une réaction en chaîne contrôlée. À Berkeley, Seaborg et McMillan mettent en évidence la possibilité d'un nouveau matériau fissile, le plutonium. D'autres équipes explorent différentes méthodes, diffusion gazeuse, centrifugation, électromagnétisme, pour effectuer la séparation isotopique de l'uranium 235. Bref, le comité pour l'uranium ne fait pas encore d'étincelles. Les choses s'accélèrent un peu en mai 1941 avec la création de l'OSRD (*Office of Scientific Research and Development*) chargé d'organiser des passerelles entre la recherche scientifique et les technologies utilisables sur le plan militaire. On y retrouve le Comité de l'uranium au sein duquel désormais la collaboration entre équipes est totale. *« Ses membres profitent du rapport MAUD, fruit des travaux des scientifiques britanniques pour qui la bombe est transportable, ce qui n'était pas encore acquis à l'époque et réalisable rapidement »*, ajoute Jean-Marc Le Page. Il ne manque plus que l'attaque de Pearl Harbour et l'entrée officielle des États-Unis dans la guerre pour faire passer le projet à la phase industrielle et pour que s'ouvrent en grand les vannes financières de la Maison-Blanche : on passe d'un budget de un million de dollars entre janvier et juin 1942 à treize millions de dollars entre juin 1942 et septembre 1943.

C'est en effet en juin 1942 que l'affaire est reprise en main par les militaires, plus exactement par le Corps du génie de l'armée de terre (Army Corps of Engineers) dont les bureaux se trouvent à New York dans le quartier de Manhattan. L'imagination n'ayant jamais été la plus grande qualité des militaires, le projet sera donc baptisé Manhattan Project. Le colonel Leslie Groves, repéré pour ses capacités à animer de grands chantiers – il vient de superviser la construction du Pentagone –, en devient le directeur. Lui n'a qu'une envie, partir sur le front commander des unités combattantes. Sa promotion éclair au grade de général de brigade l'aide à prendre son mal en patience. Reste à dénicher un directeur scientifique. Plusieurs savants lui soufflent le nom de Robert Oppenheimer dont les travaux théoriques et le prestige ont fait de l'université de Berkeley l'un des plus importants centres de recherche en physique. Fils d'un émigré juif allemand – encore un ! –, ce polyglotte maîtrise plus de cinq langues, dont le latin et le sanscrit, et connaît tous les cadors de la discipline. Mais il n'a jamais reçu de prix Nobel, n'a jamais conduit de projet d'envergure, et par-dessus le marché, il est suspecté d'affinités gauchistes. Mais sa vivacité

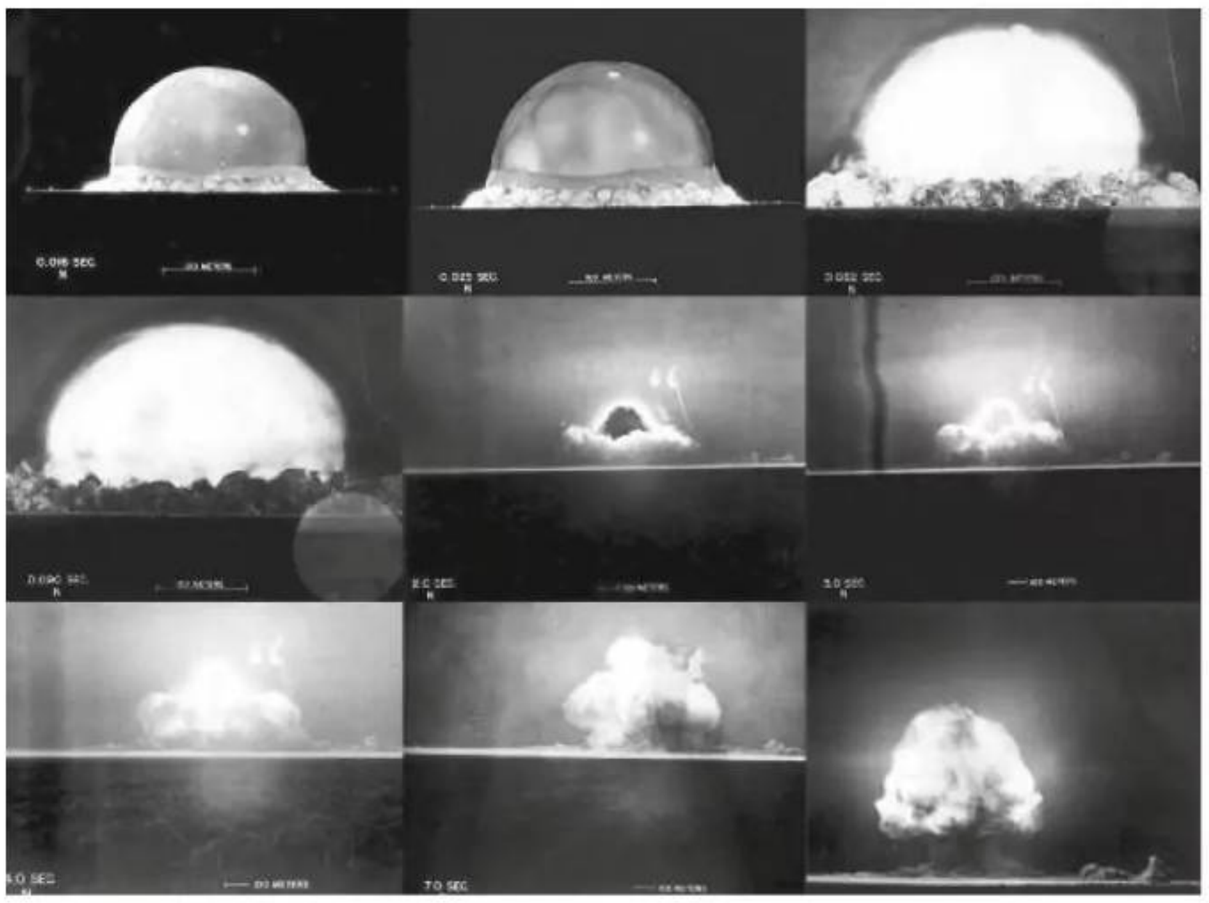
Le 13 juillet 1945, Oppenheimer supervise l'assemblage final de Gadget. Quatre jours plus tard, la bombe explose à Trinity.



EVERETT COLLECTION / AURIMAGES - AKG-IMAGES / SCIENCE SOURCE

intellectuelle et son ambition séduisent le général qui parvient à l'imposer contre l'avis de ses supérieurs et du FBI. Le choix va s'avérer judicieux. Groves lance la construction de deux centres de recherche : l'un à Oak Ridge dans le Tennessee pour l'enrichissement de l'uranium 235 via diffusion gazeuse et séparation électromagnétique, un autre à Hanford dans l'État de Washington pour la production de plutonium 239. Parfait, mais pour élaborer les bombes elles-mêmes, il va falloir de l'espace, un site isolé loin des oreilles indiscrètes, mais à proximité d'une connexion ferroviaire. Oppenheimer a un ranch au Nouveau-Mexique où il passe ses vacances. Au cours de ses balades, il a découvert entre mesas et canyons un haut plateau volcanique, ancien terrain de chasse des Indiens Pueblos, qui pourrait faire l'affaire. En novembre 1942, Groves valide le « site Y », nom de code de Los Alamos, les premières installations commencent début 1943 et les plus grands spécialistes du sujet y emménagent bientôt avec femmes et enfants pour y vivre cloisonnés dans un monde parallèle, coupés du reste de la société. Los Alamos gagne le surnom peu flatteur de « camp de concentration des prix Nobel ». Groves s'est mué en chef d'industrie, Oppenheimer en brillant meneur d'hommes. L'élaboration de la bombe, une bombe américaine, n'est plus qu'une question de temps. En moins d'un an, l'Amérique a dépassé les travaux des savants européens en théorie et en pratique. Car si à Washington, les politiques, alertés, éperonnés par les savants, se sont emparés du projet nucléaire, la situation est fort différente dans l'Allemagne hitlérienne.

Faute d'être passé à l'étape industrielle, sans usines, ni coordination, ni budget massif, le Reich ne parvient pas à produire d'uranium enrichi ni de plutonium. *« Les Américains vont réaliser en trois ans ce que les Allemands n'ont pas réussi à faire en six. Cet échec est une conséquence du système »*, explique Jean-Marc Le Page. *« Il y a une dispersion totale des moyens ainsi qu'une concurrence effrénée entre les différents organes, le parti, l'armée, la SS, etc. Contrairement à ce que l'on pense, le système n'a rien de pyramidal, mais s'apparente plutôt à un fonctionnement en silos où chaque service travaille sur ses spécialités sans se soucier des autres services. »* Les études se poursuivent ainsi dans une dizaine de villes différentes avec autant de responsables à couteaux tirés pour obtenir des fonds, du personnel ou du matériel. Le jeune prodige de la physique allemande, Werner Heisenberg, prix Nobel 1932, est responsable théorique des recherches sur la réaction en chaîne et la conception d'un réacteur nucléaire. James Chadwick, l'Anglais qui a découvert le neutron et en a été récompensé par le Nobel en 1935, le considère comme *« l'Allemand le plus dangereux du fait de sa puissance intellectuelle »* ! Il travaille de son côté à Leipzig sur un réacteur expérimental qui manque d'exploser en juin 1942. Lors d'une de ses conférences, Albert Speer, le nouveau ministre de l'Armement et des Munitions, est très intéressé par une application pratique de ses recherches, mais Heisenberg douche immédiatement son enthousiasme en évoquant le coût et le temps nécessaire



Séquence photographique du test Trinity, la première explosion nucléaire créée par l'homme. Les quatre premières images, prises entre 0,012 et 0,090 seconde après la détonation, montrent un dôme de plasma qui se transforme en champignon nucléaire. 16 juillet 1945.

Quand les USA se donnent les moyens…

Voici quelques chiffres qui permettent de mieux appréhender l'ampleur du projet Manhattan. L'opération a coûté 2,2 milliards de dollars de l'époque – environ 30 milliards actuels en tenant compte de l'inflation – soit plus que n'importe quel autre projet scientifique ou militaire mené jusqu'alors. Des centaines de tonnes de matière ont dû être séparées pour obtenir 64 kg d'uranium 235 pour la bombe Little Boy et 6 kg de plutonium 239 pour Fat Man. L'usine d'Oak Ridge qui enrichissait l'uranium à elle seule nécessitait une puissance électrique capable d'alimenter une ville comme Lyon ou Marseille. 14 000 tonnes d'argent métallique ont été utilisées pour fabriquer les bobines des calutrons, les spectroscopes de masse permettant la séparation isotopique de l'uranium. Au total, le Projet Manhattan a mobilisé directement 130 000 personnes, scientifiques, techniciens, ouvriers, administratifs, soldats… soit l'équivalent d'une ville entière travaillant dans le plus grand secret. La plupart ignoraient la véritable finalité de leur travail.

EVERETT COLLECTION / AURIMAGES

à la réalisation d'une arme fatale. En 1968, il dira dans une interview : *« J'ai déclaré que oui, nous pouvions construire une bombe atomique, mais que cela nous prendrait sans doute très longtemps, plus longtemps que ne durerait la guerre. »* Pourtant Speer est prêt à lui accorder les fonds et les matières premières nécessaires et accepte de financer la construction du premier cyclotron allemand. Mais Heisenberg se montre toujours pessimiste et ne garantit rien avant trois ou quatre ans. Une éternité pour une Allemagne contrainte de se battre sur tous les fronts. Hitler veut du concret rapidement. Alors qu'au même moment l'équipe de von Braun ne manque pas une occasion de faire valoir ses prouesses sur les V2 en haut lieu, les scientifiques nucléaires dans leur grande majorité restent d'une discrétion exemplaire. Le physicien Max von Laue le dira après l'explosion d'Hiroshima : *« Aucun de nous ne voulait mettre une telle arme entre les mains d'Hitler. »* Tentative de réhabilitation à bon compte ou sincère opinion des savants allemands ? Il faut reconnaître que certains semblent avoir eu une vraie répugnance à construire une bombe pour Hitler. La question se pose notamment pour Heisenberg qui a transgressé les règles les plus élémentaires de la sécurité militaire en parlant de ses recherches par trois fois à l'extérieur du Reich dont une fois à Niels Bohr à Copenhague comme s'il voulait lui faire comprendre qu'une bombe allemande n'était pas à l'ordre du jour, espérant qu'il en fasse part aux Alliés pour qu'ils abandonnent eux aussi les recherches dans cette direction. Une démarche bien naïve si elle était avérée, d'autant que Bohr a cru à une manœuvre et n'a fait qu'aiguiser les craintes des Américains.

HITLER ET LA FISSION

La vérité est qu'aucun des projets allemands n'a franchi le stade du prototype et qu'Hitler à aucun moment n'a été près d'appuyer sur le bouton rouge. *« Quand, au printemps 1945, les Alliés découvrent à Haigerloch, dans le sud de l'Allemagne, le dernier réacteur d'Heisenberg, ils réalisent au vu de ce dispositif incapable d'une réaction en chaîne autoentretenue que les Allemands étaient encore bien loin de la technologie requise pour produire une bombe »*, souligne Jean-Marc Le Page. N'en déplaise aux historiens amateurs de sensations fortes comme Rainer Karlsch qui dans son livre *Hitlers Bombe* (2005) affirme que les nazis auraient testé en mars 1945 une arme nucléaire rudimentaire sur le terrain d'exercice d'Ohrdruf en Thuringe. Le dispositif hybride contenant de l'uranium enrichi ou du plutonium en faible quantité, associés à des explosifs chimiques très puissants, aurait été expérimenté en présence de prisonniers de Buchenwald, dont 700 seraient morts des suites de l'explosion. En l'absence de preuves physiques concluantes, la communauté historique dans son ensemble a toujours contesté ce rebondissement rocambolesque. Certes, peu de temps avant d'aller s'enterrer dans son bunker, Hitler faisait encore allusion à ses *Wunderwaffen*, ses « armes fantastiques » qui allaient faire basculer le cours de la guerre. Un vœu pieu. Juste après la capitulation, le général Keitel, chef des forces armées, ajoutait : *« J'ai vu le Führer en début d'année. Si nous avions eu une bombe atomique, il me l'aurait dit ! »* Hitler, qui étonnait son auditoire par ses connaissances sur les armes classiques, n'a jamais vraiment compris l'utilité de la fission de l'atome. Le monde des sciences lui est toujours resté étranger. La Führerliste qui épargnait à ceux dont les noms y figuraient d'être appelés dans les rangs de l'armée comprenait des comédiens de théâtre, des chanteurs d'opéra, des vedettes de cinéma et autres artistes appréciés du Führer. Mais pas un seul savant. Contrairement aux États-Unis où les scientifiques se sont donné la peine d'approcher les autorités politiques et militaires pour leur expliquer tout l'intérêt et la complexité de la bombe atomique, aucune complicité ne s'est établie de ce côté-ci de l'Atlantique. Mais le mythe du génie organisationnel allemand a tout de même prévalu tout au long de la guerre. L'angoisse d'une bombe nazie imminente a eu le mérite de booster l'effort des Américains et de les conduire seuls en tête à la première explosion nucléaire de l'histoire. Le 16 juillet 1945, leur bombe Trinity faisait basculer l'humanité dans une ère nouvelle.

Christophe Migeon

À LIRE

La bombe atomique. De Hiroshima à Trump, Jean-Marc Le Page, Passés Composés, 2021.

Le Mystère Heisenberg, Thomas Powers, Albin Michel, 1993.

La course à la bombe. Et si Hitler avait eu l'arme atomique ?, Robert Arnaut, Nouveau Monde Éditions, 2008.



Le 24 mai 1945, des soldats alliés démantèlent une pile atomique expérimentale à Haigerloch, dans le cadre de l'opération Alsos, menée pour empêcher l'Allemagne nazie d'achever sa bombe.

AKG-IMAGES

QUELQUES GOUTTES D'EAU LOURDE

Des commandos de saboteurs norvégiens, des espions français, des planeurs qui se crashent dans la montagne, un ferry qui explose avec ses passagers et des Allemands sur les dents… voici le cocktail détonnant de la bataille de l'eau lourde, dont la trame semble sortie tout droit des studios d'Hollywood. La vraie vedette de cet incroyable scénario n'est autre que l'oxyde de deutérium, une eau un peu plus dense, car ses atomes d'hydrogène ont un neutron supplémentaire. Cette « eau lourde » est un excellent modérateur de neutrons, facilitant la réaction en chaîne. Hélas, l'eau ordinaire ne contient qu'un atome de deutérium pour 6000 d'hydrogène, rendant son extraction très coûteuse en temps et en énergie. Mais depuis 1934, la société norvégienne Norsk Hydro réussit à en fabriquer dans son usine hydro-électrique de Vemork à 120 km à l'est d'Oslo.

En février 1940, le banquier Jacques Allier qui connaît personnellement le directeur de Norsk Hydro est missionné par le gouvernement français pour négocier le rachat de la totalité du stock d'eau lourde produit par Vemork. Les 26 bidons de 8 litres sont discrètement exfiltrés par avion vers la France via l'Écosse au nez et à la barbe des espions du Reich. La Wehrmacht fait main basse sur l'usine deux mois plus tard lors de l'invasion de la Norvège. En juin 1940, le butin français, 185 kg d'eau lourde, est évacué *in extremis* vers l'Angleterre par Hans von Halban et Lew Kowarski, collaborateurs de Frédéric Joliot-Curie et mis à disposition des Alliés. Alarmés par la menace d'une bombe allemande, ces derniers retournent un ingénieur de l'usine pour en obtenir des plans et des photos détaillés et en octobre 1942 une avant-garde de quatre hommes est parachutée sur le plateau Hardangervidda à proximité de la centrale. Des hommes affûtés par des mois d'entraînement intensif avec le SOE (Comité des Opérations spéciales), comme le sergent Claus Helberg qui sait transmettre 20 mots par minutes en morse et connaît 21 manières de tuer un homme. Ces durs à cuire doivent préparer le terrain pour une opération de sabotage de l'usine le mois suivant. Le 19 novembre, deux planeurs acheminant les commandos tentent un atterrissage dans la zone de l'usine. Le premier s'écrase contre une montagne tandis que le second se pose en catastrophe. Les survivants sont fusillés. À la suite de cet échec, les quatre Norvégiens de l'avant-garde n'ont plus qu'à passer l'hiver dans une petite cabane sur le plateau et survivre en chassant le lièvre et le renne. Il leur faut s'habituer aux morceaux les plus exotiques de celui-ci : les lèvres au goût de châtaigne, l'estomac rempli de lichens à moitié digérés, idéal pour la vitamine C… Enfin, en février 1943, une nouvelle équipe de six saboteurs est parachutée et parvient à retrouver l'avant-garde. Après avoir dégringolé une falaise et déjoué la surveillance renforcée de l'usine, ils parviennent à faire sauter les 18 cellules électrolytiques. La production d'eau lourde est stoppée net et les membres du commando parviennent même à s'échapper sans dommage. Sans doute l'un des plus spectaculaires sabotages de la guerre, salué par Churchill comme un modèle d'opération clandestine.



Kirk Douglas dans The *Heroes of Telemark*, 1965. Le film retrace le sabotage de l'usine de Vemork pour freiner le programme nucléaire nazi.

LA VRAIE VEDETTE DE CET INCROYABLE SCÉNARIO N'EST AUTRE QUE L'OXYDE DE DEUTÉRIUM

Hélas, les Allemands font repartir l'usine en trois mois. Tout est à refaire. La centrale, désormais fortifiée, est bombardée en novembre 1943 par 200 B17. Peu de dégâts, mais l'usine est démantelée. Le stock de 600 litres d'eau lourde convoyé par deux compagnies SS ne quittera jamais la Norvège : la résistance fait sauter le ferry qui le transporte sur le lac Tinnsjå. 26 personnes périssent dans l'explosion, mais l'Allemagne, privée de ce stock, ne pourra produire qu'assez d'eau lourde pour de petits réacteurs, sans jamais atteindre la criticité. Cette bataille, méconnue, a peut-être changé le cours de la guerre.

C.M.

EVERETT COLLECTION / AURIMAGES

6 & 9 AOÛT 1945



HIROSHIMA

Le 6 oût 1945 à Hiroshima, et trois jours plus tard à Nagasaki, le monde découvre les effets dévastateurs de l'arme nucléaire. Dessins, objets, récits : la mémoire des *hibakusha*, les survivants de la bombe, témoigne de la violence d'une déflagration devenue silence – et du combat pour que cela ne se répète jamais.



SHIGEO HAYASHI / HIROSHIMA PEACE MEMORIAL MUSEUM - EIKO UEDA / HIROSHIMA PEACE MEMORIAL MUSEUM

Fumée rose

Eiko Ueda, l'auteure de ce dessin, avait 10 ans au moment de l'explosion. Elle dépeint ici son souvenir du champignon atomique, qui éclaire le ciel alors qu'elle se rend à l'école, située à 11 kilomètres de l'épicentre. Inauguré dix ans à peine après la catastrophe, le musée du Mémorial de la Paix d'Hiroshima centre son espace d'exposition permanente sur les témoignages des survivants de la bombe, les *hibakusha* (personnes irradiées, en japonais). Depuis 2012, leur récit sont transmis par les « successeurs », des volontaires touchés par leur histoire qui se donnent pour mission de faire vivre la mémoire d'Hiroshima qui disparaît peu à peu.

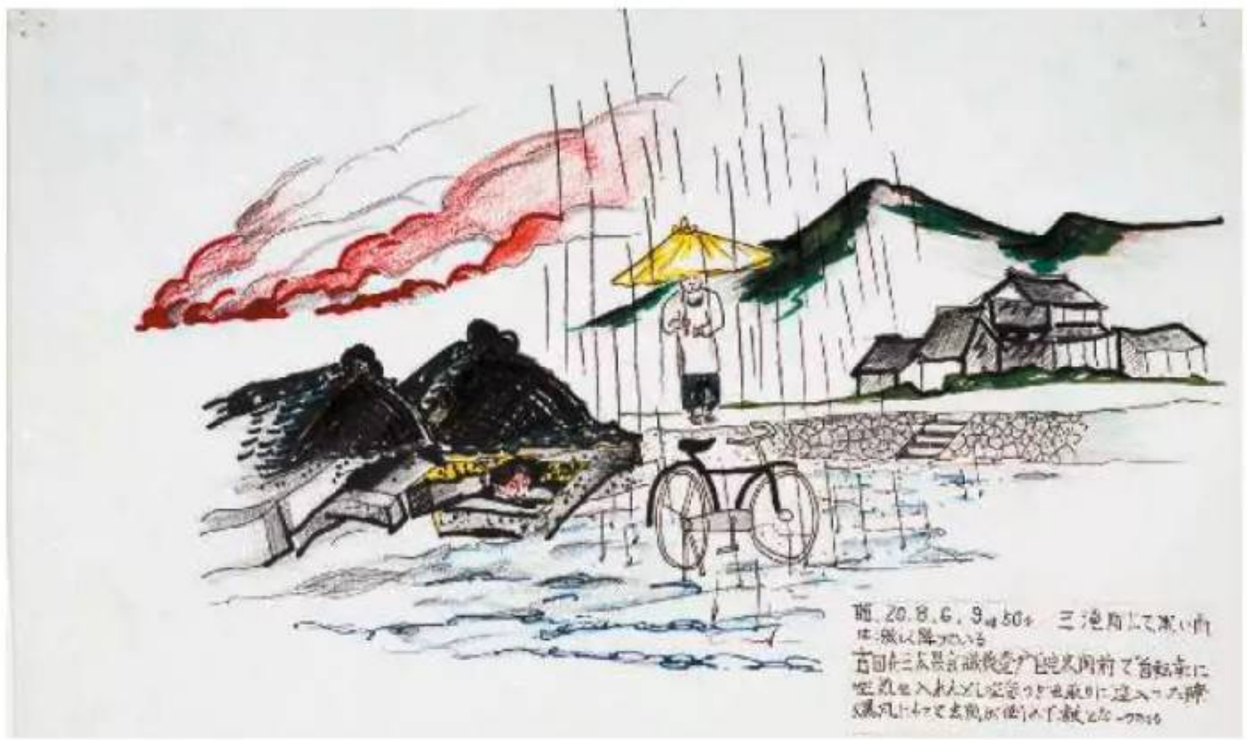


& NAGASAKI

Par Aimie Eliot

Ville soufflée

Les deux cités de l'ouest du pays sont réduites en cendre, soufflées par l'explosion. Seules quelques structures en béton résistent – comme le dôme du Genbaku, vestige du Hall de la promotion des industries de la Préfecture d'Hiroshima, élevé en 1914 – à la différence de celles en bois, qui composent majoritairement le bâti au Japon. À Hiroshima, l'absence de reliefs, qui à Nagasaki vont amortir l'impact de la bombe, s'avère dévastatrice. Les dégâts matériels et humains sont colossaux.





NISHIDA TERUMI / HIROSHIMA PEACE MEMORIAL MUSEUM - SADAO OSHITA / HIROSHIMA PEACE MEMORIAL MUSEUM

Pluie noire et vêtements lacérés

Au total, plus de 210 000 personnes (140 000 à Hiroshima, 74 000 à Nagasaki) perdent la vie. Nobuko Oshita a 13 ans lorsque survient l'attaque d'Hiroshima. Exposée à la bombe, elle décède dans la nuit de l'explosion, vêtue de son uniforme scolaire que sa famille lègue au musée en 1988 (à droite). D'autres, victimes des radiations, décèderont des mois ou des années plus tard. De nombreux témoignages, comme le dessin ci-dessus (à gauche), décrivent la pluie noire qui s'est abattue sur la région, quelques minutes après la bombe. Poisseuse, laissant des taches sur le corps, celle-ci se révèle chargée en substances radioactives. Ceux qui y furent exposés développent cataractes, leucémies, cancers et souffrent à long terme des radiations.



© YOSHITO KONISHI KIMURA / HIROSHIMA PEACE MEMORIAL MUSEUM

Tissu fantôme

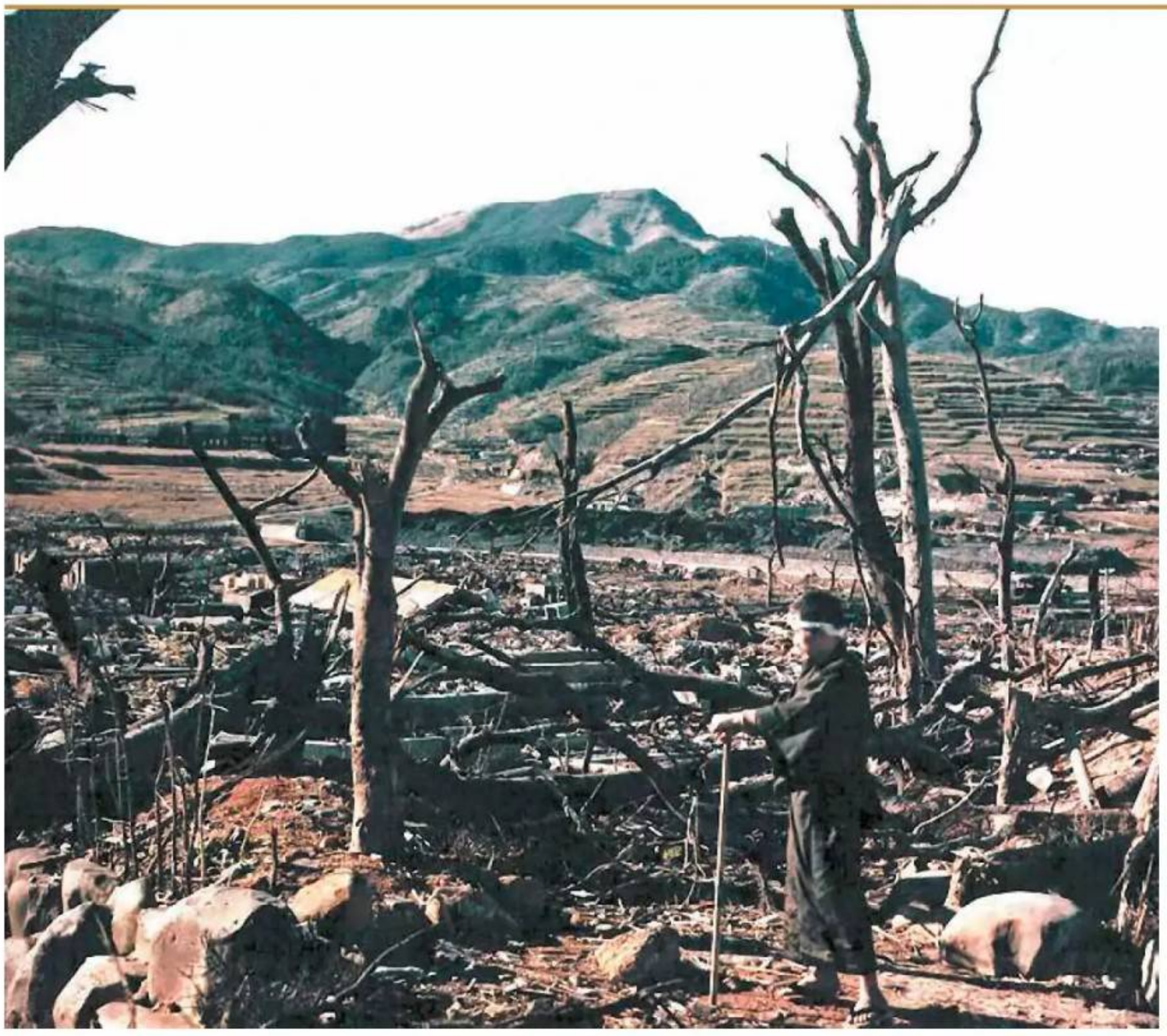
L'explosion marque les corps, comme celui de cette femme photographiée aux alentours du 15 août 1945 à l'hôpital militaire d'Hiroshima, et hante les esprits des survivants qui vivent un calvaire physique et moral. D'abord abandonnés à leur sort, les *hibakusha* sont ostracisés, parfois rejetés par leur famille ou leur conjoint : on craint que l'irradiation à laquelle ils ont été exposés soit contagieuse.

Alors que les premières aides se mettent en place en 1957 – premier pas vers la reconnaissance juridique du statut d'*hibakusha*, que le Japon continue d'attribuer –, nombreux sont ceux qui préfèrent taire leur passé, tentant de se fondre en silence dans la société. La création en 1995 d'un projet gouvernemental de collecte des témoignages aidera à libérer la parole qu'on cherche aujourd'hui à préserver, la moyenne d'âge des survivants dépassant aujourd'hui les 85 ans. En marge du programme des successeurs (voir *Fumée rose*, p. 60), des initiatives font actuellement appel à l'intelligence artificielle pour créer des avatars d'*hibakusha*, capables de répondre à des centaines de questions.



Du drame à la lutte

Le 9 août 1945, la ville côtière de Nagasaki est à son tour frappée par la bombe atomique. 11 ans plus tard naît Nihon Hidankyo, une association qui réunit les victimes de la bombe atomique et plaide, dès ses débuts, pour l'abolition des armes nucléaires. L'organisation a largement contribué à l'élaboration du traité sur leur interdiction, entré en vigueur en 2021. Prix Nobel de la paix en 2024, elle appelle aujourd'hui à préserver la mémoire des *hibakusha*, dont l'âge moyen dépasse les 85 ans.



Radiologiste irradié

Le docteur Takashi Nagai devant les ruines du quartier de Matsuyama, à Nagasaki. Radiologiste converti au catholicisme, il ouvre un dispensaire pour soigner les victimes de la bombe, et prend la plume pour décrire les blessures causées par l'irradiation et ce qu'il nomme les «maladies atomiques». Il publie en 1949 *Les Cloches de Nagasaki*, l'un des premiers témoignages de l'horreur nucléaire, d'un point de vue médical. Atteint d'une leucémie, le médecin s'éteint en 1951 à l'âge de 43 ans.

HIROMICHI MATSUDA / AKG-IMAGES - AKG-IMAGES

STRATÉGIE NUCLÉAIRE

En détruisant Hiroshima, puis Nagasaki, la bombe A inaugure une ère nouvelle : celle où l'humanité a le pouvoir de s'anéantir elle-même. Cette arme redoutable constitue dès lors le pivot de l'équilibre de la terreur.

GUERRE FROIDE

Le 6 août 1945, à 8 h 15, le bombardier américain *Enola Gay* largue la bombe atomique « Little Boy » sur Hiroshima. En un éclair, la ville est réduite en cendres, faisant près de 140 000 victimes. Trois jours plus tard, Nagasaki subit le même sort. La capitulation du Japon, le 15 août, marque la fin de la Seconde Guerre mondiale, mais aussi le début d'une ère où il ne fait plus aucun doute que l'humanité détient le pouvoir de s'autodétruire. Les survivants d'Hiroshima, les *hibakusha*, décrivent un enfer sans précédent : des corps fondus, des ombres humaines gravées dans le béton, des pluies noires radioactives. Des années plus tard, le physicien Robert Oppenheimer, père de la bombe, citant la *Bhagavad-Gītā*, la Bible de l'hindouisme, déclarera : *« Je suis devenu la Mort, le destructeur des mondes. »* Comment justifier l'existence d'une arme capable d'effacer des civilisations en quelques secondes ?

Dès le 9 août 1945, le président Harry Truman déclare : *« Nous avons découvert la plus terrible des armes… et nous devons en être les gardiens. »* Les États-Unis, seuls détenteurs de la bombe atomique jusqu'en 1949, croient en leur suprématie sur le monde. Mais cette illusion se fracasse le 29 août 1949, lorsque l'URSS teste sa première bombe A, « RDS-1 », au Kazakhstan. L'espionnage a joué ici un rôle clé : le physicien Klaus Fuchs, qui a travaillé sur le projet Manhattan américain, a transmis des informations secrètes aux Soviétiques. *« Staline voyait la bombe comme un moyen de survie face à l'Occident »*, souligne Benoît Pelopidas, professeur en études de sécurité à Sciences Po. Par conséquent, l'URSS a massivement investi dans son complexe militaro-industriel. Notamment avec la ville secrète d'Arzamas-16, isolée du monde et peuplée de scientifiques surveillés 24 heures sur 24, qui constitue à compter de 1946 le cœur de la recherche nucléaire soviétique.

La décennie suivante est marquée par une escalade technologique effrénée. En 1952, les États-Unis testent « Ivy Mike », première bombe H (à hydrogène), 500 fois plus puissante que celle qui a rasé Hiroshima. L'URSS réplique en 1955 avec sa propre bombe H. La puissance destructrice atteint des sommets : en 1961, la « Tsar Bomba » explose avec une force de 50 mégatonnes, soufflant des vitres à 900 km de distance. Le dirigeant soviétique, Nikita Khrouchtchev, se vante : *« Nous avons une bombe comme on n'en a jamais vu ! »* Les essais nucléaires s'enchaînent – 1 032 pour les États-Unis, 715 pour l'URSS –, irradiant à tout va populations et espaces naturels. En 1954, l'essai américain Castle Bravo, mené sur l'atoll de Bikini, libère une explosion deux fois plus forte que prévu. Les retombées radioactives



AKG-IMAGES

La boule de feu s'élève dans le ciel au cours du tir nucléaire Grable, le 25 mai 1953. Tirée depuis un canon atomique de 280 mm, cette ogive de 15 kilotonnes marque la première utilisation de l'artillerie nucléaire de l'histoire. Le test, mené à Frenchman Flat (Nevada), s'inscrit dans l'opération Upshot-Knothole.



Tanks de l'US Army face aux chars soviétiques à Berlin, en 1961, au cœur de la Guerre froide et de la période de dissuasion nucléaire.

contaminent l'équipage d'un bateau de pêche japonais, déclenchant un scandale international, sans toutefois remettre en cause la pertinence de la course à l'armement. *« L'atome a imposé l'idée perverse que les catastrophes acceptables existent,* juge l'historien des sciences Jean-Baptiste Fressoz. *Les irradiés de Bikini en sont les martyrs invisibles. »*

DISSUASION NUCLÉAIRE

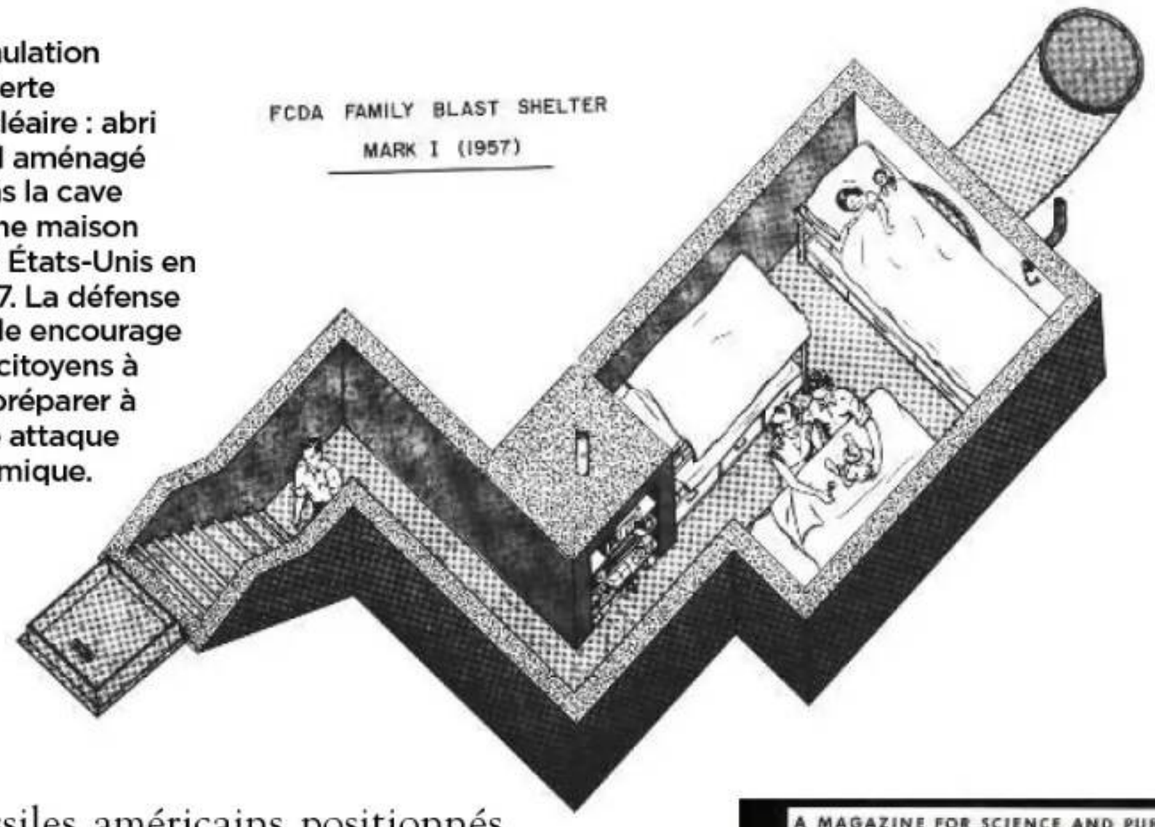
C'est dans ce contexte que naît la théorie de la « destruction mutuelle assurée » (MAD). L'idée ? Aucun camp ne peut attaquer sans risquer l'anéantissement. Le général américain Curtis LeMay, architecte de la dissuasion nucléaire américaine, résumait sa doctrine par une formule choc : *« Nous les réduirons en cendres. »* En 1957, les missiles intercontinentaux (ICBM) et les sous-marins nucléaires viennent encore renforcer l'arsenal de dissuasion. En 1960, les États-Unis comptent 18000 ogives, l'URSS 1600. Les silos sont dissimulés dans des plaines du Dakota ou des forêts sibériennes. Des sous-marins équipés de missiles Polaris patrouillent dans les océans, invisibles et prêts à frapper. Cette stratégie est fondée sur une logique implacable : plus les armes sont nombreuses, plus la paix est stable. Mais est-ce bien certain ? *« La dissuasion nucléaire repose sur une double illusion : l'illusion du contrôle total sur l'arme et l'illusion de la maîtrise parfaite de la crise,* décrypte Benoît Pelopidas. *L'histoire est parsemée d'incidents qui auraient pu tourner au désastre, ce qui révèle notre vulnérabilité à l'erreur humaine et technique. »*

La crise des missiles de Cuba marque le paroxysme de cette logique. En octobre 1962, des clichés aériens révèlent des missiles soviétiques disposés à seulement 200 kilomètres des États-Unis… Pendant treize jours, le monde retient son souffle. Les dirigeants américain et soviétique, John F. Kennedy et Nikita Khrouchtchev, négocient dans une atmosphère de tension extrême. *« Nous étions à un doigt de la guerre nucléaire »,* confiera plus tard Robert McNamara, secrétaire américain à la Défense. *« La dissuasion reposait sur un pari insensé : la rationalité des bourreaux,* déplore Bruno Tertrais, directeur adjoint de la Fondation pour la recherche stratégique. *Cuba a montré que l'erreur humaine planait comme une épée de Damoclès. »* Le drame est heureusement évité, et les Soviétiques acceptent de se retirer en échange du démantèlement de

U.S. ARMY CENTER OF MILITARY HISTORY



Aménagement d'un abri antiatomique dans un jardin américain, 1961. À l'apogée de la guerre froide, de nombreuses familles s'équipent de bunkers résistants aux explosions et aux retombées radioactives.



Simulation d'alerte nucléaire : abri civil aménagé dans la cave d'une maison aux États-Unis en 1957. La défense civile encourage les citoyens à se préparer à une attaque atomique.

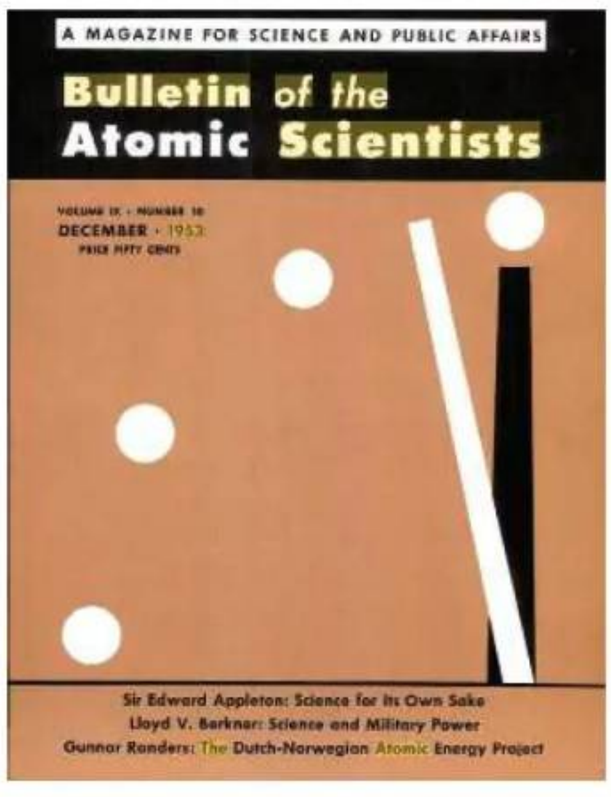
missiles américains positionnés en Turquie.

Pendant ces années d'extrêmes tensions, d'autres pays rejoignent le club nucléaire : le Royaume-Uni (1952), la France (1960), la Chine (1964). Chacun justifie sa bombe par l'objectif de dissuasion. En 1960, le général de Gaulle clame : *« Un pays comme la France, s'il lui arrive de faire la guerre, doit la faire à son compte. […] Il est inconcevable qu'elle n'ait pas les moyens atomiques. »* La Chine, après sa rupture avec l'URSS, teste sa première bombe A dans le désert du Xinjiang. Pendant ce temps, au sein des populations, l'angoisse monte. Aux États-Unis, les écoliers s'entraînent à se cacher sous leurs bureaux. En URSS, des abris antiatomiques sont construits, tandis que des manuels enseignent comment survivre à une attaque. La menace nucléaire plane comme une ombre sur la création culturelle. *« L'angoisse nucléaire a structuré l'imaginaire occidental,* retrace Jean-Baptiste Fressoz. *Des films comme* Docteur Folamour (1964), *de Stanley Kubrick, où un général américain déclenche une guerre atomique par mégarde, révèlent une psychose collective : la peur d'une apocalypse fabriquée par l'homme. »* La littérature explore aussi ces angoisses, comme le roman *Le Dernier Rivage* (1957), de Nevil Shute, qui dépeint un monde postapocalyptique. Quant à la revue scientifique *Bulletin of the Atomic Scientists*, elle publie dès 1947 un baromètre de l'anxiété sous la forme de son « Horloge de l'Apocalypse », sur laquelle minuit représente la fin du monde – elle sera avancée à 23 h 58 en 1953, après les premiers essais de bombe H.

TRAITÉ DE NON-PROLIFÉRATION

Malgré le traité de non-prolifération des armes nucléaires (TNP), signé en 1968 – 191 États en sont aujourd'hui parties prenantes –, la course se poursuit jusqu'aux années 1980. Car cette pierre angulaire du contrôle des armements n'a pas mis fin à toutes les tensions. *« Le TNP cristallise les frustrations d'un ordre nucléaire jugé inéquitable par les États non dotés de la bombe, tout en peinant à freiner les ambitions de certains proliférants ou les modernisations massives des arsenaux existants »*, analyse l'expert en stratégie nucléaire Frédéric Gloriant (Nantes Université). Durant cette période, le monde frôle plus d'une fois la catastrophe. En 1983, le lieutenant-colonel soviétique Stanislav Petrov sauve l'humanité d'une destruction certaine en ignorant une fausse alerte au missile. *« L'ordinateur disait "attaque en cours", mais mon instinct me disait le contraire »*, explique-ra-t-il après-coup. Mais malgré tout, les États n'ont toujours pas renoncé à l'arme nucléaire. Aujourd'hui, environ 12 500 ogives subsistent. Les arsenaux se sont certes amenuisés, mais les risques persistent, comme le montre la prolifération en Corée du Nord ou en Iran. *« La dissuasion nucléaire reste un rempart contre les grandes guerres, mais elle est fragilisée,* conclut Bruno Tertrais. *S'il fallait tirer une leçon du siècle passé, ce serait que l'équilibre de la terreur ne fonctionne qu'entre acteurs rationnels… et encore. »*

Cécile Gérardin



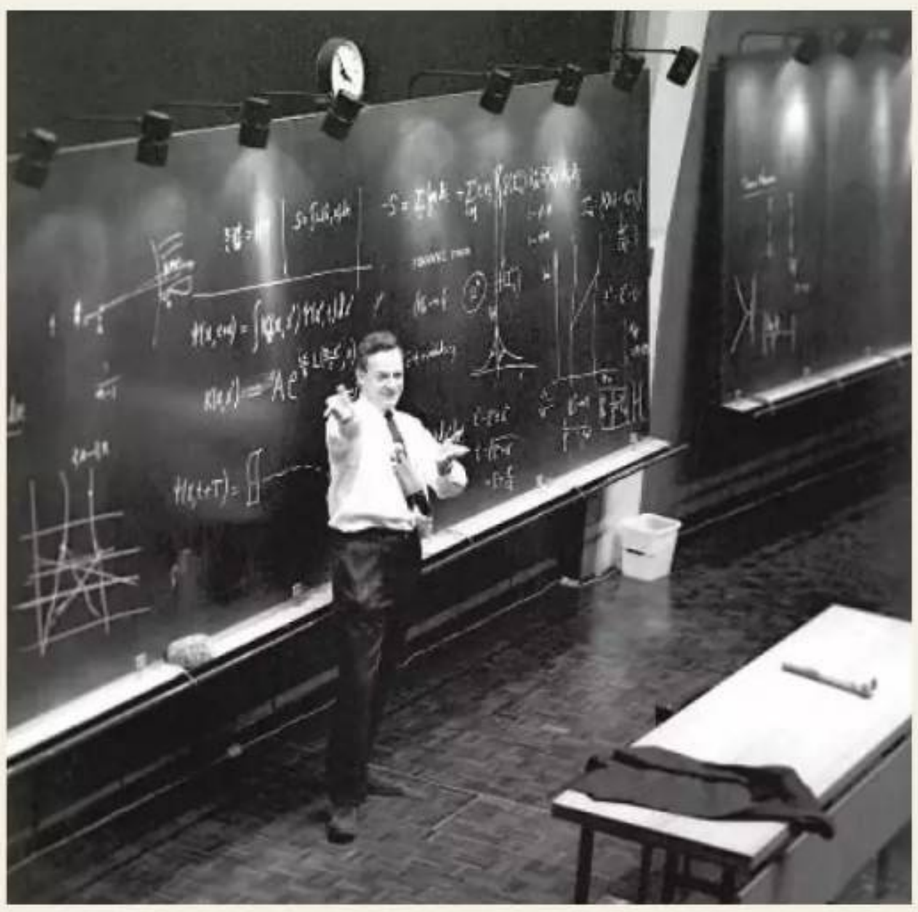
L'« Horloge de l'Apocalypse » du *Bulletin of the Atomic Scientists*, avancée à 23 h 58 en 1953 après les premiers essais de bombe H.

INTERFOTO / FRIEDRICH / AURIMAGES - AKG-IMAGES - DR

RICHARD FEYNMAN, LE FAN DE PARTICULES

De l'ère de la bombe atomique à l'électrodynamique quantique, il a révolutionné la physique de la fin du XX^{e} siècle. Portrait d'un électron libre.

En cette année 1943, l'Américain Richard Feynman n'est encore qu'un jeune thésard de 25 ans. Brillamment diplômé du département de physique de l'Université de Princeton, il vient de rejoindre l'équipe du Manhattan Project, basée à Los Alamos, au Nouveau-Mexique. Aux côtés de la fine fleur des scientifiques américains et des physiciens européens ayant fui le fascisme, il a été recruté pour contribuer à la course pour la bombe atomique contre l'Allemagne nazie. Loin de se contenter de tâches subalternes, il y dirige un groupe de calcul et se distingue – déjà – par sa capacité à résoudre des équations complexes. Le 16 juillet 1945, il assiste à l'explosion de Trinity, le nom de code donné au premier essai de la bombe A sur le champ de tir d'Alamogordo. « *Le seul*, fanfaronne-t-il, *à ne pas avoir porté les lunettes de protection distribuées à tout le monde* ». Le pare-brise d'un camion lui aurait suffi à filtrer les dangereux rayons ultraviolets.



Richard Phillips Feynman (1918–1988), physicien américain, théoricien de l'électrodynamique quantique.

PIONNIER ET VULGARISATEUR

Figure flamboyante de la physique du XX^{e} siècle, Richard Feynman est né en 1918 dans l'État de New York de parents d'origine polonaise et russe et de confession juive. Enfant durant la Grande Dépression, il s'amusait à réparer les radios des voisins et avait fabriqué un petit laboratoire pour mener des expériences électroniques. Dans le privé, l'homme séduit par son physique à la *Actors Studio* et son excentricité. Doté d'un humour ravageur et passionnément curieux, il aime autant les énigmes que la musique – il joue du bongo – et se plaît à défier les conventions. Son esprit libre et son goût pour la provocation intellectuelle font de lui un interlocuteur apprécié du Danois Niels Bohr, avec qui il débat sans crainte. Après la guerre, il refuse le prestige de Princeton pour enseigner à Cornell, puis au Caltech, préférant l'inspiration que lui procure l'enseignement à la seule recherche. Ce qui ne va pas empêcher Richard Feynman de révolutionner la physique par ses travaux en électrodynamique quantique, en étudiant la façon dont la lumière et la matière interagissent. Il invente les célèbres diagrammes qui portent son nom, outils devenus indispensables pour visualiser les interactions entre particules. Son approche intuitive et graphique simplifie des calculs réputés inaccessibles, ouvrant la voie à de nouvelles découvertes. Il s'intéresse à la superfluidité de l'hélium et à la théorie des interactions faibles, anticipant la découverte des bosons responsables de ces forces fondamentales. Co-lauréat du prix Nobel 1965 avec le physicien japonais Sin-Itiro Tomonaga et vulgarisateur hors pair, Richard Feynman a publié des ouvrages devenus cultes, comme *Le cours de physique de Feynman*. On le retrouve également en 1986, au cœur de l'enquête sur l'explosion de la navette Challenger. Fidèle à son style, il révèle une défaillance que la hiérarchie de la NASA avait ignorée : il plonge alors, devant les caméras, un morceau de joint torique dans un verre d'eau glacée, et en démontre ainsi la fragilité. Génie rebelle et dompteur d'infinis, il rappelait souvent, avec malice : « *Je pense que je peux dire sans risque que personne ne comprend la mécanique quantique.* »

P.D.

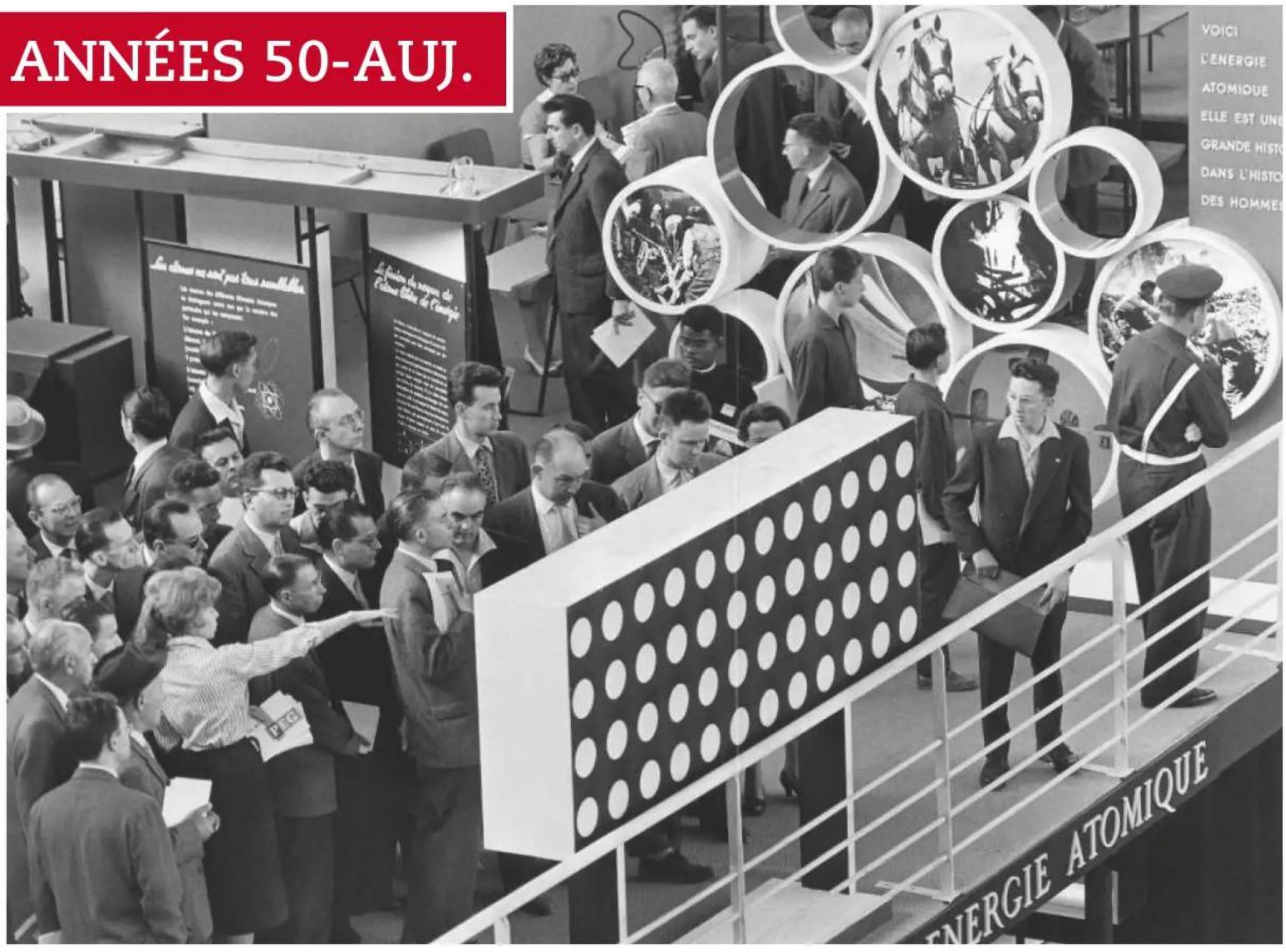
À LIRE

Vous voulez rire, Monsieur Feynman, Richard P. Feynman, Odile Jacob, 2000.

AKG-IMAGES /SCIENCE PHOTO LIBRARY

ÉNERGIE « ILLIMITÉE » ET EXCEPTION FRANÇAISE

ANNÉES 50-AUJ.



AKG-IMAGES / PAUL ALMASY

Après Hiroshima, l'atome change de visage : désormais présenté comme une source d'énergie illimitée et propre, il devient une réalité technique. La France mise tôt sur le nucléaire civil, promesse d'une transition énergétique durable. En réaction, le mouvement anti-nucléaire voit le jour – l'un des plus importants d'Europe – qui lance l'alerte sur les risques sanitaires et environnementaux d'une technologie peu éprouvée et difficile à contrôler.

Après Hiroshima et Nagasaki, le monde entre dans l'âge nucléaire : une course à l'arme atomique s'engage alors entre les deux grandes puissances victorieuses, devenues rivales. Alors que l'URSS fait exploser sa première bombe atomique en 1949, les Etats-Unis renchérissent et mettent au point la bombe H, bientôt maîtrisée par les Soviétiques. La France, la Grande-Bretagne puis la Chine leur emboîtent le pas et développent leur propre programme nucléaire, une nécessité géopolitique en temps de guerre froide, considère-t-on. Celui-ci est militaire, mais aussi civil. *« Dès l'Entre-deux-guerres, une vision positive, au-delà de son utilisation militaire, émerge. On perçoit les possibilités du nucléaire, et on réalise que cette technologie peut avoir une utilité »*, souligne Yves Bouvier, historien de l'énergie et professeur d'histoire contemporaine à l'Université de Rouen Normandie.

À l'aube de la Seconde Guerre mondiale, des scientifiques européens avaient déjà posé les bases du fonctionnement d'un réacteur nucléaire pour produire de l'énergie. Son industrialisation débute après la guerre : les États-Unis produisent la première énergie d'origine nucléaire en 1951, promue par le président Eisenhower qui, avec son programme *Atoms for Peace* en 1953, se propose de partager la technologie avec le reste du monde. L'URSS, le Japon et l'Europe s'engagent alors sur la voie du nucléaire civil dès les années 1950.

UNE FRANCE « PIONNIÈRE »

Le Général de Gaulle en est convaincu : cette nouvelle forme d'énergie a de l'avenir. Quelque mois à peine après le drame japonais, il met sur pied le Commissariat à l'énergie atomique (CEA), puis crée EDF en 1946, qui doit permettre son industrialisation. Le nucléaire, considèrent alors ses promoteurs, fait partie du patrimoine scientifique d'une France pionnière, qu'il faut valoriser : *« Avec Henri Becquerel puis Pierre et Marie Curie, il y a une symbolique forte : l'atome représente le symbole de la gloire française et devient progressivement garant de sa puissance. Lorsque la France perd son rayonnement avec les décolonisations, elle cherche quelque part à remplacer son pouvoir d'empire par un autre type de pouvoir »*, estime Sezin Topcu, sociologue des sciences et des techniques. Les espoirs sont grands du côté de l'industrie naissante et le discours utopiste américain se répand en France. *« Le mythe d'une énergie peu chère, qui coulera à flots et qui aura de nombreux usages – dans le secteur des transports, de la santé, etc. – émerge »*, énumère la chercheuse.

Sacralisée par le gouvernement et les industriels, elle inquiète ses détracteurs. Dès les années 1950, les premières voix s'élèvent contre l'usage civil du nucléaire : on redoute les accidents, et son impact environnemental. En France, l'opposition grandit au début des années 1970, lorsque le plan Mesmer accélère le programme national.

Centrale nucléaire de Cruas-Meyesse (EDF) dans le département de l'Ardèche. Les quatre réacteurs à eau sous pression de la centrale nucléaire de Cruas sont refroidis au moyen de quatre tours aérofrigérantes et d'eau du Rhône.



TÊTE DE FILE

« La fonction de tout gouvernement est de répondre à l'urgence. Son devoir est, plus encore, de préparer l'avenir. La sécurité, l'économie exigent que la France soit aussi indépendante que possible pour la production d'énergie. » Dans son discours à l'Institut de France, le Premier ministre Pierre Mesmer divulgue en 1974 son grand programme dédié à faire de la nation une puissance atomique mondiale. 200 réacteurs à l'horizon 2000, prévoit-il : *« C'est le projet le plus ambitieux au monde sur le plan de la construction de centrales nucléaires »*, souligne Sezin Topçu. *« Tout électrique, tout nucléaire »*, résume un slogan de l'État, marquant sa volonté de ne plus dépendre des hydrocarbures, au lendemain du choc pétrolier. *« Le nucléaire devient aussi une réponse à la production nationale de charbon qui décline et doit prendre le relais de l'équipement hydroélectrique, tandis que la demande en électricité augmente fortement »*, souligne Yves Bouvier. Persuadée que le salut se trouve du côté de l'atome, la France envisage alors de devenir non seulement un grand exportateur d'électricité, mais aussi des technologies : *« On vise alors la maîtrise de l'ensemble du cycle nucléaire »*, observe Sezin Topçu. Parce qu'il est lancé *« sans consultation ni même information du public, qu'il fait partie d'un complexe militaro-industriel et qu'il se base sur des technologies à haut risque encore non éprouvées »*, poursuit la chercheuse, le programme nucléaire civil devient la cible des mouvements écologistes qui naissent à la fin des années 1960. *« Bientôt Hiroshima dans votre jardin ! »*, clame la couverture du périodique écologiste et antinucléaire *La gueule ouverte* du 20 novembre 1974. La grogne prend de l'ampleur et s'étend au milieu scientifique, qui devient lanceur d'alerte. En 1975, 4000 scientifiques signent une pétition publiée dans *Le Monde*, alarmant les citoyens sur le projet et en particulier sur la question non résolue de la gestion des déchets nucléaires. *« Ils se positionnent comme contre-experts du mouvement antinucléaire*, souligne

Le Commissariat à l'énergie atomique expose au salon de l'industrie électrique, en 1963. À l'époque, le nucléaire civil symbolise un avenir propre, rationnel et souverain.

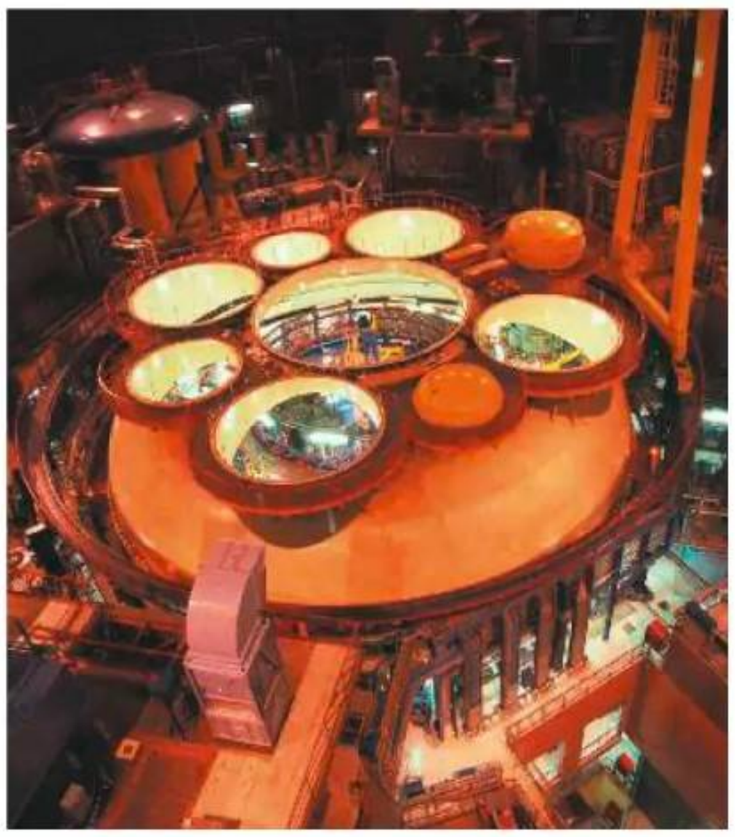
AKG-IMAGES / MATTHIAS LÜDECKE

Sezin Topçu, *car à l'époque, EDF et l'État mènent une campagne massive de minimisation des risques et pendant longtemps gardent secrètes les informations liées à la sécurité et au coût économique du programme.* »

UNE OPPOSITION QUI S'ESSOUFFLE

Fessenheim, Flamanville : les mobilisations se répandent autour des sites. Celles de Creys-Malville, où le projet Superphénix doit être développé, cristallisent le conflit. D'un côté, les antinucléaires contestent une « *utopie technicienne* » dangereuse. De l'autre, les promoteurs du Plan Messmer y voient le moyen de mettre un terme au problème énergétique de l'Europe, dont les réserves d'uranium s'amenuisent. Face aux mobilisations, l'État minimise les risques, souligne Sezin Topçu : « *Le ministre de l'Industrie Michel d'Ornano va prétendre qu'on peut faire tenir les déchets de l'ensemble du programme nucléaire dans une piscine olympique !* » La tension monte : les manifestations aux quatre coins du pays sont réprimées par la police. À Creys-Malville, un militant sera tué.

C'est un tournant, estime la spécialiste : « *Le mouvement perd ses repères dans les modes d'action à adopter* », tandis que les chantiers se développent à vitesse grand V : « *À partir de 1975, 6 voire 7 chantiers sont mis en place tous les ans, les enquêtes publiques ne durent que quelques mois et les études d'impact environnemental ne sont pas encore obligatoires* », rappelle la chercheuse. « *Il devient alors difficile de s'opposer aux projets lorsqu'ils sont déjà mis en route* », résume Yves Bouvier. Autre raison du déclin des mobilisations : les espoirs qu'avait suscités la candidature de François Mitterrand sont douchés lors de son arrivée au pouvoir. Président, celui-ci renoncera finalement à la mise en place d'un moratoire sur les projets de centrale, ainsi que sur le projet d'extension du site de traitement des déchets radioactifs de la Hague. « *Seule exception : le projet du site de Plogoff en Bretagne, où on assiste à une quasi-guerre, l'armée ne parvenant pas à évacuer les riverains qui occupent les lieux* », raconte Sezin Topçu. Le débat nucléaire cesse alors d'être un conflit entre la gauche et la droite et un certain silence s'installe : « *Les mouvements nucléaires n'ont alors pas de représentations politiques, ce qui contribue aussi à les fragiliser* », commente Yves Bouvier.



Superphénix, réacteur expérimental à neutrons rapides inauguré en 1986 à Creys-Malville (Isère).

À LIRE

***La France nucléaire. L'art de gouverner une technologie contestée*, Sezin Topçu, 2013, Seuil.**

La catastrophe de Tchernobyl amènera toutefois l'État et les industriels à faire preuve de transparence : « *Le secteur cherche à rassurer les populations*, souligne Yves Bouvier. *Des expositions et des débats publics sont organisés, des brochures pédagogiques sont distribuées, les industriels veulent faire valoir que la catastrophe de Tchernobyl est un accident soviétique qui ne peut avoir lieu en France, où les protocoles sont très différents* ». En parallèle, une nouvelle forme de militantisme naît, observe Sezin Topçu : « *On voit émerger des laboratoires associatifs, des collectifs de citoyens qui se chargent de mesurer la radioactivité des territoires, prenant en charge l'affaire nucléaire.* »

ÉNERGIE VERTE ET DÉCHETS RADIOACTIFS

Le secteur continue de faire l'objet de contestations durable. Et pourtant, l'opposition antinucléaire ne parvient pas à s'imposer, considère Yves Bouvier : « *À la différence de l'Allemagne, où la contestation est plus forte, et où elle a conduit à la limitation et au renoncement de projets de centrales, le système centralisé français et l'absence de parti antinucléaire affaiblissent l'opposition.* » De même, les sondages reflètent une opinion publique fluctuante. « *Si, après Fukushima, le nucléaire est à nouveau mis en cause, la crise économique et la situation géopolitique actuelle influent sur le débat. Chaque fois que les prix du pétrole et du gaz augmentent, les Français regardent leur porte-monnaie et considèrent que l'énergie nucléaire n'est pas parfaite, mais qu'elle permet de rester indépendant et garantit un prix de l'électricité stable* », considère Yves Bouvier. Les derniers sondages, selon l'historien, reflètent une opinion publique plutôt favorable au nucléaire, sensible au nouveau discours du secteur. Celui-ci présente en effet l'énergie comme une solution pour le climat, car faible productrice de gaz à effet de serre… L'épineuse question du traitement des déchets radioactifs continue, quant à elle, à se poser.

Aimie Eliot



CHAMUSSY / SIPA - HOUPLINE RENARD / SIPA

Manifestation contre la construction de la centrale de Creys-Malville, le 31 juillet 1977.

ANDREÏ SAKHAROV, BOMBE H & PAIX

Physicien nucléaire, puis militant des droits humains, Andreï Sakharov incarne une prise de conscience des risques de l'atome, à mesure que les grandes puissances cherchent à le maîtriser.



Andrei Sakharov, physicien soviétique et dissident, lors du premier Congrès des députés du peuple d'URSS, au Kremlin, début juin 1989. Prix Nobel de la paix et concepteur de la bombe H soviétique, il devient l'une des grandes figures morales de la perestroïka.

1943. Dans l'usine militaire d'Oulianov, un ingénieur fraîchement diplômé suscite l'admiration. Le jeune physicien Andreï Sakharov propose plusieurs inventions qui doivent paver la voie de l'URSS vers une meilleure défense du socialisme, considère-t-on. Son talent en croise un autre : Igor Tamm, prix Nobel de physique. En tandem, tous deux travaillent alors activement sur le programme nucléaire soviétique et forgent, enthousiastes, la première bombe thermonucléaire du régime, qui explose en 1953. *« À cette époque, Sakharov ne s'interroge pas encore. La Russie est sortie fragilisée de la guerre et le physicien patriote veut contribuer à munir son pays de la bombe, qui doit être dissuasive face aux Américains »*, souligne Laurent Coumel, enseignant-chercheur en histoire à l'Inalco.

Devenu académicien, il travaille alors sur Tsar Bomba, la bombe la plus puissante de tous les temps, lorsqu'il commence à s'interroger sur les conséquences de son travail : *« Il faudra près de dix ans pour que Sakharov soit convaincu que la bombe A – et surtout H – pose problème,* souligne l'historien. *Alors qu'il assiste à des essais nucléaires menés au Kazakhstan, il réalise le danger lié aux explosions, la pollution atmosphérique liée aux retombées radioactives s'étend aux sols, aux cultures et donc aux populations qui ne sont pas informées de ce qui se passe »*.

PROTÉGER LES POPULATIONS

Un tournant s'opère : Sakharov mesure sa responsabilité. *« Il va alors convaincre Khrouchtchev de signer le traité interdisant les essais d'armes nucléaires à Moscou, soulignant qu'on ne peut pas fermer les yeux sur les conséquences »*, raconte Laurent Coumel. En 1968, son grand manifeste publié dans le *New York Times* marque son entrée dans le mouvement de défense des droits humains. En URSS, le savant autrefois acclamé commence à déranger et est mis progressivement au ban de la science. Ses critiques vis-à-vis des autorités et ses actions au sein du Comité pour la défense des droits de l'Homme et de la défense des victimes politiques lui vaudront le Prix Nobel de la paix en 1975… Et d'être exilé de force par le régime, qu'il accuse de liberticide.

De la ville de Gorki, il continue de lutter contre le régime répressif soviétique et pour la fin de la course aux armements, multipliant les grèves de la faim et les interventions dans la presse. S'il est partisan du nucléaire civil, il militera pour que celui-ci soit strictement encadré. Dès 1985, dans un discours prononcé avant même la catastrophe de Tchernobyl, il suggère de construire des centrales souterraines, afin d'en limiter les risques pour les populations. *« Il proposera à Gorbatchev que les scientifiques participent à leur développement, considérant qu'ils doivent être associés à ce chantier »*, rappelle Laurent Coulmel. Autorisé à rentrer à Moscou en 1986, il s'éteindra trois ans plus tard, à la veille de l'effondrement de l'URSS.

A.E.

À LIRE

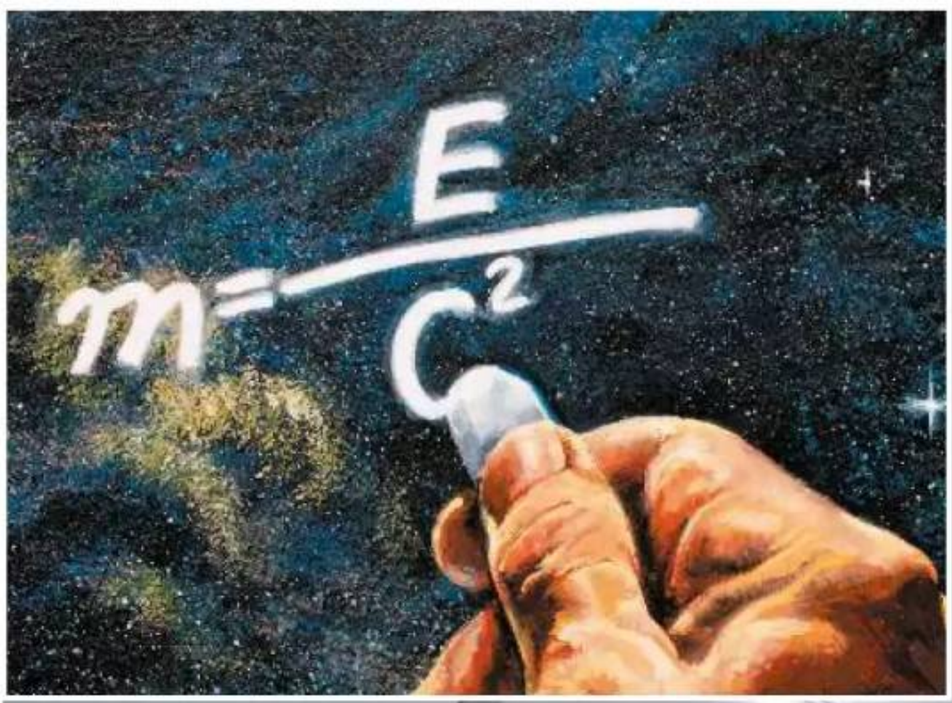
Tsar Bomba, les paradoxes d'Andreï Sakharov, Fabien Grolleau (scénario) et Cyril Elophe (dessin), Glénat, 2025.



TASS / AURIMAGES - GLÉNAT

XX^E SIÈCLE

PHYSIQUE QUANTIQUE, MOTEUR D'INNOVATION



La célèbre équation $E=mc^2$ d'Einstein : l'énergie (E) est équivalente à la masse (m) multipliée par le carré de la vitesse de la lumière (c). Ce principe est à la base de la libération de l'énergie nucléaire.

HERMA SILVER / AURIMAGES - CFOTO / SIPA USA / SIPA

Entamée à l'aube du XX^e siècle, l'étude du comportement des particules élémentaires est souvent perçue comme abstraite et éloignée de la réalité. La physique quantique a pourtant permis de développer de nombreuses technologies utilisées au quotidien et laisse entrevoir des innovations majeures dans le futur. Science-fiction mise à part !



À Huai'an, en Chine, un ouvrier fabrique des puces électroniques destinées aux téléphones mobiles, voitures et dispositifs LED.

Ce matin-là, Julie, la trentaine urbaine, passe à la caisse automatique de son supermarché habituel. D'un geste machinal, elle scanne son sandwich, sa salade et sa bouteille d'eau minérale. Le laser trace sa lumière rouge sur les codes-barres. Elle effleure le terminal de paiement avec sa carte bancaire et entend le bip rassurant de la transaction validée. Dehors, la pluie menace. Julie dégaine son smartphone, consulte la météo, lance un appel vidéo à sa mère pour annuler leur dîner. Elle ouvre son appli de transport, puis suit son GPS jusqu'à son premier rendez-vous. Une scène d'une banalité confondante dans nos sociétés. Beaucoup seraient surpris si on leur disait que c'est la mécanique quantique qui l'orchestre en arrière-plan. Et pourtant ! Les lasers des caisses sont des rejetons directs des théories lumineuses de la physique quantique. Les puces électroniques fonctionnent grâce aux électrons dans les semi-conducteurs. Les satellites GPS, qui guident les pas de Julie dans la ville, sont synchronisés par des horloges atomiques. Même la voix de sa mère, compressée, transmise et restituée par les réseaux numériques, voyage sur une infrastructure née d'intuitions quantiques du début du XX^e siècle.

La physique nucléaire, issue des recherches les plus fondamentales, repose sur les lois de la mécanique quantique pour modéliser les interactions entre noyaux atomiques. Elle est à l'origine de l'énergie nucléaire, mais aussi de nombreux usages médicaux. Depuis l'isolement du radium par Pierre et Marie Curie, en 1898, puis la découverte de la radioactivité artificielle par Frédéric et Irène Joliot-Curie, en 1934, les nouveaux traitements se sont multipliés. Dès 1941, l'iode 131, un isotope radioactif, est administré à des patients souffrant d'hyperthyroïdie, puis utilisé pour traiter les cancers de la thyroïde, une méthode toujours en vigueur aujourd'hui. Dans les années 1950, l'invention du cyclotron permet de produire en quantité des radioéléments, tandis que la gamma-caméra de Hal Anger (voir *Hal Anger, radioactivité et médecine*, p. 75) révolutionne l'imagerie médicale.

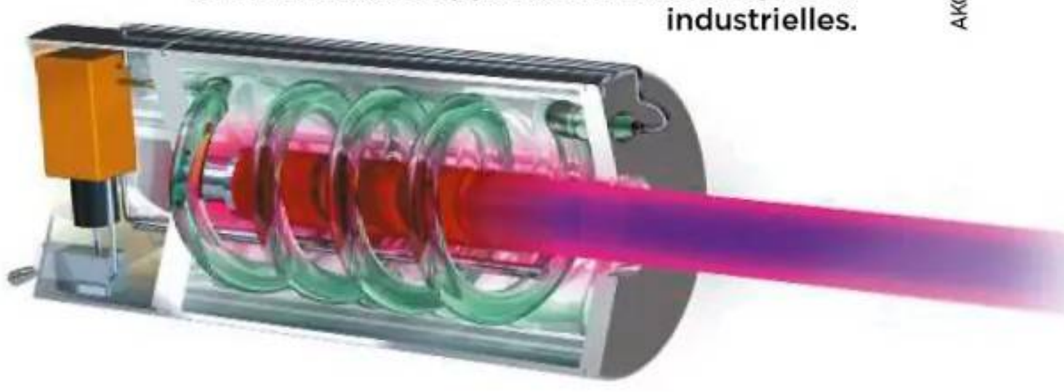
IRM, LASER, EFFET TUNNEL

Ces techniques, basées sur la détection de phénomènes radioactifs, cohabitent aujourd'hui avec d'autres outils d'imagerie tout aussi performants… et encore plus directement issus de la physique quantique. L'imagerie par résonance magnétique (IRM), par exemple, ne repose pas sur la radioactivité, mais sur l'interaction des spins des noyaux d'hydrogène avec un champ magnétique. Ce phénomène, purement quantique, permet d'obtenir des images précises des tissus mous, sans rayonnement ionisant. De quoi poser un diagnostic non invasif de maladies cardiovasculaires, neurologiques ou cancéreuses. Et, dans certains cas, des traitements ciblés, notamment pour la thyroïde ou la prostate.

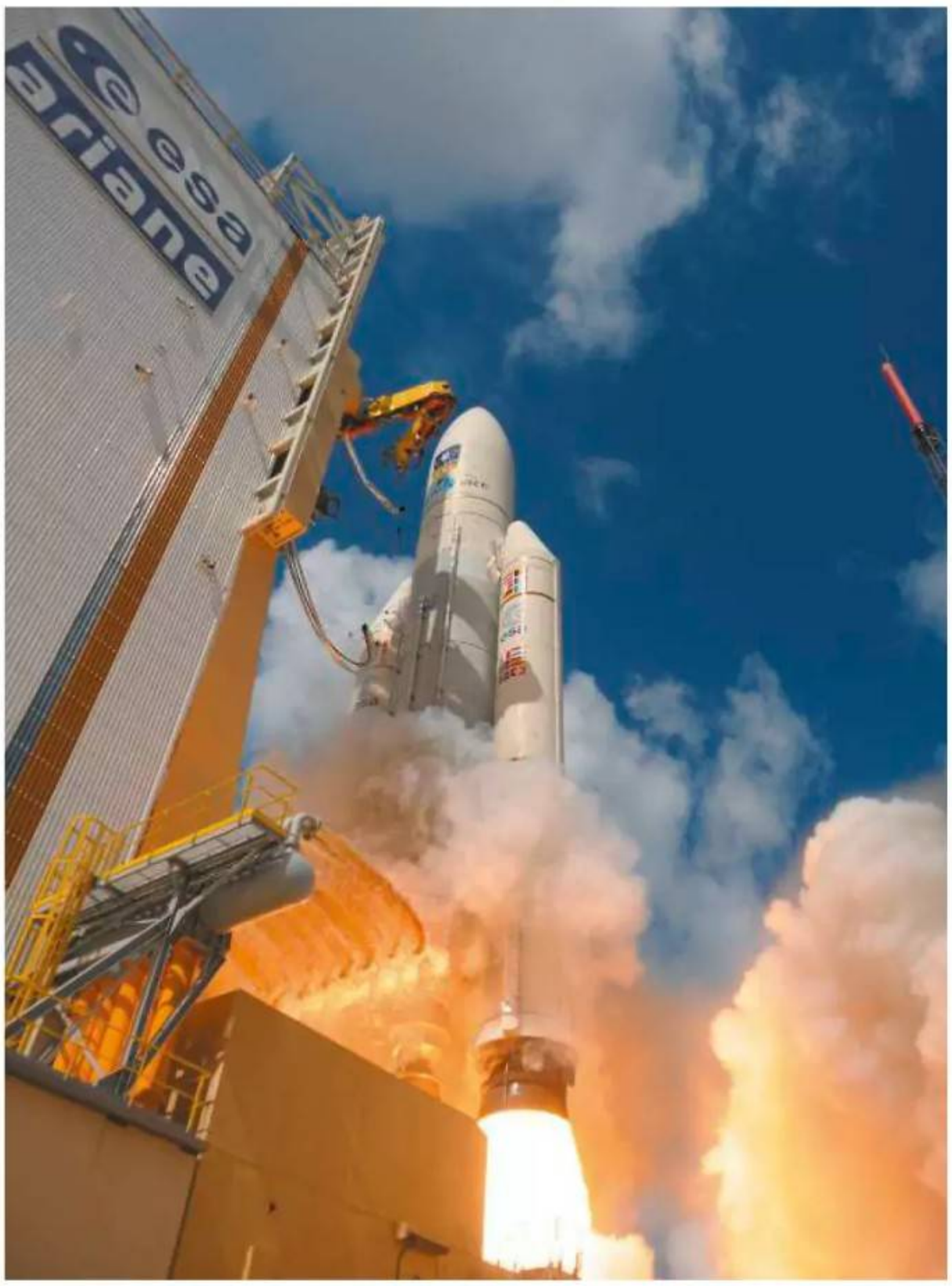
Et ce n'est qu'un début : les capteurs médicaux quantiques actuellement en développement pourraient bien révolutionner la médecine préventive et personnalisée.

Mais hors du cercle des spécialistes, qui sait que ces applications sont toutes issues de la physique quantique, celle-là même qui a donné naissance à la bombe H ? Le contraste est frappant entre la notoriété universelle d'un examen comme l'IRM et l'opacité de son origine. Même constat pour une autre invention emblématique : le laser. En 1960, le physicien américain Theodore Maiman réussit à

Représentation informatique du tout premier laser fonctionnel, mis au point par Theodore Maiman en 1960. Ce laser à rubis, développé en Californie, ouvre la voie à d'innombrables applications scientifiques et industrielles.



AKG / SCIENCE PHOTO LIBRARY



Un lanceur met en orbite un satellite Galileo, le GPS européen.

produire la première lumière laser à l'aide d'un cristal de rubis et d'une lampe flash. Appuyée sur des travaux théoriques d'Albert Einstein en 1917, son invention repose sur le principe de l'émission simultanée. Il s'agit d'exciter des atomes pour qu'ils émettent des photons identiques, puis d'amplifier cette lumière en la réfléchissant entre deux miroirs. Résultat : un faisceau intense et précis. Aujourd'hui, les lasers sont omniprésents dans la vie courante comme dans l'industrie. Sans eux, pas de lecteurs de codes-barres, d'imprimantes, de lecteurs DVD, de pointeurs, ni de découpe industrielle des matériaux, de chirurgie oculaire, de fibre optique… et donc pas d'Internet à haut débit… Étonnamment pourtant, la notoriété du laser reste quasiment exclusivement portée par la science-fiction et les sabres de *La Guerre des étoiles*. Pour un usage militaire que personne encore n'imagine sérieusement dans les laboratoires !

ESA

LE GPS NE FONCTIONNERAIT PAS SANS LES HORLOGES ATOMIQUES AU CÉSIUM EMBARQUÉES DANS LES SATELLITES

À LIRE

***Bienvenue dans la nouvelle révolution quantique*, Julien Bobroff, éd. Flammarion 2022.**

D'autres phénomènes quantiques, plus discrets encore, sont tout aussi décisifs. L'effet tunnel, par exemple, permet à une particule de franchir une barrière réputée infranchissable selon la physique classique. Ce principe alimente aussi bien le microscope à effet tunnel que certains composants électroniques.

GPS, SMARTPHONES, ORDINATEUR QUANTIQUE

Et que dire du GPS ? Encore un exemple d'une technologie universellement utilisée, mais dont l'origine quantique reste méconnue. Inventé dans les années 1970 par le ministère de la Défense américain pour un usage militaire, le *Global Positioning System* devient opérationnel pour le grand public en 1995. Grâce aux signaux radio émis par des satellites, un récepteur (placé dans un smartphone ou une voiture) calcule sa position exacte grâce à la triangulation. Ce système, qui a révolutionné la navigation, est aujourd'hui omniprésent dans nos vies : il guide nos trajets, permet le suivi des colis, la géolocalisation des smartphones, l'optimisation des transports, les activités sportives et même la recherche scientifique. Il a transformé notre rapport à l'espace et à la mobilité, rendant la localisation instantanée accessible à tous. Mais tout comme ses pendants européens (Galileo) et russe (Glonass), le GPS ne fonctionnerait pas sans les horloges atomiques au césium ultraprécises embarquées dans les satellites. Il se désynchroniserait en quelques minutes. « *De nos jours, ces horloges gouvernent le temps partout sur Terre. On l'ignore souvent, mais tous nos appareils électroniques se comparent à intervalle régulier à une référence commune, l'heure dite "UTC", un temps universel coordonné. Leur précision actuelle, près de 14 chiffres, suffit à déterminer notre position sur Terre à quelques centimètres près* », note le physicien et vulgarisateur scientifique Julien Bobroff dans *Bienvenue dans la nouvelle révolution quantique* (éd. Flammarion, 2022).

Et les smartphones ? Qu'il s'agisse des puces, de la mémoire, de la carte graphique ou des circuits audio et radio, tous ces composants reposent sur des semi-conducteurs – et donc, *in fine*, sur la mécanique quantique. La miniaturisation extrême de ces dispositifs ne fait que renforcer ce lien. Il en va de même pour nos ordinateurs, dont les puces empilent désormais des dizaines de milliards de transistors.

Mais, sur le plan de l'informatique, une autre révolution se profile : l'ordinateur quantique, sur lequel les recherches progressent de mois en mois. Alors

HAL ANGER, RADIO-ACTIVITÉ & MÉDECINE

En inventant la gamma-caméra, en 1957, il a ouvert la voie à l'imagerie médicale nucléaire qui permet aujourd'hui de diagnostiquer de nombreuses pathologies, du cancer aux maladies cardiaques.

« J'ai toujours été passionné par les sciences. À l'époque où j'étais lycéen, The University Explorer, l'émission sponsorisée par l'Université de Californie que j'écoutais régulièrement a présenté une grande innovation technique : le cyclotron, un appareil produisant des radionucléides capables de tracer et détruire les tumeurs. » Né en 1920 à San Francisco, Hal Oscar Anger est tout jeune diplômé d'ingénierie électrique à l'Université de Californie à Berkeley quand il rejoint le prestigieux Donner Laboratory, où il travaille sous la direction du Dr Ernest O. Lawrence, inventeur du cyclotron et prix Nobel de physique. Une collaboration qui le place au cœur des premières grandes avancées de la physique appliquée à la médecine, à une époque où la radioactivité ouvre de nouvelles perspectives thérapeutiques et diagnostiques.



Hal Anger et sa caméra à scintillation (ou gamma-caméra), 24 avril 1959.

CRISTAL SCINTILLANT

C'est dans cet environnement stimulant qu'Anger va déployer son ingéniosité. Dès les années 1950, il met au point le « well counter », un instrument permettant de mesurer la radioactivité dans les échantillons biologiques, encore utilisé aujourd'hui dans les laboratoires. Mais c'est en 1957 qu'il signe son invention majeure : la gamma-caméra, aussi appelée caméra à scintillation. Cet appareil permet, pour la première fois, de visualiser en temps réel la distribution de traceurs radioactifs dans le corps humain. Grâce à un cristal scintillant, la caméra transforme les rayons gamma émis par les radiopharmaceutiques injectés au patient en lumière, traduite ensuite en images médicales. L'impact est immense : la gamma-caméra devient rapidement l'outil central de la scintigraphie, un examen qui fournit des informations détaillées sur la thyroïde, le cœur, les poumons et permet le diagnostic précoce de pathologies comme le cancer ou les maladies cardiaques.

Sa technologie, restée fondamentalement inchangée, demeure le socle de l'imagerie scintigraphique et du SPECT, deux piliers de la médecine nucléaire moderne. Ces techniques d'imagerie fonctionnelle coexistent aujourd'hui avec d'autres, comme le PET scan, renforçant la capacité des médecins à détecter précocement les dysfonctionnements organiques.

D'abord commercialisée aux États-Unis, la gamma-caméra s'impose rapidement dans le monde entier. L'appareil imaginé par Anger reste aujourd'hui au cœur de nombreux examens médicaux de routine, et lui vaut de prestigieuses distinctions. Au-delà de ses inventions, Hal Anger est unanimement salué pour sa modestie et son humanisme. Ceux qui l'ont côtoyé soulignent sa volonté constante de mettre la technologie au service du patient, loin de toute recherche de gloire personnelle. Décédé en 2005 à Berkeley, Anger a légué à la médecine non seulement des instruments, mais aussi une éthique : celle d'un chercheur discret, ingénieux, toujours guidé par le souci d'améliorer la vie des autres.

P.D.

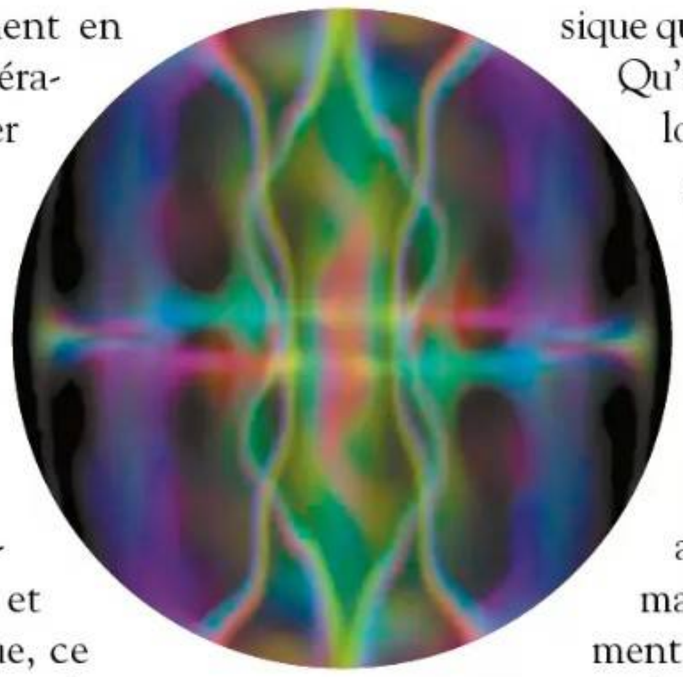
À LIRE

Histoire du radiodiagnostic, issue d'une base de connaissances à visée pédagogique, alimentée par des physiciens https://laradioactivite.com.

US NATIONAL ARCHIVES

que les ordinateurs classiques fonctionnent en mode binaire, les ordinateurs nouvelle génération utilisent des qubits qui, avant de donner leur résultat, peuvent prendre une infinité de valeurs. Capables de traiter simultanément bien plus d'informations, ils pourraient demain révolutionner l'analyse de données dans des domaines comme la chimie informatique, l'optimisation industrielle, l'intelligence artificielle ou la cryptographie. Patience et prudence toutefois. Si elle bénéficie d'un effet d'annonce et de la notoriété de l'informatique classique, ce type d'applications fait l'objet de débats entre chercheurs et n'est pas encore sorti des laboratoires. Rien ne permet d'affirmer que les recherches seront couronnées de succès et passeront à l'étape industrielle. Et si les recherches débouchent sur des applications utilisables, personne ne peut vraiment donner d'horizon temporel. Et encore moins affirmer que le grand public pourrait s'en emparer.

Malgré les incertitudes, certaines applications concrètes avancent. C'est le cas de la cryptographie quantique, qui s'appuie sur les propriétés physiques de la mécanique quantique – à ne pas confondre avec les algorithmes dits « post-quantiques », conçus pour résister aux attaques d'ordinateurs quantiques. Plus avancée encore est la recherche sur les matériaux quantiques, tels que les supraconducteurs, les isolants topologiques ou les condensats de Bose-Einstein. Ces états extrêmes, où les effets quantiques se manifestent à l'échelle macroscopique, ouvrent la voie à une nouvelle ingénierie du réel.



Simulation d'un tourbillon quantique dans un condensat de Bose-Einstein, état de la matière où des atomes ultra-refroidis se comportent comme un unique super-atome. Ce phénomène a été prédit en 1924-25 par Satyendra Nath Bose et Albert Einstein.

AKG-IMAGES / NIST /SCIENCE SOURCE - KITTIPONG JIRASUKHANONT / ALAMY / HEMIS

FUSION NUCLÉAIRE

Ce changement d'échelle rappelle une autre application, plus ancienne et controversée, de la physique quantique : la production d'énergie nucléaire. Qu'il s'agisse de fission ou de fusion, ces technologies reposent sur les lois quantiques qui régissent les interactions au sein des noyaux atomiques. Dès les années 1950, les chercheurs soviétiques sont parvenus à domestiquer la fission nucléaire, transformant la réaction en chaîne explosive de la bombe en une réaction contrôlée au cœur d'un réacteur. Cette technologie, perfectionnée au fil des décennies, équipe aujourd'hui la majorité du parc nucléaire mondial, et notamment français. Mais alors que l'Agence internationale de l'Énergie prévoit que la production pourrait doubler d'ici 2050, un nouveau Graal trotte dans toutes les têtes : la fusion nucléaire. Contrairement à la fission utilisée dans les centrales actuelles, elle consiste à fusionner des noyaux d'hydrogène pour produire de l'énergie, comme dans le Soleil. C'est dans ce contexte que s'inscrit le projet international de l'ITER, entamé en 2005 à Saint-Paul-lès-Durance, dans les Bouches-du-Rhône. L'objectif de ce réacteur civil à fusion nucléaire de type tokamak est d'ouvrir la voie à une énergie produite à partir de matériaux primaires très abondants sur terre, sans émission de gaz à effet de serre et avec des déchets radioactifs bien moindres que ceux de la fission. Là encore les horizons temporels sont délicats à évaluer. Peu de gens doutent que l'humanité bénéficiera un jour de la production en masse d'énergie par fusion nucléaire. Dans 20 ans, 50 ans, un siècle ? Personne ne le sait…

Pendant quasiment un siècle, la physique quantique est restée une affaire de chercheurs et de commentateurs hyperpointus. Depuis quelques années, elle réinvestit vigoureusement la sphère publique. Constat confirmé par Julien Bobroff : *« Depuis peu, la quantique occupe la Une de l'actualité. Politiques, investisseurs, médias, tous ne jurent que par les algorithmes quantiques (…). C'est qu'après des années de balbutiements, les physiciens parviennent à contrôler les atomes et les photons un par un ; ils peuvent aussi les intriquer, même à distance. Ce qui laisse envisager la seconde révolution quantique. Tous les secteurs pourraient en bénéficier – l'informatique, la chimie, la biologie, les finances, l'aéronautique, la cryptographie, le big data, l'intelligence artificielle et bien sûr aussi l'environnement. »* De fait, la physique quantique a déjà permis la mise au point de capteurs suffisamment fins pour prédire des catastrophes naturelles comme les tremblements de terre ou les éruptions volcaniques. Demain, l'ordinateur quantique, en analysant d'immenses quantités de données, pourrait aider à lutter contre le réchauffement climatique en trouvant comment capturer le CO_2. Rien n'interdit de rêver.

Pascale Desclos



Rendu 3D d'un ordinateur quantique installé dans un laboratoire.

DAVID DEUTSCH, CODEUR D'UNIVERS

Pionnier de l'informatique quantique et fasciné par ses ramifications philosophiques, il a ouvert la voie à une nouvelle compréhension du calcul et de la réalité.

« L'univers n'est pas là pour nous submerger : c'est notre maison et notre ressource. Plus c'est grand, mieux c'est. » Voilà le genre de petites phrases que le physicien David Deutsch, pionnier de l'informatique quantique, nous assène dans son livre *Le commencement de l'infini*, publié en 2016. Né en 1953 à Haïfa, ville côtière des bords de la Méditerranée, en Israël, ce septuagénaire dégingandé aux allures de *rocker* senior a grandi dans une famille juive avant de rejoindre Londres, où ses parents tenaient un restaurant. Élève curieux, il s'oriente vers les sciences naturelles à Clare College, Cambridge avant de poursuivre un doctorat en physique théorique à Oxford.



David Deutsch, né en 1953, physicien israélo-britannique pionnier de l'informatique quantique.

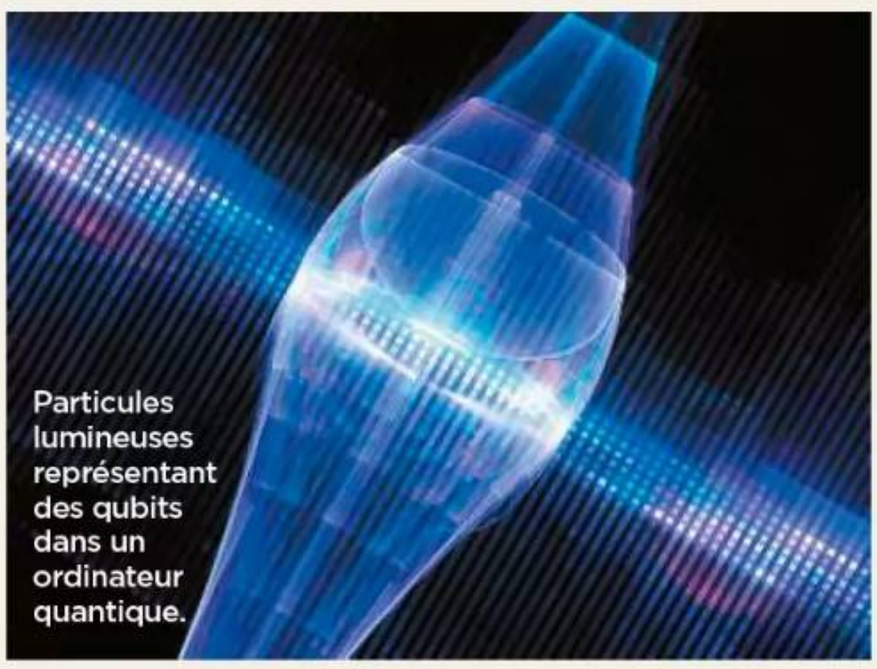
JEU D'INTERFÉRENCES

C'est dans cette prestigieuse université que Deutsch pose, dès 1985, les bases d'un nouveau domaine informatique. Il imagine un ordinateur capable d'exploiter les propriétés étranges de la mécanique quantique pour résoudre certains problèmes bien plus rapidement que les machines classiques. Avec le mathématicien australien Richard Jozsa, il conçoit un algorithme qui illustre ce potentiel : au lieu de tester une à une différentes valeurs d'entrée pour découvrir une règle cachée dans une « boîte noire », comme le ferait un ordinateur traditionnel, la version quantique place toutes les entrées possibles en superposition, comme si elle les testait toutes à la fois. Un jeu d'interférences lui permet alors d'extraire, en une seule opération, une information globale sur la règle appliquée – une prouesse impossible dans le monde classique.

Encore au stade du développement technologique, cette approche quantique représente un formidable levier pour l'analyse de données dans des domaines comme la cryptographie, la chimie computationnelle, l'optimisation industrielle ou l'intelligence artificielle. Les algorithmes quantiques pourraient, à terme, accélérer des tâches complexes telles que l'apprentissage automatique, la simulation moléculaire ou la sécurisation des données.

Professeur à Oxford, lauréat du prix Paul Dirac et du Breakthrough Prize, David Deutsch a ouvert la voie à une révolution technologique, mais il est aussi un penseur original. Dans ses livres, il insiste sur le pouvoir de l'explication et sait transmettre au grand public sa fascination pour la physique quantique et ses implications philosophiques. Fervent défenseur de l'interprétation des « multivers » de Hugh Everett, il voit la réalité comme un vaste ensemble d'univers parallèles. Et fidèle à sa devise *« Tout ce qui n'est pas interdit par les lois de la physique n'est pas impossible »*, il tisse une vision ambitieuse où la physique quantique, la théorie du calcul, l'épistémologie et la théorie de l'évolution s'entrelacent pour expliquer le monde.

P.D.



Particules lumineuses représentant des qubits dans un ordinateur quantique.

À LIRE

L'étoffe de la réalité **(2003) et** ***Le commencement de l'infini*** **(2016) de David Deutsch, aux éditions Cassini.**

DAVID DEUTSCH © 2008 - SAKKMESTERKE / ALAMY / HEMIS

IMAGINAIRES ATOMIQUES

Dès le début du XX^e siècle, l'atome s'impose comme un symbole puissant dans l'art et la culture populaire, qui offrent un espace d'expression aux interrogations, aux craintes et aux espoirs suscités par les découvertes des physiciens et par leurs applications civiles ou militaires.

Au début du XX^e siècle, les découvertes sur l'atome révèlent un monde insoupçonné. Celui-ci va devenir un véritable totem, au cœur d'une riche production artistique et culturelle. Avec l'entrée dans l'ère atomique en 1945, la société tout entière s'empare de ce symbole, qui cristallise les peurs de l'annihilation comme les espoirs dans les promesses de la technoscience. Une nouvelle imagerie envahit les écrans, les magazines ou la publicité et s'imprime dans l'inconscient collectif.

En France, le physicien Jean Perrin publie dès 1913 *Les Atomes*, un ouvrage accessible aux non-spécialistes, pour faire sortir les découvertes des laboratoires. Il est aussi derrière la création en 1937 du Palais de la Découverte. *« L'atome est un peu le symbole du Palais »*, remarque l'historienne des sciences Charlotte Bigg (Centre Alexandre Koyré, Paris). Lors de son ouverture, l'énorme machine électrostatique installée dans le hall du palais d'Antin ne passe pas inaperçue. Par la suite, les machines électrostatiques, emblématiques de ce haut lieu de culture scientifique populaire[1], feront vivre à des générations d'écoliers une expérience décoiffante, au propre comme au figuré…

DÉSINTÉGRATION COSMÉTIQUE

Les découvertes sur l'infiniment petit, qui interrogent les frontières de la réalité, inspirent les artistes. *« La désintégration de l'atome était la même chose, dans mon âme, que la désintégration du monde entier. (…) Tout devenait précaire, instable, mou »*, note ainsi en 1913 le peintre Vassily Kandinsky, pionnier de l'abstraction. Dès 1902, les travaux de Pierre et Marie Curie sont à l'origine de la *Danse ultraviolette*, une création de la danseuse américaine Loïe Fuller; en mai 1904, ils sont aux premières loges quand elle présente dans son atelier parisien un spectacle privé baptisé *La Danse du radium*, dans lequel elle utilise du sel fluorescent extrait de pechblende…

« L'impact médiatique de la découverte de la radioactivité et des rayons X est d'emblée très important », souligne Charlotte Bigg. Rien de tel pour vendre des produits de beauté ou d'hygiène que d'y ajouter une pincée de radium ou un soupçon de thorium ! Crème anti-rides, savon ou dentifrice Tho-Radia, pommade radioactive Radiocrèmeline… L'imagination des marchands de cosmétiques semble sans limites. On emploie même une laine baptisée « Oradium », à laquelle on prête des vertus stimulantes, pour confectionner layette et sous-vêtements ! Les produits radioactifs sont aussi censés guérir toutes sortes de maladies.

L'atome devient un argument marketing. En 1932, il donne son nom à un maillot de bain deux pièces dessiné par le couturier français Jacques Heim, désigné comme le plus petit du monde ! En 1946, Louis Réard, inventeur du bikini, déclare « j'ai divisé l'atome », signifiant par là qu'il a créé un costume de bain plus petit encore. Organisé le 5 juillet – le premier essai nucléaire des États-Unis a été mené dans l'atoll de Bikini quatre jours auparavant – son lancement s'accompagne d'un slogan



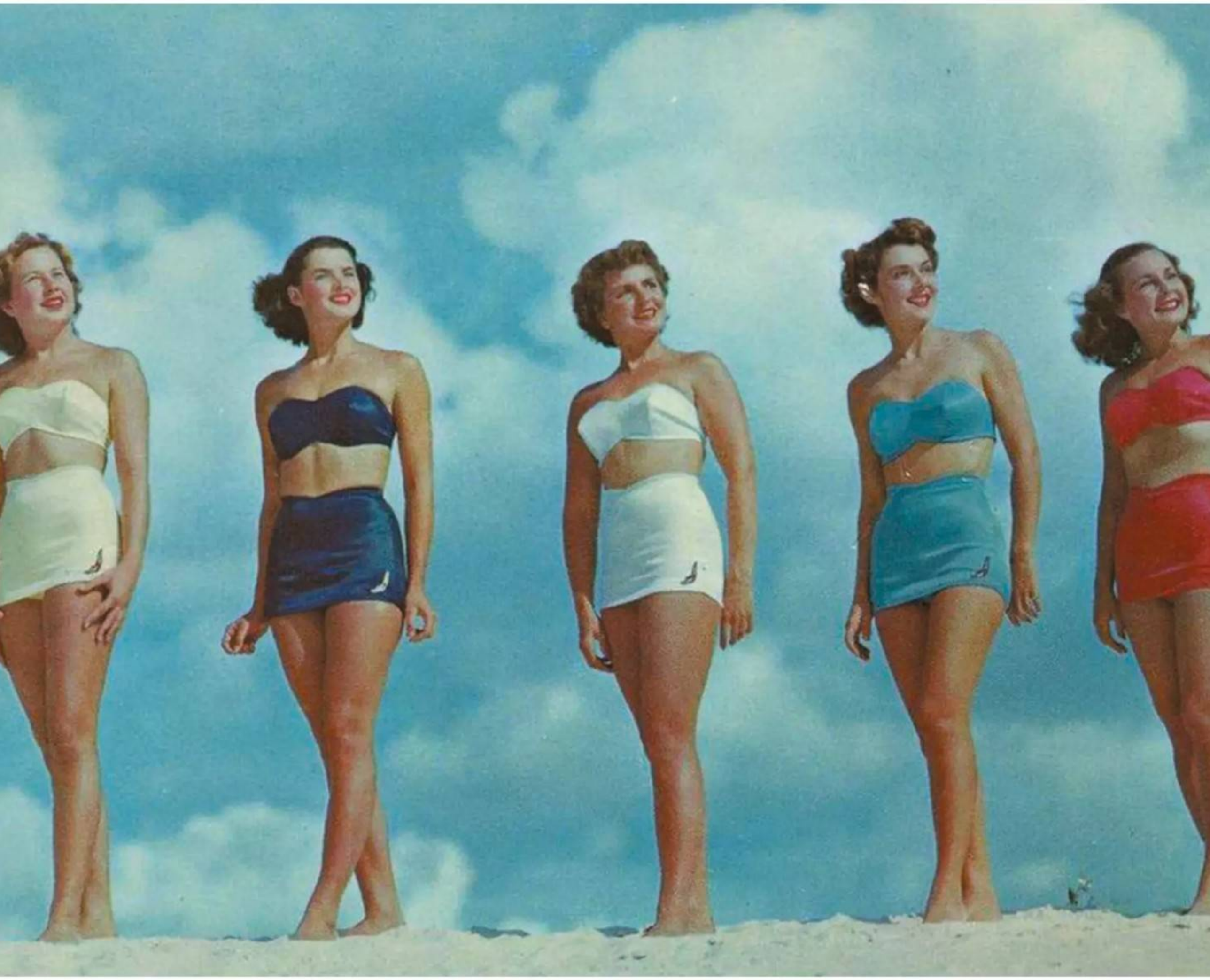
Laine radioactive pour sous-vêtements stimulants, pour « enfants, adultes, vieillards et malades ».

DR



Loie Fuller crée la Radium Dance à Paris, en 1904, devant un public trié sur le volet dont Marie et Pierre Curie. Sa danse abstraite, éclairée à la pechblende, illustre le mouvement des atomes suggérant l'énergie universelle qui traverse la matière.

PARIS, FONDATION JÉRÔME SEYDOUX-PATHÉ - DR



Dès 1932, Jacques Heim lance l'« Atome », un deux-pièces qu'il relance en 1946 comme « le plus petit maillot de bain du monde ». La même année, Louis Réard conçoit un modèle encore plus minimaliste – dévoilant le nombril – qu'il baptise du nom de l'atoll de Bikini, théâtre des essais nucléaires américains. L'infiniment petit devient alors le vecteur d'une onde de choc qui propage un nouveau regard sur le corps féminin.



Rita Hayworth en Gilda, peinte sur un bombardier atomique en 1946. La pin-up hollywoodienne et son sex-appeal explosif à l'ère nucléaire.



Godzilla (Gojira), film japonais réalisé par Ishirô Honda en 1954, met en scène un monstre mutant, symbole des angoisses liées à la destruction nucléaire.

percutant, *« le bikini, la première bombe anatomique »*… Malgré les effets dévastateurs des essais nucléaires, la formule ne choque pas grand-monde : les soldats américains n'ont-ils pas choisi de décorer l'ogive larguée sur Bikini à l'effigie de la sculpturale Rita Hayworth, sacrée bien malgré elle archétype de la « bombe sexuelle » dans le film *Gilda* ?

Au Japon, les essais nucléaires ont pourtant ravivé les terreurs. Dans le mythique film *Godzilla* d'Ishirô Honda, sorti en 1954, ils sont la cause du réveil d'un lézard préhistorique géant, allégorie des traumatismes du pays. Le monstre va devenir un symbole incontournable, présent jusqu'à nos jours dans 38 films ainsi qu'à la télévision, en musique, dans les jeux vidéo, etc. Une autre figure nippone emblématique, Astro Boy, va connaître aussi une belle longévité. Créé deux ans avant Godzilla par Tezuka Osamu, pionnier du manga, ce petit robot représente le versant positif de l'énergie nucléaire, dont il tient des pouvoirs extraordinaires.

PEURS ET FANTASMES

Cette ambivalence n'est pas limitée au Japon. *Notre ami l'atome*, un film d'animation de Walt Disney programmé durant le show télévisé Disneyland en 1957 et *Hiroshima, mon amour*, un film réalisé par Alain Resnais sur un scénario de Marguerite Duras, présenté en sélection officielle au





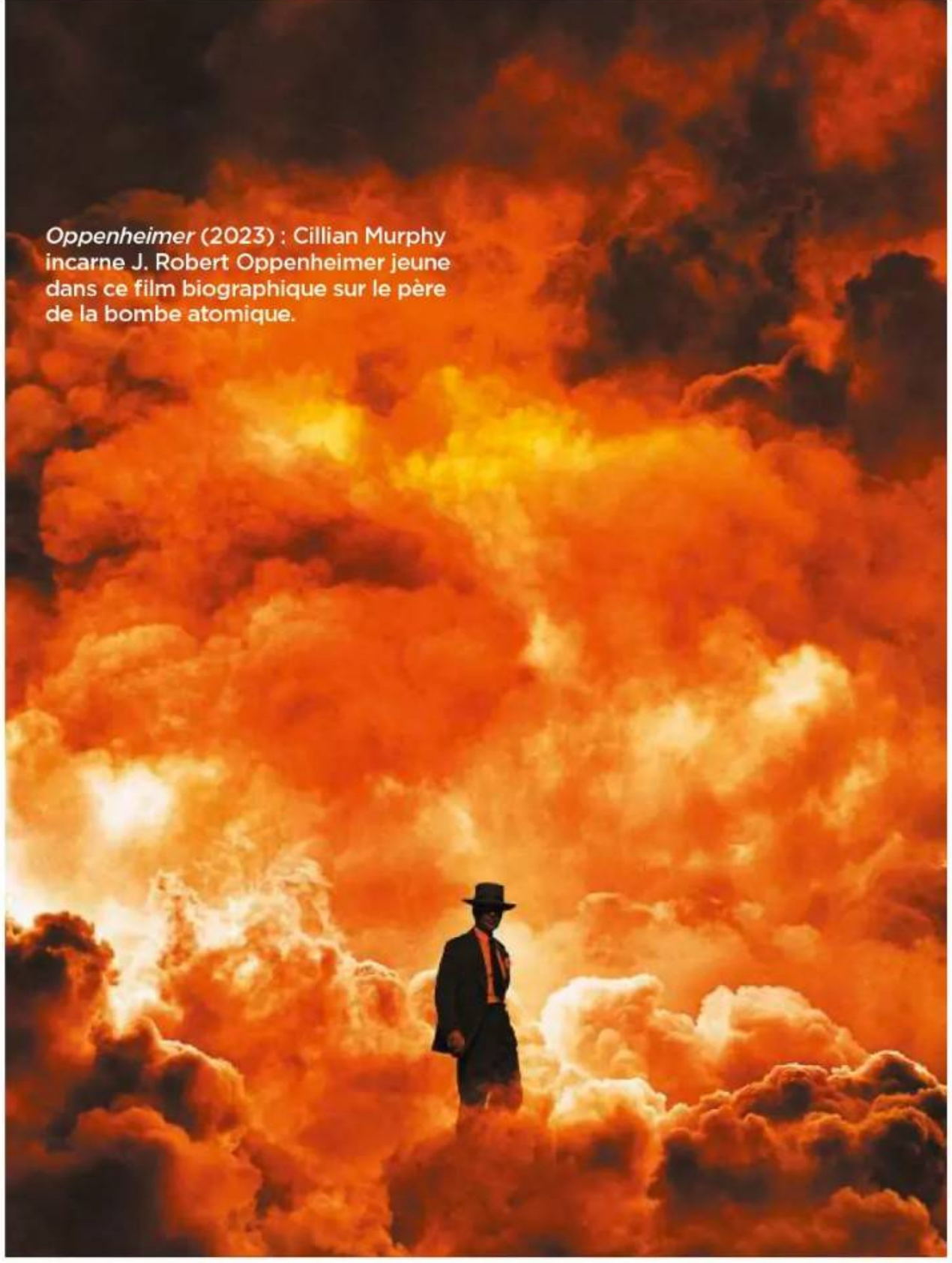
Hiroshima mon amour (1959), d'Alain Resnais, suivi de l'affiche italienne de *Dr. No* (1962) : Sean Connery et Ursula Andress inaugurent l'ère Bond sous le signe du nucléaire et du bikini. Ursula Andress incarne un glamour atomique devenu iconique.

Festival de Cannes en 1959, offrent par exemple de l'atome deux visions diamétralement opposées. Alors que le premier vante les vertus du nucléaire civil, le second mêle la petite histoire – celle d'une liaison passionnelle entre une actrice française et un architecte japonais – et la grande – la tragédie de la guerre et de la destruction –, dans un vertigineux jeu de miroirs entre traumatismes intimes et collectifs. Au moment même où les réflexions autour des destructions de Nagasaki et d'Hiroshima inspirent l'essor international de l'art nucléaire, les États-Unis mettent en place la série d'expositions *Atoms for peace*, promouvant un usage pacifique de l'atome. *« Les enjeux ne sont plus strictement scientifiques, mais aussi techniques, militaires, géopolitiques, économiques… »*, remarque Charlotte Bigg.

La série des James Bond est un pur produit de la guerre froide. La menace nucléaire est présente dès le premier opus sorti au cinéma en 1962, qui met Bond aux prises avec le Dr No, un savant fou appartenant à l'organisation criminelle Le Spectre… Dans Goldfinger, troisième volet de la série, le célèbre agent secret au service de Sa Majesté est chargé de désamorcer une bombe. Des complots

LIBRA FILMS /EVERETT COLLECTION / AURIMAGES - MARY EVANS /ALL FILM ARCHIVE /AURIMAGES - ARGOS / COMO /PATHE /DAIEI / AURIMAGES - DANJAQ / EON / UA / KOBAL COLLECTION / AURIMAGES





Oppenheimer (2023) : Cillian Murphy incarne J. Robert Oppenheimer jeune dans ce film biographique sur le père de la bombe atomique.

nucléaires sont aussi au cœur des intrigues d'*Opération Tonnerre* (1965), de *L'Espion qui m'aimait* (1977), d'*Octopussy* (1983)…

Dans un autre registre, entre anticipation et satire au vitriol, le film de Stanley Kubrick *Docteur Folamour*, sorti en 1964, a pour point de départ une frappe nucléaire sur l'Union soviétique déclenchée par un général américain paranoïaque. Le système de défense soviétique pourrait provoquer un holocauste nucléaire, et le Docteur Folamour (mémorable Peter Sellers !) est appelé à la rescousse… Confier ainsi le salut de l'humanité à un ancien savant nazi psychopathe ne semble guère raisonnable, mais le laisser reposer sur des machines ne l'est guère plus. Dans *Wargames*, sorti en 1983, un jeune pirate informatique qui se croit dans un jeu de simulation est à deux doigts de déclencher un conflit thermonucléaire, parce qu'on a délégué à un système automatisé la responsabilité de riposter en cas d'alerte nucléaire.

***Dr. Strangelove or: How I Learned to Stop Worrying and Love the Bomb* (1964), comédie noire de Stanley Kubrick, mêle satire politique et horreur nucléaire à travers des personnages emblématiques incarnés par Peter Sellers et Peter Bull.**

FIN DU MONDE

Le nucléaire nourrit aussi des récits dystopiques et post-apocalyptiques. En découvrant une humanité primitive sous le joug de primates évolués au terme d'un voyage spatial, Taylor (Charlton Heston), le héros du film *La Planète des singes* (1968), pense avoir découvert une planète inconnue. Lorsque le twist final le confronte aux vestiges de la statue de la Liberté, il comprend qu'il est sur Terre, et que la folie des hommes a causé leur perte… Dans la série *Terminator*, l'assassin cybernétique imaginé par James Cameron provient d'un futur post-apocalyptique dans lequel des machines contrôlées par une intelligence artificielle ont pris le pouvoir sur l'humanité. Des livres, des titres musicaux et des jeux vidéo s'emparent aussi de cette imagerie. Les inquiétudes se focalisent aussi sur l'essor du nucléaire civil. « *La catastrophe de Tchernobyl vient renforcer cette iconographie de la ruine et du désastre* », note Charlotte Bigg.

Si la centrale atomique de Springfield fait partie du décor dans la série animée *Les Simpsons*, c'est que le nucléaire est désormais une réalité. Ses espoirs, et surtout ses menaces, continuent d'irriguer la culture populaire. L'impact de la tragédie de Fukushima en 2011 s'est ainsi répercuté dans la production de mangas. Et c'est peut-être en partie la peur que les guerres actuelles ne débouchent sur un conflit nucléaire qui explique le succès d'*Oppenheimer*, biopic consacré au père de la bombe atomique par Christopher Nolan, multioscarisé en 2024…

Marielle Mayo

[1]Le monde scientifique se mobilise aujourd'hui fortement quant aux menaces qui pèsent sur cette institution, dont la réouverture prévue en 2026 après rénovation semble remise en cause.

À LIRE

***L'âge atomique. Les artistes à l'épreuve de l'histoire*, sous la direction de Maria Stavrinaki et Julia Garimorth, éd. Paris Musées, 2024. Catalogue de l'exposition sur l'imaginaire de l'atome dans les représentations artistiques proposée au Musée d'art moderne de Paris du 11 octobre 2024 au 9 février 2025.**

EVERETT COLLECTION / AURIMAGES - CAPITAL PICTURE / KCS / AURIMAGES

LE PROCÈS DU



SINGE



« When Shall We Three Meet Again? » : caricature parue peu après le « procès du singe », qui visait l'enseignement de la théorie de l'évolution dans les écoles publiques du Tennessee, après que John T. Scopes a enfreint la loi en l'abordant en classe à Dayton. À gauche, William Jennings Bryan, procureur presbytérien ; à droite, Clarence Darrow, libre penseur engagé pour la liberté d'enseigner.

10 JUILLET 1925

Une atmosphère festive règne sur la ville de Dayton, dans l'état du Tennessee, en ce 10 juillet 1925. Des banderoles flottent dans les airs. *« Venez à Jésus »*, dit l'une d'elle. *« Où passerez-vous l'éternité ? »*, questionne une autre. Les vitrines des boutiques regorgent d'objets aux motifs simiesques. Et puis, il y a la foule, dense, compacte, agglutinée près du Tribunal, venue assister au procès de Thomas Scopes. Son crime ? Avoir enseigné la théorie darwinienne de l'évolution à ses jeunes élèves. En mars, une loi avait en effet été votée dans l'État pour satisfaire l'électorat fondamentaliste protestant, interdisant aux institutions publiques *« d'enseigner une théorie niant l'histoire de la création divine de l'homme et prétendant que l'homme descend d'un ordre inférieur d'animaux. »* Au grand dam de quelques esprits modernistes autant… qu'opportunistes. C'est ainsi que l'homme d'affaires George Rappleyea, le pharmacien Edward Robinson, par ailleurs président du bureau scolaire du comté, et quelques autres avaient réussi à convaincre le jeune Scopes d'enfreindre la loi. L'enseignement de *« ces diableries darwiniennes »*, pensaient-ils, attirerait aussi les lumières sur leur petite ville en manque de notoriété. À raison, puisque la presse régionale et nationale s'empara de l'affaire sitôt rendue publique l'arrestation du professeur. Pour faire face à l'événement qui s'annonçait, Dayton entama une mue expresse. Des lignes télégraphiques furent installées, une piste d'aviation aménagée pour permettre aux actualités filmées d'arriver à temps dans les cinémas, etc.

Le jour J, le procès tourne immédiatement à l'affrontement entre l'avocat de la défense, Clarence Darrow, libre penseur notoire, et l'avocat général presbytérien William Jennings Bryan, fin connaisseur de la Bible. Le premier fait appel à d'éminents scientifiques pour démontrer que la théorie de l'évolution ne contredit pas la Bible. Ce que le second remet en cause. Le juge décide finalement que la cour n'a pas besoin de leurs avis pour juger de la culpabilité de Scopes. Darrow pense la cause perdue avant de tenter un ultime coup de poker en citant Bryan, en tant qu'expert sur la Bible. Et il va le piéger. Après s'être assuré que son interlocuteur avait une lecture littérale du texte sacré, il se lance : pensez-vous que la Terre fut créée en six jours ? Oui, mais pas nécessairement en six jours de vingt-quatre heures, plutôt en périodes, lui répond Bryan. La création peut donc avoir duré très longtemps, pourquoi pas des millions d'années, poursuit l'avocat. Acculé, son adversaire capitule, à la surprise générale. En dépit de cette brillante démonstration, Scopes est condamné à l'unanimité à une amende de cent dollars. Épuisé par le procès, Bryan mourra quelques jours plus tard. Quant à la loi antiévolutionniste du Tennessee, elle restera en vigueur jusqu'en 1967.

◗ Fabienne Lemarchand

Clarence Darrow, avocat de la défense, debout, interroge William Jennings Bryan, procureur, assis. La séance se tient exceptionnellement à l'extérieur, sur une plateforme improvisée, en raison de la chaleur et du risque d'effondrement du plancher de la salle d'audience.

EVERETT COLLECTION / AURIMAGES - THE GRANGER COLL NY / AURIMAGES

LES VIKINGS, L'ÎLE DE RÉ... ET NOUS !



La découverte de cinq sépultures atypiques sur l'île de Ré a récemment propulsé les vikings sur le devant de la scène en France. Une occasion de remettre les pendules à l'heure, les connaissances issues de la pop culture ayant souvent tendance à prendre le pas sur la réalité historique quand on évoque les fameux « hommes du Nord » !



PATRICK ERNAUX, INRAP - THE GRANGER COLL NY / AURIMAGES

À L'ABORDAGE DU MOYEN ÂGE NORDIQUE

Vikings pillant un monastère, **panneau de Lorenz Frølich, 1883.**

En février dernier, les vikings ont fait la Une des médias. Des archéologues de l'Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap) venaient d'annoncer de nouvelles découvertes sur l'île de Ré, témoignant d'échanges avec le monde nordique au haut Moyen Âge. De là à supposer qu'on tenait enfin la preuve que les raids scandinaves étaient passés par là, le pas a été rapidement franchi ! Un peu trop vite au goût des scientifiques, beaucoup plus prudents dans l'interprétation des vestiges... *« Un diagnostic avait été prescrit par l'État avant la construction d'une maison sur la commune de La Flotte,* rapporte l'archéologue Annie Bolle (Inrap). *En octobre 2024, nous sommes revenus sur le terrain pour des fouilles préventives. »* Celles-ci ont notamment mis au jour 52 sépultures individuelles ainsi qu'un ossuaire, couvrant une période s'étendant de la fin du VIIIe siècle jusqu'au XVe siècle. Les tombes les plus récentes étaient rassemblées à l'intérieur d'une chapelle mentionnée au XIIe siècle tandis que celles remontant à la période carolingienne étaient situées à l'extérieur. *« Des vestiges datant de la pé-*



Boucle de ceinture du XII[e]-XIII[e] siècles, avec tissu conservé sur ses côtés, provenant d'une inhumation à La Flotte sur l'île de Ré.



riode antique avaient déjà été découverts sur l'île de Ré, mais pour la période médiévale, nous n'avions pas de données archéologiques antérieures aux XI[e]-XII[e] siècle », note Annie Bolle. Ces informations sont donc précieuses.

SÉPULTURES ATYPIQUES, PISTES MULTIPLES

La plupart de ces sépultures recelaient des défunts allongés sur le dos, les membres inférieurs en extension, conformément à la tradition chrétienne. Mais les archéologues ont aussi mis au jour cinq tombes atypiques. Trois d'entre elles se distinguaient soit par la position des corps, soit par leur orientation (la tête au sud-sud-ouest), évoquant selon Annie Bolle des pratiques funéraires du monde non christianisé. Difficile toutefois de savoir si ces individus appartenaient à une population d'origine étrangère ou s'il s'agissait de « locaux » affichant un statut particulier.

Par ailleurs, ces tombes dites « habillées » comprenaient du mobilier (peignes en bois de cervidés, perles, ceinture, objets en fer, dont un couteau pivotant…), ce qui est exceptionnel pour l'époque carolingienne. *« D'après les premières analyses, ce mobilier n'est pas local… Mais n'est pas non plus scandinave ! »*, précise l'archéologue. Il se rapprocherait plutôt des cultures matérielles de la mer du Nord, peut-être sa côte sud ou de l'Angleterre. *« Il s'agissait alors d'un centre névralgique pour la circulation des personnes et des objets,* rappelle Annie Bolle. *Les éléments trouvés dans les tombes peuvent être arrivés sur l'île avec les vikings, qui avaient alors la main mise sur les échanges commerciaux, mais aussi avec les Frisons ou avec les Saxons. »*

En Europe de l'Ouest, c'est dans les îles britanniques qu'ont eu lieu les plus belles découvertes récentes associées à l'âge viking, en particulier celle d'un trésor de pièces d'argent de l'île de Man en 2024, ou encore celle d'une grande halle dans le comté de Cumbria, qui date de février 2025. En revanche, très peu de vestiges sont connus en France et seules deux sépultures exhumées sur l'île de Groix ainsi qu'à Pîtres, en Normandie, étaient connues jusque-là. *« La diaspora viking s'est implantée un peu partout. Mais dans des lieux comme la Normandie, les gens du Nord se sont complètement acculturés et fondus dans le paysage »*, souligne l'historienne Lucie Malbos (Centre d'études supérieures de civilisation médiévale, Poitiers). *« Ils semblent s'être adaptés très vite à la culture matérielle locale, par exemple en adoptant les céramiques régionales »*, abonde Annie Bolle. Faute de points de comparaison, l'interprétation des vestiges de l'île de Ré s'avère difficile. L'archéologue regrette que l'engouement médiatique autour des vikings oriente les regards dans cette direction, quitte à écarter d'office d'autres hypothèses qui relient les sépultures aux Saxons ou aux Frisons, autres peuples connectés avec l'Empire franc.

REPRÉSENTATIONS POST-TRAUMATIQUES

Rendez-vous dans environ 18 mois pour les résultats des études. En attendant, il semble difficile d'échapper à la vogue nordique ! Partis à la conquête du monde il y a plus d'un millénaire, les vikings sont désormais partout, qu'ils s'affichent sur écran géant ou qu'ils s'introduisent dans les foyers par le biais d'une série, d'un jeu vidéo ou d'une BD. De nombreuses troupes de reconstitution historique en Europe s'attachent à retracer leur passé mythique. En France, les festivals et autres marchés vikings attirent des milliers de visiteurs. En Scandinavie, on ne compte plus les groupes de viking metal, un courant du heavy metal qui se caractérise par ses références aux racines nordiques et païennes.

Comment s'est construit cet imaginaire collectif foisonnant ? Les écrits contemporains du phénomène viking qui ont nourri les représentations lui sont extérieurs, puisqu'ils sont dus à des auteurs de l'Occident chrétien, très souvent des moines ou des prêtres ayant vécu les raids en première ligne dans leurs monastères ou leurs églises. Rien d'étonnant, donc, à ce qu'ils présentent ces attaquants venus du Nord comme des barbares sanguinaires ! *« Leur point de vue était*



La zone funéraire comprend au total 48 tombes.



Peigne en os ou bois de cervidé.

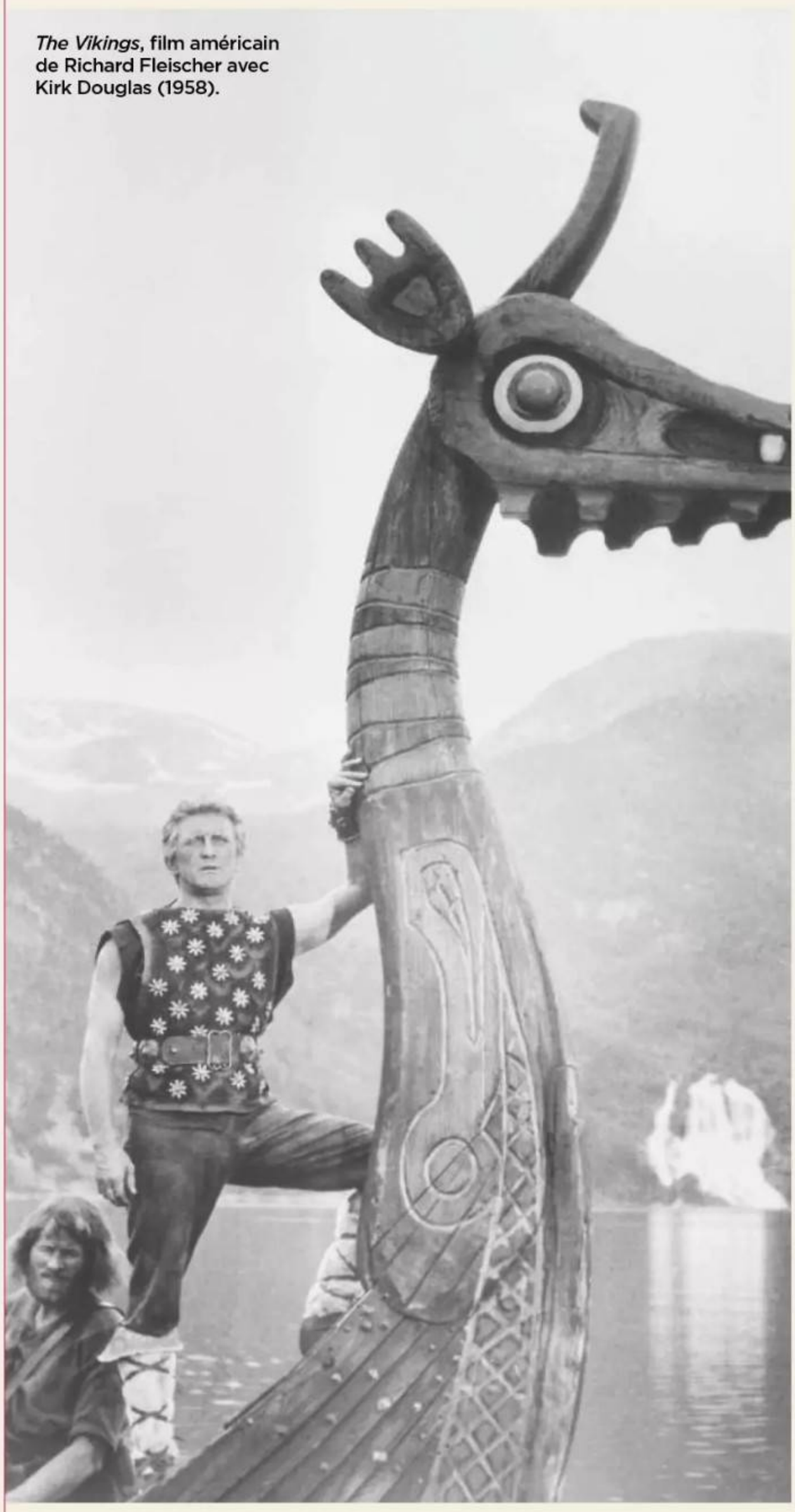


Éléments d'une ceinture en alliage cuivreux.



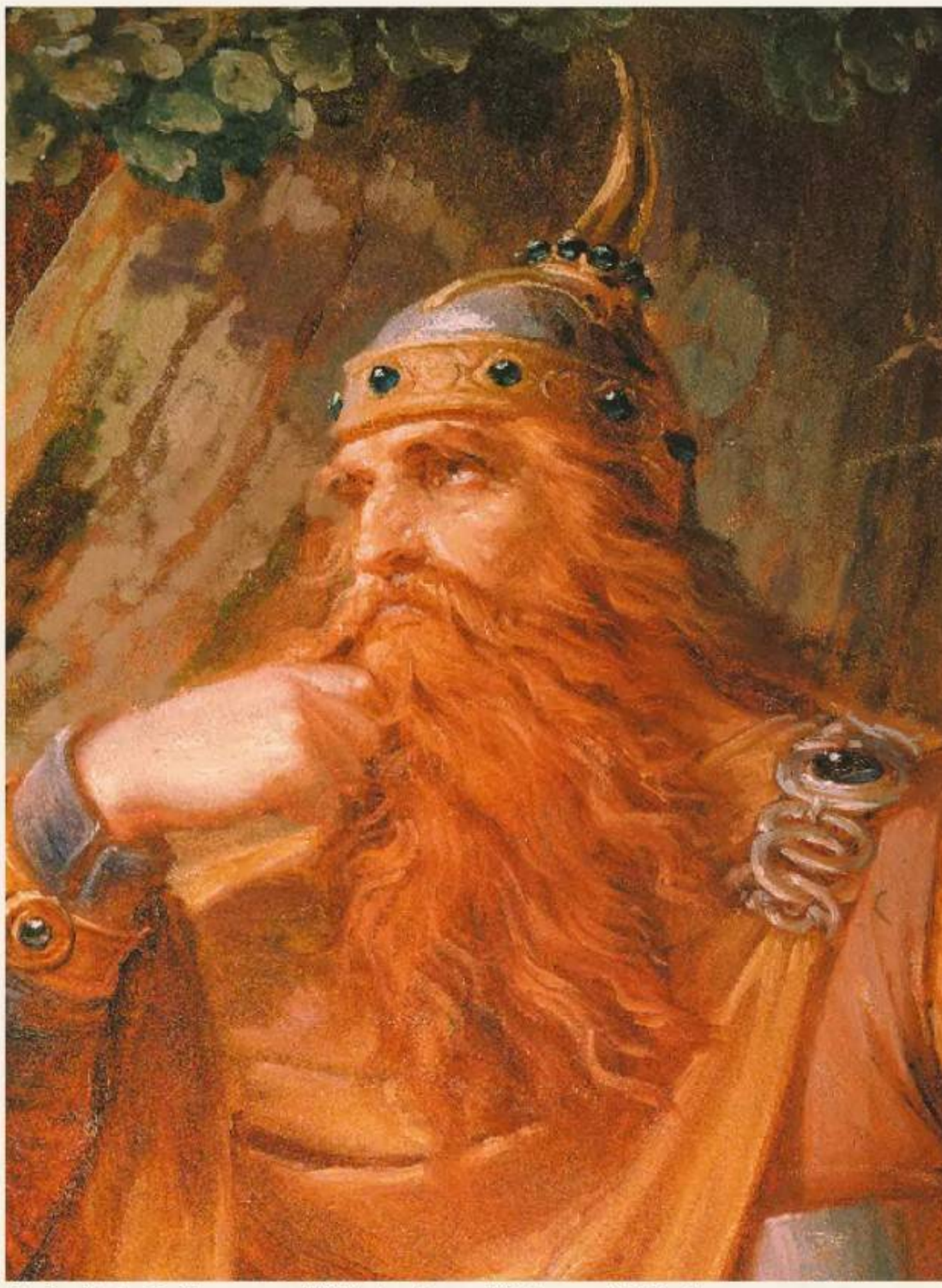
Décor d'entrelacs qui évoque le monde anglo-saxon.

PATRICK ERNAUX, INRAP



The Vikings, film américain de Richard Fleischer avec Kirk Douglas (1958).

EVERETT COLLECTION / AURIMAGES - COLLECTION DAGLI ORTI / MUSÉE RICHARD WAGNER BAYREUTH / AURIMAGES



Portrait de Guttorm par Wilhelm Hauschild, vers 1870, dans une fresque inspirée de la légende de Siegfried.

nécessairement biaisé par le traumatisme. De plus, le prisme de la religion leur faisait voir les vikings comme des païens sans foi ni loi et interpréter les évènements comme un châtiment voulu par Dieu», souligne Lucie Malbos.

On notera au passage que le terme «viking» n'apparaît que très rarement dans ces chroniques anciennes, qui évoquent plutôt des «pirates», des «païens» ou des «hommes du Nord» venus «en infinie multitude». Ce mot désigne ainsi initialement une activité – le fait de prendre la mer pour aller s'enrichir – qui est souvent violente, mais n'exclut pas des pratiques commerciales plus pacifiques. D'où l'usage de la minuscule désormais privilégié par les historiens (les vikings plutôt que les Vikings). Tous ceux qui se livrent à ces pratiques aventureuses ne sont pas scandinaves, et tous les Scandinaves ne sont pas des navigateurs. Désigner comme «viking» un paysan norvégien du IXe siècle n'a guère de sens aux yeux des spécialistes !

CORNES DANS LA BRUME

Composées surtout en Islande à partir de la fin du XIIe siècle, avec un décalage chronologique d'environ trois siècles, les sagas scandinaves sont à l'origine d'un glissement de sens. *«Elles introduisent une forme d'héroïsation, voire de mythification de ces lointains ancêtres qui se sont illustrés les armes à la main»,* remarque Lucie Malbos. Cette vision idéalisée est ensuite remise à la mode par le courant romantique au XIXe siècle. *«Le summum de cette vague d'engouement, ce sont les opéras de Wagner, qui voient apparaître le fameux casque à corne.»*. Certes, la violence ne disparaît pas des stéréotypes, mais désormais, les vikings sont aussi devenus des Vikings, parangons d'une forme de liberté perdue...

Ils reviennent en force en 1958 avec le film *Les Vikings*, réalisé par Richard Fleischer, qui enchaîne images d'Épinal – la fameuse entrée du drakkar dans le fjord au son des cornes de brume, les scènes de beuverie, les funérailles... – et morceaux de bravoure. Il bénéficie d'un casting de rêve : Enerst Borgnine, qui campe un Ragnar haut en couleur, Tony Curtis, Janet Leigh... Et bien sûr le flamboyant Kirk Douglas, inoubliable Einar au visage barré d'une cicatrice et à l'œil borgne – un personnage sauvage, brutal et amoral, mais aussi fier et attachant. L'acteur porte littéralement ce film qu'il a aussi produit. Et si celui-ci enfile les clichés comme des perles, il fourmille aussi de détails qui témoignent d'un véritable souci de fidélité à l'histoire dans les représentations des mœurs. Le réalisateur s'est même appuyé sur des études au musée d'Oslo pour la conception des drakkars !

D'autres films moins marquants mettent ensuite les

hommes du Nord à l'honneur. Chef opérateur sur *Les Vikings*, Jack Cardiff tente avec plus ou moins de bonheur de surfer sur la vague du succès en réalisant *Les Drakkars* en 1964. On pourrait mentionner aussi *Erik le Viking* (1989), auquel Terry Jones imprime la patte des Monty Python, mais dont l'humour *so british* ne fait pas toujours mouche, ou *Le 13e Guerrier*, une adaptation du roman *Le royaume de Rothgar* de Michael Crichton réalisée par John McTiernan – un bide au box-office en 1999 !

VIKINGS TATOUÉS ET INCLUSIVITÉ

Le XXIe siècle consacre les héros scandinaves. Lancée en 2013, la série canado-irlandaise *Vikings*, qui retrace pendant six saisons les aventures du guerrier Ragnar Lodbrok, fait un carton. Son *spin-off Vikings : Valhalla* diffusé entre 2022 et 2024, ou encore la série britannique *The Last Kingdom,* qui s'attache aux pas d'Uhtred de Bebbanburg, fils d'un noble Saxon enlevé par les Danois, connaissent aussi un joli succès. Les représentations visent désormais à plus d'authenticité et s'appuient sur les connaissances récentes. *« L'effort est visible dans la série Vikings, qui a bénéficié de conseillers historiques pour les bateaux ou les bâtiments. Toutefois, même si certains clichés reculent, d'autres apparaissent. Certes, les Vikings n'ont plus de casques à cornes, mais ils se promènent torse nu et affichent leurs tatouages même par -10 °C ! »*, s'amuse Lucie Malbos.

L'historienne salue le gros travail mené avec un archéologue suédois pour le film *The Northman* sorti en 2022. Le jeu *Assassin's Creed Valhalla,* acclamé par la critique en 2020, a quant à lui bénéficié de la collaboration d'historiens. *« Ces œuvres récréatives, qui greffent des personnages purement fictifs à un décor historique, n'ont pas vocation à remplacer un cours d'histoire »,* tempère-t-elle. La mythologie nordique, elle, se réinvente à travers toutes sortes de récits contemporains. Le jeu *God of War : Ragnarök* (2022) propose un Thor ventripotent, violent et imprévisible, loin de l'image héroïque traditionnelle. La série norvégienne *Ragnarök*, diffusée sur Netflix depuis 2020, transpose le combat entre dieux et géants dans une petite ville fictive minée par la pollution industrielle et les dérèglements climatiques. Thor y prend les traits d'un adolescent écologiste mal dans sa peau. Dans l'univers des comics Marvel, Thor et Mjöllnir, son légendaire marteau, traversent les générations depuis les années 1960. Ils font l'objet de multiples relectures, du film *Thor : Love and Thunder* à la série *Loki*, en passant par des BD où, dans des univers parallèles, le dieu devient une femme ou se décline en d'autres formes. Les mythes scandinaves nourrissent aussi les romans de Neil Gaiman : *American Gods,* où Odin se cache dans une Amérique fatiguée, et *Norse Mythology,* qui redonne une voix littéraire aux vieux récits. Côté jeunesse, la série animée *How to Train Your Dragon* met en scène un monde de clans vikings vivant avec leurs dragons sur l'île de Beurk. Ce goût du Nord irrigue en tout cas la fantasy moderne : Tolkien s'est inspiré de l'Edda pour bâtir *Le Seigneur des anneaux,* et l'on retrouve chez les Fer-nés de *Game of Thrones* un condensé de stéréotypes vikings, entre drakkars, barbes tressées et religion des profondeurs.

Selon une étude menée entre 2020 et 2024 à l'université de Stavanger, en Norvège, la popularité de ces lointains ancêtres nordiques serait liée à des aspirations de notre époque. Des revendications identitaires aux accents nationalistes et la valorisation d'un virilisme brutal animent certains fans. Toutefois, la quête spirituelle d'un retour à Mère Nature et le désir de se rassembler autour d'un thème fédérateur semblent prévaloir. Les chercheurs se sont notamment intéressés au *Midgardsblot*, un festival qui se tient à Borre, en Norvège, dont le programme offre un curieux mélange de musique viking, folk et metal, de rituels païens, de reconstitutions historiques, de conférences, etc. Les organisateurs y invitent les visiteurs à célébrer leurs racines et à construire des amitiés, *« peu importe la nationalité, leur origine culturelle, leur origine ethnique, leur sexe ou leur orientation sexuelle ».* Une ouverture sur le monde que n'auraient sans doute pas reniée les Vikings, infatigables voyageurs !

Marielle Mayo



La figure semi-légendaire de Ragnar Lodbrok dans la série télévisée *Vikings*.



Relecture vidéoludique de l'univers viking.





À gauche, *The long ships (Les Drakkars)*, film anglo-yougoslave de Jack Cardiff (1964) et *The Northman*, film américano-britannique de Robert Eggers (2022). Ci-dessous, le festival norvégien Midgardsblot, entre reconstitution et culture métal.

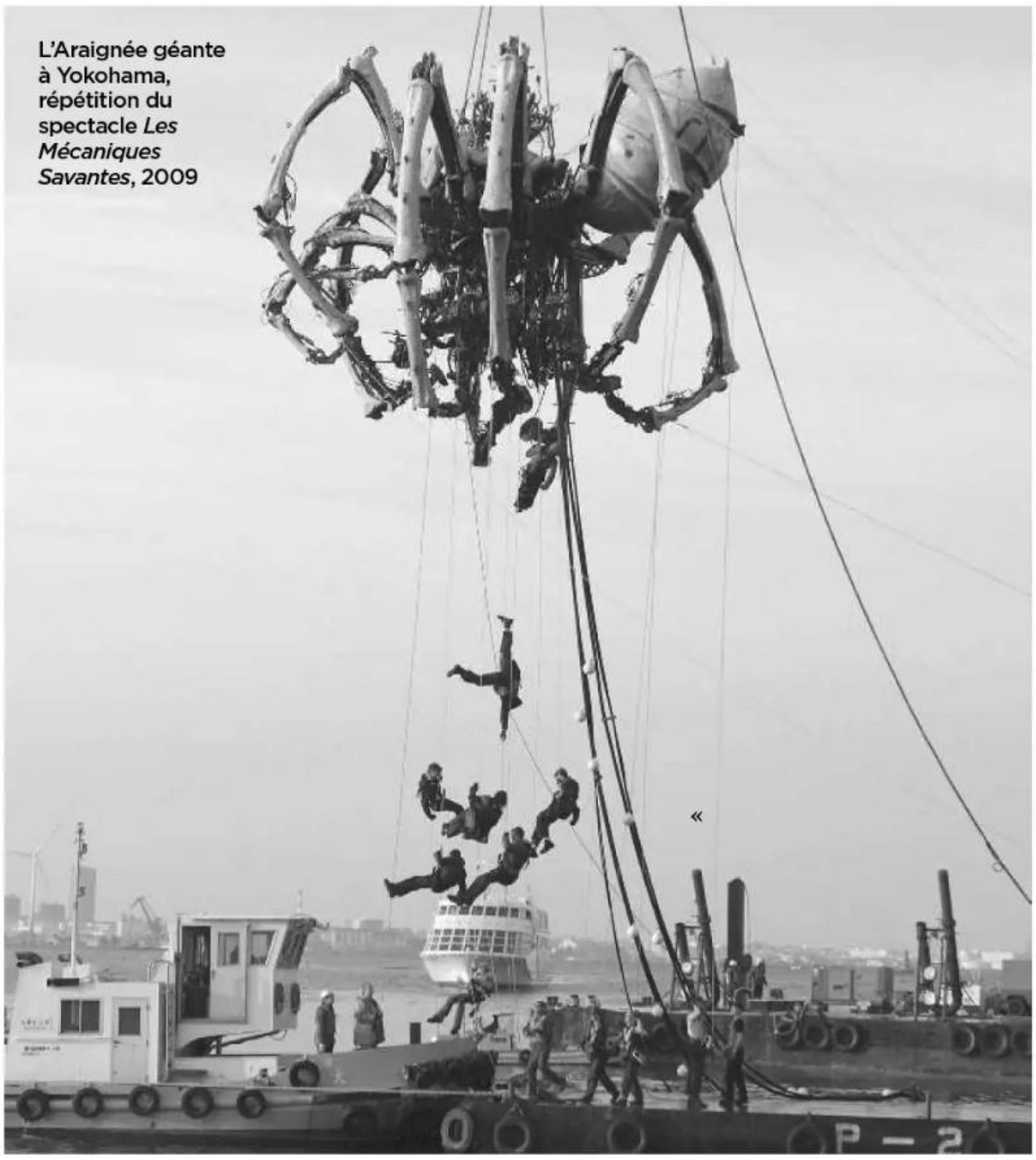


IRISH FILM BOARD / KOBAL COLLECTION / AURIMAGES - CAPITAL PICTURE / KCS / AURIMAGES - MIDGARDSBLOT FESTIVAL - DR - EVERETT COLLECTION / AURIMAGES - DR - EVERETT COLLECTION / AURIMAGES

S'INSPIRER **DU VIVANT**

Le château du Clos Lucé, à Amboise, ultime lieu de vie de Léonard de Vinci, explore le temps d'un été les liens entre nature, science et technique. Une autre façon de découvrir l'extraordinaire curiosité et l'inventivité du génie toscan, mais aussi des ingénieurs et chercheurs d'aujourd'hui.

Léonard de Vinci (1452-1519) avait un grand rêve : voler. Fasciné par les oiseaux, il n'a eu de cesse de les observer, d'analyser et de décomposer le mouvement de leurs ailes pour tenter de l'adapter aux humains. Il en conçut diverses machines volantes, d'abord à ailes battantes, puis à ailes fixes. Le père de *La Joconde* fut de fait l'un des observateurs les plus affutés du vivant et de la nature, puisant dans le monde animal et végétal des formes et des matériaux innovants pour ses multiples inventions. *« Scrute la nature, c'est là qu'est ton futur »*, aimait-il à répéter. La fleur du pissenlit lui donna ainsi l'idée de la sphère volante, les graines ailées du tilleul, de sa célèbre vis aérienne, sorte d'ancêtre de l'hélicoptère. Léonard de Vinci est d'ailleurs considéré comme l'un des pionniers du biomimétisme (du grec *« bios »*, vie et *« mimêsis »*, imitation), cette approche qui consiste à s'inspirer de la nature pour créer de nouveaux matériaux ou procédés, et qui est aujourd'hui en plein développement. C'est elle qui est au cœur de l'exposition estivale du Clos Lucé. *« Nous l'avons conçu comme un dialogue entre le passé et le présent, entre les croquis, dessins et machines du savant toscan et des œuvres contemporaines d'artistes ou d'ingénieurs issues de divers laboratoires européens »*, explique Pascal Brioist, professeur d'histoire à l'université François-Rabelais de Tours et co-commissaire de l'exposition avec l'historien des techniques Andrea Bernardoni.



L'Araignée géante à Yokohama, répétition du spectacle *Les Mécaniques Savantes*, 2009

Le parcours se déploie en cinq séquences. La première offre une expérience ludique et interactive pour découvrir ce qu'est le biomimétisme tout en donnant un panorama des multiples innovations qui en ont découlées depuis la Renaissance et les machines de Léonard de Vinci jusqu'aux robots de dernière génération, avec par exemple *FlyEye*, le nouveau télescope de l'Agence spatiale européenne pour détecter rapidement les astéroïdes potentiellement dangereux pour la Terre, directement inspiré de l'œil de mouche. En passant par la tour Eiffel, inspirée de la structure d'un fémur humain, l'Éole, la machine volante conçue par Clément Ader en 1890 inspirée des ailes de chauves-souris, ou encore le velcro inventé en 1941 par George de Mestral par imitation des capitules de la bardane.

Les séquences suivantes nous entraînent dans un voyage étrange consacré aux sources d'inspiration, qui mêle documents anciens, plans, manuscrits et robots fu-



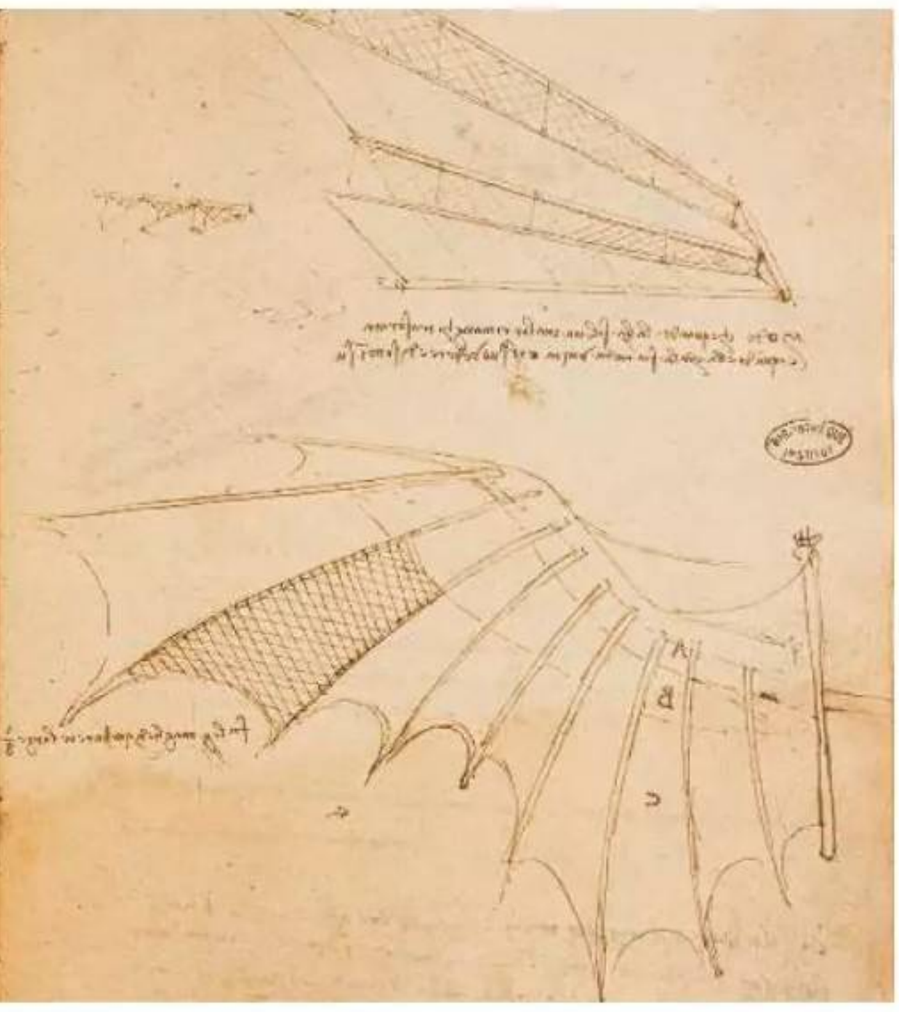
JORDI BOVER

S'INSPIRER DU VIVANT, DE LÉONARD DE VINCI À NOS JOURS
CHÂTEAU DU CLOS LUCÉ, AMBOISE
Jusqu'au 10 septembre

Image de synthèse de la Cité des Mériens de Jacques Rougerie, inspirée de la raie manta.

Ci-dessous, le robot Roméo.

turistes. À commencer par le corps humain que Léonard de Vinci a étudié en profondeur. *« Il le concevait comme une machine biomécanique. Et à la fin des années 1490, il imagina même une armure animée, capable de bouger ses bras grâce à un système complexe d'engrenages, de poulies et de ressorts. Il a aussi élaboré des maquettes du cœur, de l'œil, du poumon, et même conçu un lion automate qui a été reconstitué pour l'exposition »* souligne Pascal Brioist. Cet héritage léonardesque est mis en regard de robots comme Roméo, conçu pour assister des personnes en perte d'autonomie, ou le quadrupède *Solo 12*, tous deux issus de recherches menées par le Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (LAAS-CNRS) de Toulouse.



Modèle d'aile à opercules et soufflets, Manuscrit B, fol. 74r (fac-similé), par Léonard de Vinci.

VOL ET VIE

Le troisième espace, entièrement dédié aux plantes et aux insectes, donne à voir de belles reproductions de la vis aérienne ainsi que des machine et sphère volantes de Léonard de Vinci, directement issues de ses observations naturalistes. Lesquelles dialoguent avec des innovations comme CurvACE, un œil artificiel de mouche composé de plus de 600 minuscules « yeux élémentaires ». Et surtout avec une magnifique araignée mécanique, reproduction à l'échelle 1/10e de celle sortie de l'imagination de François Delarozière, le créateur des Machines de l'île de Nantes, parfaitement imitées du vivant.

Viennent ensuite les créatures marines, autre grande source d'inspiration du Toscan comme des ingénieurs et créateurs contemporains. Au premier, on doit une palme de nage inspirée de la membrane du poisson volant ou encore des carènes de navire reproduisant la forme hydrodynamique du thon. Aux seconds, des projets parfois grandioses et utopistes. Pour sa *Cité des Mériens*, une structure flottante de 900 mètres de long, l'architecte français Jacques Rougerie s'est ainsi inspiré de la raie manta. Son projet *SeaOrbiter*, un vaisseau flottant à la verticale et en grande partie immergé, une position idéale pour l'étude des courants marins, doit, lui, beaucoup à l'hippocampe. Deux somptueuses robes signées de la créatrice néerlandaise Iris van Herpen, inspirées des formes et des mouvements du vivant, marquent la transition vers le cinquième et dernier espace de l'exposition, dévolu aux oiseaux et aux fascinantes machines volantes de Léonard de Vinci, dont une reproduction spectaculaire d'un ornithoptère de 6 mètres de long et un manuscrit original. *« Prêté exceptionnellement par la Bibliothèque Ambrosienne de Milan, il présente des dessins exécutés à la sanguine et à l'encre d'une paire d'ailes volantes imitant certainement le mouvement d'une chauve-souris. Et montre comment l'homme sanglé au milieu peut l'actionner »*, précise, admiratif, Pascal Brioist. Indiscutablement, le point d'orgue de cette ode à la nature et au vivant.

Fabienne Lemarchand

CRÉATIONS JACQUES ROUGERIE - CHÂTEAU DU CLOS LUCÉ - PARC LEONARDO DA VINCI. PHOTO : LÉONARD DE SERRES - LAAS-CNRS DE TOULOUSE

LE RETOUR DU **BRONZE**

Avant Rome et les Gaulois, il y eut le bronze. Le Musée d'Archéologie nationale exhume une période fondatrice : celle des Maîtres du feu, société d'alliages, de savoir-faire minutieux et d'objets chargés de sens.



Ceinture en or, vers 1200-1000 av. J.-C., découverte fortuite en 1985 à Guînes (Pas-de-Calais), avec un lot de torques en or.



Maquette du bateau cousu de Douvres, datée d'environ 1500 av. J.-C., musée d'Archéologie nationale.

Avec *Les Maîtres du feu*, le Musée d'Archéologie nationale ressuscite une époque que l'on croit connaître, mais dont l'essence reste mal perçue : l'âge du Bronze (2300–800 av. J.-C.). Clé de voûte de la « Saison Bronze » déployée sur tout le territoire, cette exposition co-produite avec l'Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap) et l'Association pour la promotion des recherches sur l'âge du Bronze (Aprab) célèbre les 150 ans de la reconnaissance de cette période en France, depuis les travaux d'Ernest Chantre.

« *Le génie de l'alliage*, s'émerveille Claude Mordant, président de l'Aprab, *c'est de se demander : que va-t-on obtenir en mêlant deux éléments ?* » Le bronze, né de l'union du cuivre et de l'étain – deux matériaux souvent éloignés l'un de l'autre – n'est pas une découverte, mais une création révolutionnaire.

Moins spectaculaire que la néolithisation – agriculture, sédentarisation, domestication –, la « bronzization », selon le mot de l'archéologue Helle Vandkilde, bouleverse pourtant les sociétés. Elle marque l'avènement de la métallurgie, mais aussi l'accélération des flux, les premières interdépendances.

On apprivoise le cheval (v. 2200 av. J.-C.), invente la roue à rayons, navigue sur des bateaux cousus – tel celui de Douvres, reconstitué à l'échelle 1/2 dans la cour du château de Saint-Germain-en-Laye. Une Europe des mines et des routes se dessine. Le territoire français devient un carrefour et se structure, comme en témoigne la dalle de Saint-Bélec (Leuhan, Finistère), sans doute la plus ancienne carte d'Europe.

On transporte lingots d'étain, or, ambre – mais aussi récits, gestes et mythes. Le bronze devient ornement, monnaie, langage. Il capte la lumière, se pare de cercles, de croix : signes solaires qui habillent dépôts et sépultures. Un imaginaire cosmique se forge, rythmé par la course du soleil.

Grâce aux moules réutilisables, la production en série devient possible. Surgissent épées, torques, fibules, balances, compas décoratifs : des objets qui redéfinissent les gestes et bouleversent les hiérarchies.

FORGER LE POUVOIR

Maîtriser l'alliage, c'est entrer dans un monde de savoirs transmis, où la technique fonde l'autorité. « *Il y a ceux qui savent, ceux qui possèdent…* », appuie Claude Mordant.

L'exposition rend ce pouvoir tangible : plus de 400 objets, reconstitutions grandeur nature, gestes filmés, sons de forges, carré archéobotanique dans les jardins du domaine national. Une immersion. « *Il a fallu quatre ans de travail pour restituer un âge du Bronze vivant, sensible, expérimental* », souligne Rose-Marie Mousseaux, directrice du MAN.

Période sans écriture ni héros, prise en étau entre la préhistoire et le roman national gaulois, l'âge du Bronze fut longtemps confondu avec l'âge du Fer. Pourtant, il invente formes, réseaux, transmissions – tout ce que les civilisations futures célébreront.

Le bronze recommence à parler : il grince, luit, brûle. Et tend à notre modernité un miroir.

Julien Nénault



MAN / VALORIE GÔ - MAN / BAPTISTE SIMON

LES MAÎTRES DU FEU
L'ÂGE DU BRONZE EN FRANCE
2300 – 800 AV. J.-C.
MUSÉE D'ARCHÉOLOGIE NATIONALE, SAINT-GERMAIN-EN-LAYE
Du 13 juin 2025 au 9 mars 2026

LES CAHIERS SCIENCE&VIE

En cette rentrée, explorez les secrets des civilisations !



Photo non contractuelle. © shutterstock.com

Votre abonnement :

6 numéros par an

+ EN CADEAU la montre à quartz



ABONNEZ-VOUS POUR **5,90€** sans engagement

PROFITEZ-EN en flashant le QR code ci-dessus ou rendez-vous sur bit.ly/abo-csv-224

LES CAHIERS SCIENCE&VIE **BULLETIN D'ABONNEMENT** à retourner sous enveloppe affranchie à :
Les Cahiers de Science et Vie – Abonnements – 59898 Lille cedex 9

M036 # D1071679

① Je choisis mon offre d'abonnement :

☐ **Offre liberté : 5,90€ par numéro** puis 6,50€ tous les 2 mois au lieu de ~~8,72€~~*. 1 numéro tous les 2 mois **+ la montre en cadeau** (1) **-32%**

Je résilie quand je le souhaite. Je remplis le mandat ci-dessous accompagné de mon RIB. Je règlerai 6,50€ tous les 2 mois l'année suivante.

☐ **Offre annuelle : 39,90€**/an au lieu de ~~52,32€~~*. 6 numéros par an (2) **-23%**

Mon abonnement se renouvellera automatiquement à la date anniversaire sauf résiliation de ma part.

② Je valide mon règlement :

Par prélèvement automatique :
Je complète l'IBAN à l'aide de mon RIB et je n'oublie pas de **joindre mon RIB**.

IBAN

Vous autorisez Reworld Media Magazines à envoyer des instructions à votre banque pour débiter votre compte, conformément aux instructions de Reworld Media Magazines. Créancier : Reworld Media Magazines 40, avenue Aristide-Briand - 92220 Bagneux Cedex 09 France - Identifiant du créancier : FR 05 ZZZ 489479.

Date et signature obligatoires :
Le ../../....

Par carte bancaire : je me rends sur KiosqueMag.com : **bit.ly/abo-csv-224**
La boutique officielle des Cahiers de Science & Vie
Plus simple, plus rapide, 100% sécurisé !

Par chèque (formule annuelle uniquement) :
je renvoie le coupon accompagné de mon chèque libellé au nom des Cahiers de Science & Vie (sans agrafe, ni scotch) à :
Les Cahiers de Science & Vie Service abonnement 59898 Lille Cedex 9

③ J'indique les coordonnées du bénéficiaire de l'abonnement :

Nom** : Prénom** :

Adresse postale** :

CP** : Ville** :

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

Email :
(Utile pour accéder à votre magazine en numérique et à votre espace client sur Kiosquemag.com, et gérer votre abonnement)

**À remplir obligatoirement

Date de naissance : ../../.... (pour fêter votre anniversaire)

☐ Je ne souhaite pas recevoir les offres Privilège Les Cahiers Science & Vie et Kiosquemag sur des produits et services similaires à ma commande par la Poste, e-mail et téléphone. Dommage !

☐ Je ne souhaite pas que mes coordonnées postales et mon téléphone soient communiqués à des partenaires pour recevoir leurs bons plans. Dommage !

*Le prix de référence à l'année se compose du prix kiosque : 6 n° des Cahiers Science & Vie à 47,40€ et des frais de port à 4,92€. **À remplir obligatoirement. (1) Offre liberté (sans engagement) : je peux résilier à tout moment sur simple appel ou par courrier au service client. Après 1 an, je serai prélevé de 6,50€ tous les 2 mois. (2) Offre avec engagement : abonnement annuel automatiquement reconduit à date d'anniversaire. Le règlement s'effectue en 1 seule fois. Vous serez informé par écrit dans un délai de 3 mois avant le renouvellement de votre abonnement. Vous aurez la possibilité de l'annuler 30 jours avant la date de reconduction auprès du service client. A défaut l'abonnement sera reconduit pour une durée identique à votre abonnement initial. Pour toute autre information, vous pouvez consulter nos CGV sur kiosquemag.com et contacter le service client par mail sur serviceabomag.fr ou encore par courrier à Reworld Media Magazines - Service Client - 40 avenue Aristide Briand - 92227 Bagneux. Offre réservée aux nouveaux abonnés en France Métropolitaine valable jusqu'au 14/10/2025. DOM-TOM et autres pays nous consulter. Vous disposez, conformément à l'article L 221-18 du code de la consommation, d'un droit de rétractation de 14 jours à compter de la réception du magazine en notifiant clairement votre décision à notre service abonnement. Les informations demandées sont destinées à la société REWORLD MEDIA MAGAZINES (KiosqueMag) à des fins de traitement et de gestion de votre commande, de la relation client, des réclamations, de réalisation d'études et de statistiques et, sous réserve de vos choix, de communication marketing par KiosqueMag et/ou ses partenaires par courrier, téléphone et courrier électronique. Vous bénéficiez d'un droit d'accès, rectification, d'effacement de vos données ainsi que d'un droit d'opposition en écrivant à RMM-DPD, c/o service juridique, 40 avenue Aristide Briand - 92220 Bagneux, ou par mail à dpd@reworldmedia.com. Vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL - www.cnil.fr. Pour en savoir plus sur la gestion de vos données personnelles, vos droits et nos partenaires, consultez notre politique de Confidentialité sur www.kiosquemag.com.

DEUX CATALANS, UNE MÉDITERRANÉE

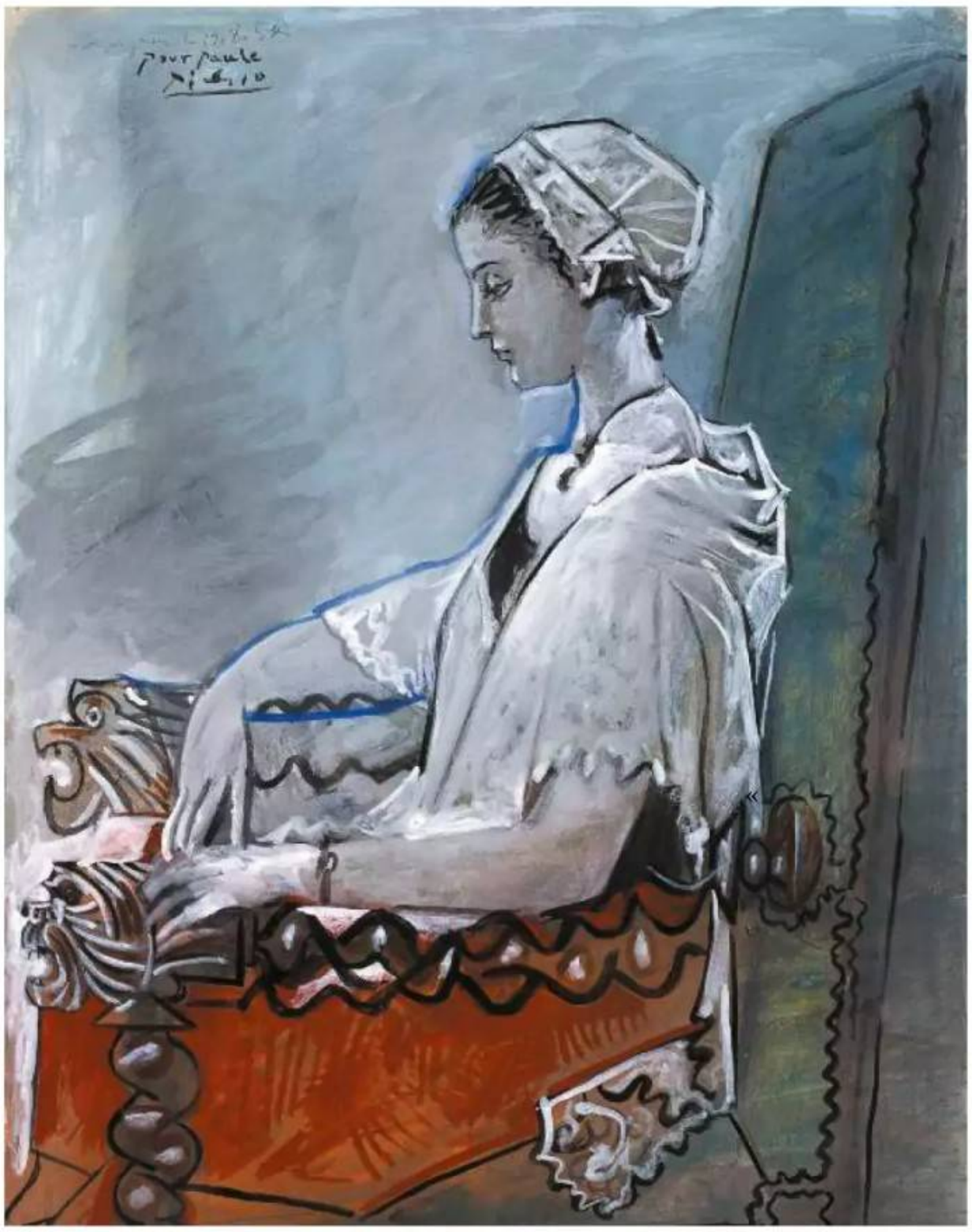
Avec *Maillol–Picasso. Défier l'idéal classique*, le musée Rigaud de Perpignan orchestre un face-à-face inédit entre ses deux figures tutélaires. Deux œuvres baignées dans la lumière du Sud.

Qu'est-ce qui unit Pablo Picasso, le peintre qui a fracturé les formes du XXe siècle, à Aristide Maillol, sculpteur enraciné dans la sensualité des corps et la douceur d'un classicisme revisité ? Vingt ans les séparent, ils n'ont pas choisi le même médium, semblent appartenir à des univers étrangers. Et pourtant. Il y a *la féminine Méditerranée*. Il y a ses courbes. Il y a la Catalogne.

Quand ils se croisent pour la première fois, vers 1902, Picasso est déjà reconnu ; Maillol, pas encore révélé par le Salon d'Automne. À en croire ce dernier, Picasso aurait entonné un chant catalan en le voyant. Anecdote ? Sans doute. Mais elle dit l'essentiel : Maillol, né à Banyuls-sur-Mer, et Picasso, formé à Barcelone, ont la Méditerranée dans le cœur, dans l'œil, dans les mains. Tous deux restent fidèles à la Catalogne, qu'elle soit française ou espagnole : Et c'est Perpignan, aux portes de l'Espagne, qui les rassemble.

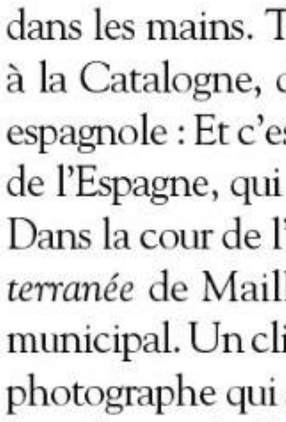
Dans la cour de l'hôtel de ville, *La Méditerranée* de Maillol fait figure de totem municipal. Un cliché de Raymond Fabre, photographe qui suivait Picasso pas à pas lors de ses déplacements perpignanais entre 1953 et 1955, le montre face à cette figure de pierre. Que traduit son regard ? Le respect ? La reconnaissance ? Peut-être une fraternité teintée d'envie. *« Picasso enviait à Maillol ce que lui-même n'a jamais obtenu : la possibilité d'investir l'espace public de ses œuvres »*, avance Thierry Dufrêne, l'un des commissaires scientifiques de l'exposition *Maillol–Picasso, défier l'idéal classique*. Le peintre avait dessiné des projets pour Nice et sa promenade des Anglais : Picasso rêvait d'être statuaire, à ciel ouvert. Pourtant, malgré sa renommée mondiale, cette consécration-là lui a échappé.

Pendant ce temps, Maillol inscrit ses courbes dans le paysage de Perpignan. De la mairie au palais des congrès, en passant par la place de la Loge, ses *Vénus* et baigneuses jalonnent la ville comme autant de strophes d'une ode à la beauté méditerranéenne.



Portrait de Paule de Lazerme en costume catalan, Pablo Picasso, 1954.

VILLE DE PERPIGNAN. MUSÉE D'ART HYACINTHE RIGAUD, P. MARCHESAN. © SUCCESSION PICASSO 2025



MAILLOL-PICASSO, DÉFIER L'IDÉAL CLASSIQUE
MUSÉE HYACINTHE RIGAUD, PERPIGNAN
Du 28 juin au 31 décembre 2025

CHEZ LA COMTESSE

Entre 1953 et 1955, Picasso séjourne dans l'hôtel particulier des Lazerme – aujourd'hui musée Rigaud – au cœur de Perpignan. *« Peu d'artistes auront vécu aussi longtemps dans ce qui deviendrait un musée »*, rappelle Pascale Picard, directrice de l'institution. Issus de la haute bourgeoisie roussillonnaise,

les Lazerme – notables, propriétaires terriens et figures légitimistes devenues comtes par investiture carliste – font, de génération en génération, de leur demeure un salon éclairé et chaleureux, haut lieu d'échanges et d'hospitalité. Jacques et son épouse Paule Lazerme offrent à Picasso chambre et atelier, esquissant pour lui un refuge et un nouveau souffle. Séduit, le peintre se prend à rêver de poser durablement ses valises à Perpignan, au point que ses hôtes lui cherchent un autre hôtel particulier. Mais ses désirs sont encadrés : Leiris, Kahnweiler et l'entourage veillent – « *Picasso est un enjeu* », souligne Pascale Picard. C'est finalement Jacqueline Roque, sa dernière compagne, qui le rappelle à la Côte d'Azur.

Reste que la maison de la rue de l'Ange est pour lui un ancrage profond. Il y trouve l'inspiration, une forme de douceur virile qui l'apaise – et une muse inattendue, en la jeune comtesse Paule. Pour elle, il crée un objet unique dans son œuvre : un collier-amulette, dont les pendentifs figurent le morcellement d'un corps de taureau. Inspiré d'une pièce étrusque conservée au Louvre, conçu avec l'aide du dentiste Roger Cassanier, cette parure exceptionnelle est exposée pour la première fois au musée Rigaud.

Picasso admire en Paule une beauté fière, une grâce archaïque. Il l'immortalise en costume catalan, coiffe traditionnelle, ambassadrice d'un peuple autant que d'un style. Maillol, lorsqu'il sculpte une *Tête de Catalane*, se contente de la couvrir d'un simple voile – et d'un regard moins friand de folklore, plus attentif à la matière. L'un et l'autre, pourtant, rendent hommage avec la même vigueur à la féminité méditerranéenne, charnelle et hiératique.

UN DIALOGUE SOUTERRAIN

L'exposition réunit plus de 110 œuvres sur 400 m², mêlant sculptures, peintures, céramiques et gravures, pour tracer une géographie intime entre Perpignan, Banyuls, et cette Méditerranée intérieure que Maillol et Picasso ont portée en eux.

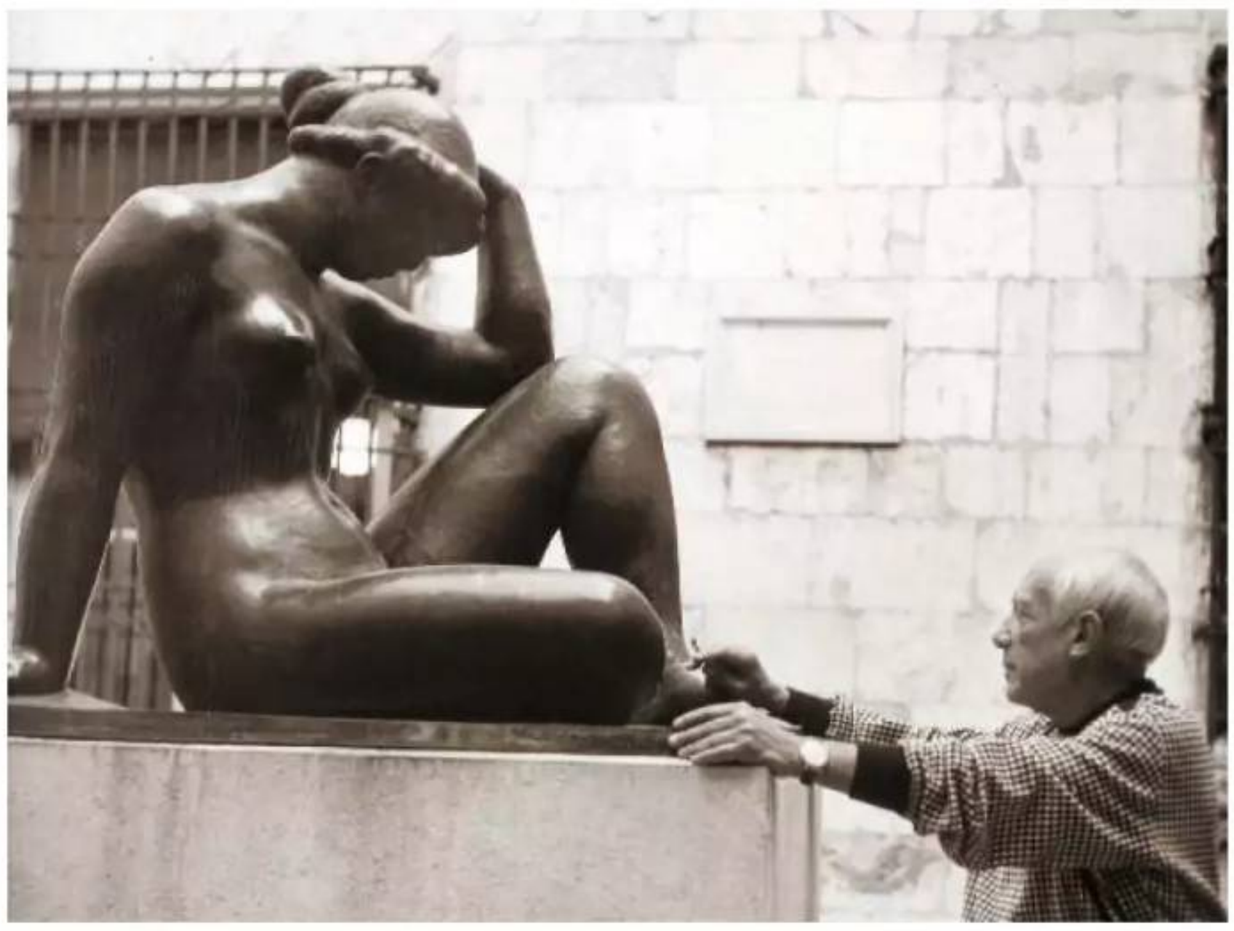
À l'origine, un geste inspiré : celui de Mies van der Rohe, qui, en 1943, imagine un musée pour les petites villes – non comme un lieu d'enfermement de l'art, mais comme un espace ouvert, conçu pour le plaisir, les résonances, les ruptures, loin des cloisonnements chronologiques. Son projet, resté inabouti, mettait en scène un dialogue fécond entre les œuvres de Maillol et de Picasso. Pascale Picard a saisi la portée visionnaire de ce rapprochement, et donne aujourd'hui corps à l'intuition de l'architecte allemand naturalisé américain.

Car il serait vain d'opposer trop simplement Maillol, sculpteur d'un classicisme supposé tranquille, à Picasso, peintre de la dislocation. Tous deux partagent une même économie du geste, un même héritage primitiviste, un même attrait pour l'archaïque. L'un est fils de paysan, tisserand par goût, tailleur de bois au plus près de la matière ; l'autre, hanté par l'Antique, va jusqu'à faire dialoguer indéfiniment un sculpteur, son modèle et son œuvre dans la *Suite Vollard*. Chez Maillol comme chez Picasso, le corps féminin n'est jamais simple motif : il est matrice, mythe, masse vive. Entre eux se joue une fraternité plastique, une gravité sensuelle, une affection partagée pour les formes pleines et les lignes nues. Ce que Maillol a inscrit dans la pierre, Picasso le projette dans le tumulte. Mais tous deux, à leur manière, ont défié l'idéal classique – en l'aimant, en le détournant, en le recréant. Deux imaginaires traversés par la même mer, la même lumière, les mêmes courbes : de *La Montagne* de Maillol, corps massif et primitif, aux *Baigneuses* de Picasso, qui prolongent et démultiplient le regard porté sur *La Méditerranée*.

Julien Nénault

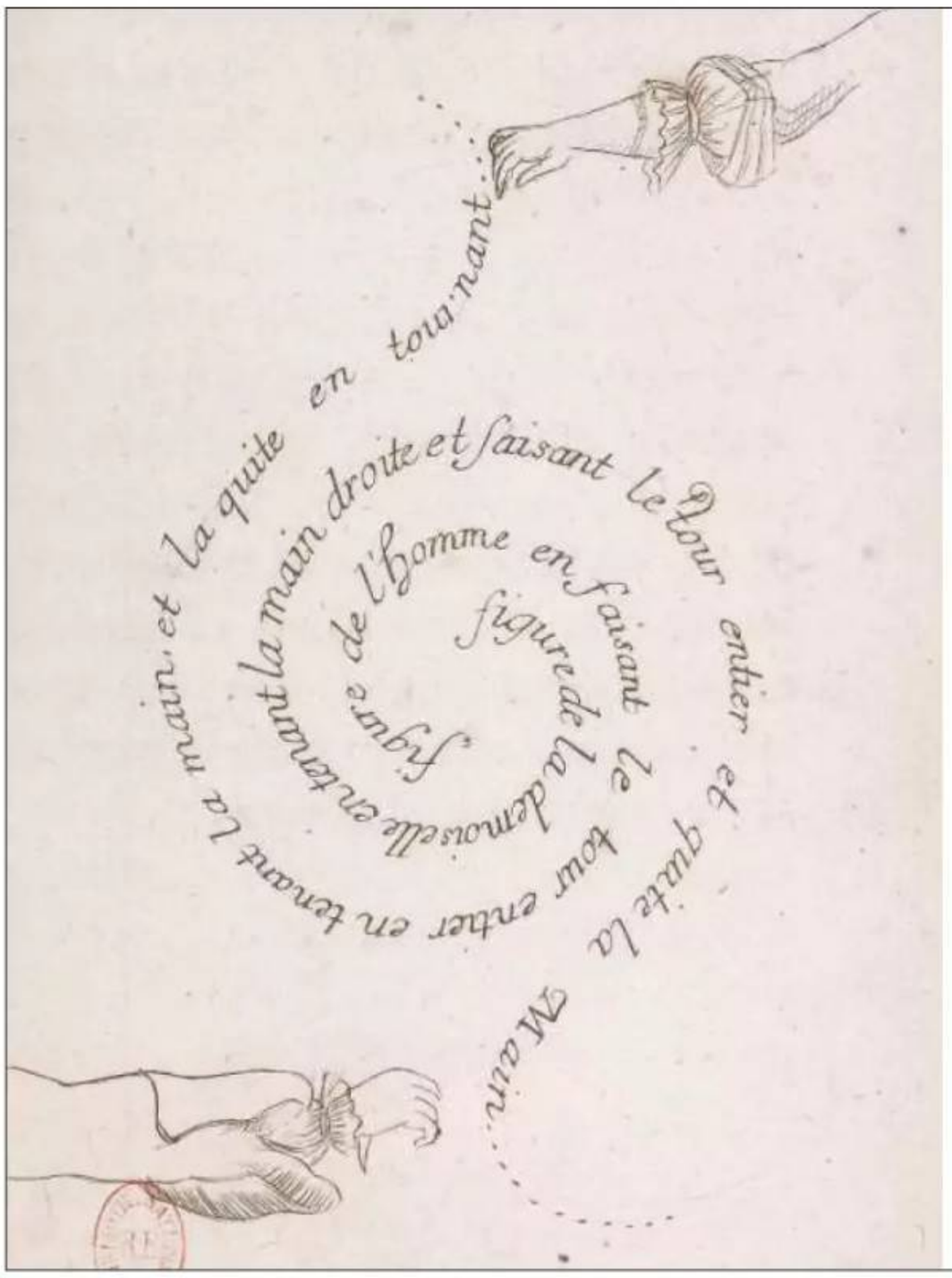


Femmes devant la mer, Pablo Picasso, 1956.



Picasso devant La Méditerranée *de Maillol dans le patio de l'Hôtel de Ville de Perpignan,* Raymond Fabre, 1954.

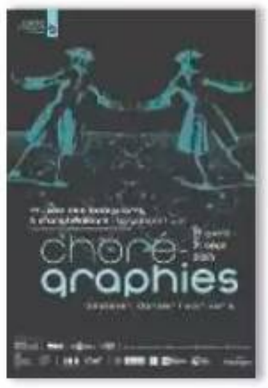
CENTRE POMPIDOU, MNAM-CCI, DIST. GRANDPALAISRMN / P. MIGEAT. © SUCCESSION PICASSO 2025 - RAYMOND FABRE (STUDIO VISAGES)



BESANÇON

DANSONS MAINTENANT!

Loin d'être l'art éphémère et de l'instant auquel on la réduit souvent, la danse s'écrit et s'invente par le dessin. Mais comment représenter sur une feuille de papier un mouvement de danse ? Indiquer un déplacement, des gestes, des postures, voire une sensation, un état de corps ? Ces interrogations sont au cœur de l'exposition organisée par le Musée des Beaux-Arts et de l'Archéologie de Besançon, en collaboration avec l'Institut national d'histoire de l'art (INHA). Plus de 250 pièces anciennes et contemporaines, dessins de maîtres de ballet, peintures, sculptures, carnets de répétition, partitions, etc. nous entraînent dans les méandres des systèmes de notation développés du siècle de Louis XIV à nos jours, faits de signes figuratifs ou abstraits, renvoyant à l'écriture ou au dessin. Autant de traces matérielles qui portent en elles l'empreinte d'un processus de création et constituent d'indispensables outils de transmission. Un incontournable de l'été ! ◗ **F.L.**



CHORÉGRAPHIES. DESSINER, DANSER (XVII^E-XXI^E SIÈCLE).
MUSÉE DES BEAUX-ARTS
ET D'ARCHÉOLOGIE DE BESANÇON
Jusqu'au 21 septembre

PONT-AVEN

BRÛLANTES

À l'occasion de ses 40 ans, le musée de Pont-Aven consacre une grande exposition à la figure de la sorcière, métamorphosée au XIX^e siècle, sous l'influence de Jules Michelet, qui la dépeint en femme libre, savante et rebelle. Intitulée *Sorcières (1860-1920) : fantasmes, savoirs, liberté*, l'exposition réunit plus de 200 œuvres – peintures, sculptures, photographies, objets d'art, extraits littéraires, musicaux et cinématographiques – pour retracer l'évolution de cette icône ambiguë, entre peur, désir et émancipation. Organisé autour de trois sections symboliquement liées au feu – *le feu de la nuit, le feu au corps, le feu du savoir* – le parcours explore l'imaginaire d'un personnage tour à tour persécuté, sexualisé, mystifié. S'ouvrant sur la *Victime* de Gustave Moreau et se refermant sur *L'Incantation* de Paul Sérusier, l'exposition met en contrepoint des visions masculines une vingtaine d'œuvres d'artistes femmes d'aujourd'hui, en éclairant l'ambivalence d'une figure toujours brûlante d'actualité. ◗ **A-L.B.**

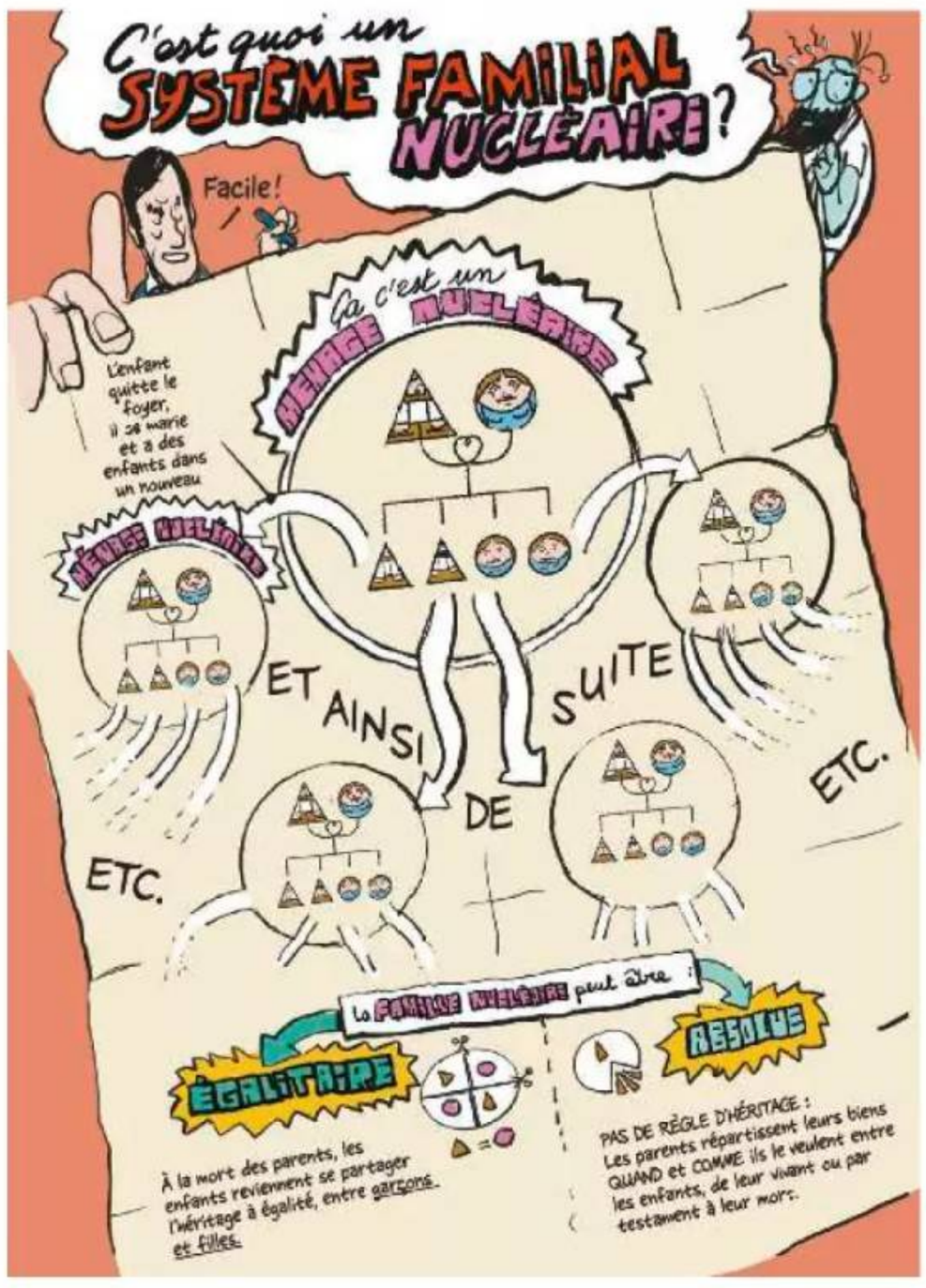


SORCIÈRES (1860-1920) : FANTASMES, SAVOIRS, LIBERTÉ
MUSÉE DE PONT-AVEN
Jusqu'au 16 novembre 2025



PARIS, BIBLIOTHÈQUE NATIONALE DE FRANCE - BIBLIOTHÈQUE DU MUSÉE DE L'OPÉRA - GRAND PALAIS RMN / AGENCE BULLOZ





DANS LE MANOIR DES FAMILLES

Sa fille le lui assène : il ne comprend rien à la famille. Qu'à cela ne tienne, Terreur Graphique part prendre des cours de rattrapage chez le maître en la matière, Emmanuel Todd. Le voilà sur le seuil d'un manoir breton, face à un Todd campé en mage omniscient, aussi cassant que cocasse, parmi ses grimoires paroissiaux. Todd ouvre les portes des systèmes familiaux comme un sorcier moderne traverse des univers parallèles. Effrayé mais captivé, le dessinateur entame une odyssée à travers ces structures invisibles qui façonnent nos visions du monde.

Première escale : la paisible campagne du Bassin parisien au XVIII[e] siècle. Famille nucléaire égalitaire : les enfants quittent tôt le nid, l'héritage se partage à parts égales. Un monde mobile, horizontal, individualiste. Berceau de l'universalisme républicain… mais aussi de la guillotine *« indolore, bienveillante et inclusive »*.

Puis l'Angleterre, version plus brutale du modèle : la famille nucléaire absolue. Les enfants sont poussés dehors plus tôt encore, et l'héritage reste au bon vouloir des parents. La liberté s'y conjugue avec l'acceptation de l'inégalité. Résultat : des esprits aussi respectueux de l'ordre social qu'excentriques. L'Angleterre, c'est *« God save the Queen + Anarchy in the UK »*.

Vient la Russie. Famille communautaire : le père règne, les fils restent, les filles partent. Quand l'industrialisation fait exploser ce modèle, l'individu se retrouve abandonné. *« Mais avec le communisme totalitaire et autoritaire, vous ne serez pas seul ! L'État, le Parti, le KGB et l'économie centralisée sont autant de substituts de la famille. Violents comme la vôtre ! »*

Voici la famille souche. En Allemagne, un seul enfant hérite, les autres s'effacent. Continuité, lenteur, rigueur. Ce modèle engendre à la fois culture de masse (Luther) et culture d'excellence (Mozart, Einstein…). Tandis que la France cultive librement l'égalité, l'Allemagne ordonne l'inégalité : *« On est clairement sur un strabisme divergent. »* Petite parenthèse japonaise : même modèle souche, mais version zen, raffiné dans l'isolement, adouci par l'animisme, le shinto, et un rapport moins dur à l'autorité. Au Japon, on décroche son sérieux avec sa cravate ; *« les Allemands, eux, sont allemands tout le temps. »*

On pouvait craindre une recette ludico-éducative indigeste. Il n'en est rien. Cette BD est un tour de force de vulgarisation joyeuse. Todd en despote fantasque, Terreur Graphique en cancre enthousiaste. Le duo fonctionne à merveille. Références pop, imaginaire débridé, dialogues rythmés : la théorie prend corps avec légèreté et mordant. À mettre entre toutes les mains – surtout celles des ados curieux qui n'ont pas (encore) lu Todd dans le texte. ◗

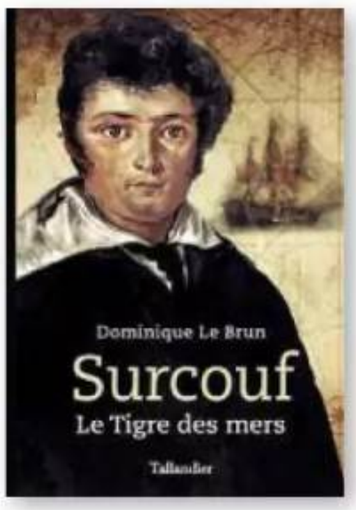
J.N.



IL ÉTAIT UNE FOIS LA FAMILLE
TERREUR GRAPHIQUE
EMMANUEL TODD
Casterman, 120 pages, 23 €

CASTERMAN 2024

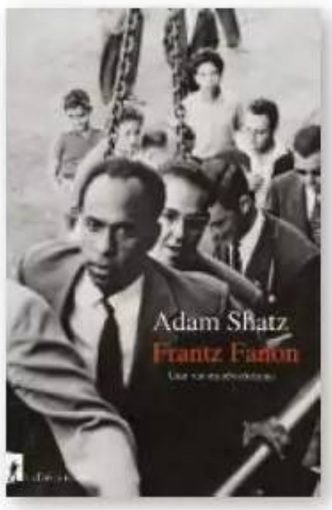
CORSAIRE, MILITANT, RÉGIME



SURCOUF. LE TIGRE DES MERS
DOMINIQUE LE BRUN,
Tallandier,
352 pages.

LE TIGRE DE **SAINT-MALO**

« *Nous sommes entre la Révolution française et le Premier Empire. Tous les océans sont contrôlés par la marine anglaise. Tous ? Non ! Un port peuplé d'irréductibles corsaires inflige encore des pertes cuisantes aux maîtres des mers.* » Tel Astérix le Gaulois, le légendaire Robert Surcouf (1773-1827), corsaire malouin devenu icône nationale, incarna en son temps l'esprit de résistance. Dès les premières pages, le ton est donné : un jeune garçon fugue de son collège, traverse 27 kilomètres sous la neige et frôle la mort. Ce garnement, c'est Surcouf. « *Il s'en sort en pleine forme […] prêt à affronter l'ire parentale pour affirmer sans détour qu'il ne retournera pas chez les prêtres.* » Au fil des chapitres, on découvre un homme complexe : marin précoce à 15 ans, puis négrier malgré lui dans l'océan Indien… L'auteur fait la lumière sur les mythes dont est auréolé Surcouf, notamment la question de ses origines, qui étaient non pas irlandaises, mais normandes, avec des racines vikings. Et l'on finit par comprendre comment, dans une France privée de marine efficace après la Révolution, un homme seul parvint à défier l'hégémonie britannique. Sa réplique légendaire à un capitaine anglais résume bien le feu qui l'animait : « *Nous combattons chacun pour acquérir ce qui nous manque.* » ◗ **C.G.**



FRANTZ FANON. UNE VIE EN RÉVOLUTIONS
ADAM SHATZ,
La Découverte,
512 pages.

LA RÉVOLTE **DANS L'ÂME**

Qui était vraiment Frantz Fanon ? Dans cette biographie dense, l'Américain Adam Shatz retrace la trajectoire fulgurante de cet intellectuel antillais, psychiatre de formation, grand militant anticolonialiste, formé par la République française avant d'être brisé par l'hypocrisie coloniale. Riche de témoignages inédits, elle expose les contradictions de cet « *intellectuel urbain idéalisant la paysannerie, adversaire de la France, profondément nourri de ses traditions révolutionnaires* ». Un homme « bon vivant et ascète », mais qui croyait à la vertu régénératrice de la violence pour les opprimés – « *une thérapie, capable de raviver un sentiment de puissance et de maîtrise de soi* », selon ses propres mots. Évitant l'hagiographie, l'auteur ne cache rien de l'aveuglement de Fanon, engagé aux côtés du FLN, devant certains autoritarismes. Et interroge le rapport que nous entretenons avec lui : pourquoi Frantz Fanon est-il aujourd'hui célébré aux États-Unis, mais toujours suspect chez nous ? C'est que, note l'auteur, « *près de six décennies après la perte de l'Algérie, la France n'a toujours pas pardonné sa "trahison"* »… ◗ **C.G.**



UNE HISTOIRE DE LA DIÉTÉTIQUE. D'HIPPOCRATE AU NUTRI-SCORE
BRUNO LAURIOUX,
CNRS Éditions,
692 pages.

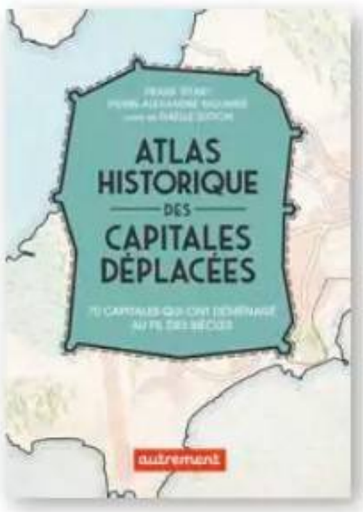
ANTIQUE **DIÉTÉTIQUE**

Et si nos débats sur le Nutri-Score, les régimes « détox » ou le jeûne intermittent n'étaient que l'incarnation la plus récente de réflexions vieilles de quelque 2500 ans ? Dans cet épais ouvrage, l'historien Bruno Laurioux retrace l'évolution d'une discipline née sous Hippocrate. Car ce sont bien les Grecs, notamment le grand médecin Galien, au IIe siècle, qui ont posé les bases de cet « *art de vivre* ». Pour eux, l'alimentation ne se résume pas à nourrir le corps. La diététique est même une branche à part entière de la médecine, tant « *la santé résulte de l'équilibre entre aliments et exercices* ». Une approche holistique que résume ainsi Galien : « *J'appelle régime non seulement ce qui se rapporte à ce qu'on mange, mais aussi les siestes, les exercices, les bains, le coït, le sommeil.* » Le livre note plusieurs ruptures historiques, comme la marginalisation de la diététique au profit de la « *science nutritionnelle* » au XIXe siècle, avant son retour en force avec la mode des régimes amaigrissants. Et rappelle que nos comportements alimentaires plongent leurs racines dans un dialogue millénaire entre santé et culture. ◗ **C.G.**

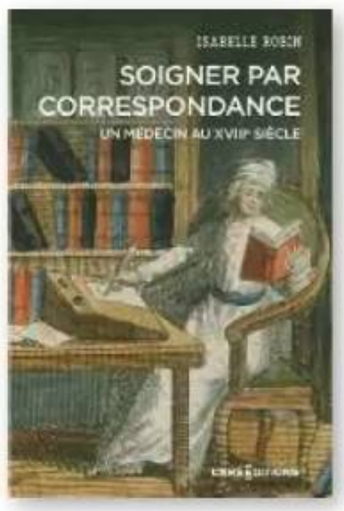
DR

& AUTRES HISTOIRES

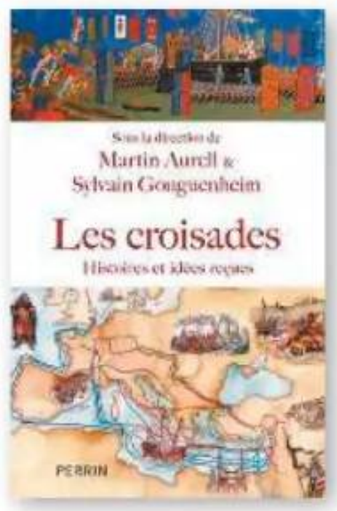
Par Cécile Gérardin & Julien Nénault



ATLAS HISTORIQUE DES CAPITALES DÉPLACÉES. 70 CAPITALES QUI ONT DÉMÉNAGÉ AU FIL DES SIÈCLES
FRANK TÉTART ET PIERRE-ALEXANDRE MOUNIER,
Éditions Autrement, 304 pages.



SOIGNER PAR CORRESPONDANCE. UN MÉDECIN AU XVIII^E SIÈCLE
ISABELLE ROBIN,
CNRS Éditions, 336 pages.



LES CROISADES, HISTOIRES ET IDÉES REÇUES
DIR. MARTIN AURELL ET SYLVAIN GOUGUENHEIM,
Perrin, 400 pages.

LES CAPITALES **DÉMÉNAGENT**

« *Sur les cartes et mappemondes, les capitales ne s'écrivent qu'en lettres minuscules ; les lettres capitales sont, quant à elles, réservées aux États ou aux villes très peuplées* », rappellent en avant-propos le duo d'experts en géopolitique Frank Tétart et Pierre-Alexandre Mounier. Avant de nous emmener à la découverte de 70 villes ayant perdu (ou gagné) leur statut de capitale. De Kyoto à Tokyo, d'Abidjan à Yamoussoukro, de Rio à Brasilia, chaque transfert raconte une ambition : fuir un passé colonial (comme en Indonésie, où Nusantara doit remplacer Jakarta), centraliser le pouvoir (Ankara se substituant à Istanbul en 1923), conjurer des crises (l'Égypte envisage de se doter d'une nouvelle capitale administrative, à l'écart du Caire)… Les cartes « à l'ancienne » de Gaëlle Sutton, entre esthétique vintage et rigueur scientifique, illustrent avec élégance ces métamorphoses. Ce bel atlas ressuscite des cités oubliées : Cartago, au Costa Rica, reléguée pour cause de trahison, ou Entebbe, capitale ougandaise éclipsée par Kampala. Et ouvre une fenêtre sur l'avenir, à l'heure où le dérèglement climatique pousse des États à repenser leur géographie, leur capitale historique étant menacée par la montée des eaux. ◗ **C.G.**

MÉDECIN **À DISTANCE**

À l'heure de la télémédecine, l'historienne Isabelle Robin redonne vie à une pratique oubliée : la consultation médicale par lettre. À travers les écrits d'Étienne François Geoffroy, médecin parisien du XVIII^e siècle, elle dévoile dans son exercice quotidien un praticien dont la plume valait bien un stéthoscope. Geoffroy rédige ses avis *« dans sa robe de chambre brodée et doublée de taffetas cramoisi »*, au cœur de son cabinet-bibliothèque, et les courriers adressés à ses patients sont d'une précision étonnante : *« Le malade devra prendre trois potions à une demi-heure d'intervalle, à base de Parera brava »* (lettre à Antoine Galland, 1712). Cette pratique méconnue constitue un art médical à part entière, fondé sur l'écoute différée, la rigueur du diagnostic écrit et la confiance dans la parole savante, explique cette étude fouillée, fondée sur plus de 400 dossiers de consultation. Le livre met aussi en lumière une figure attachante, celle d'un soignant ancré dans les réseaux intellectuels et sociaux de son temps, très humain malgré la distance. Après tout, hier comme aujourd'hui, *« le médecin produit toujours à la fin un écrit destiné au patient »*. ◗ **C.G.**

REDÉCOUVRIR **LES CROISADES**

À force d'être invoqué à tout propos – croisade idéologique ou religieuse, croisade contre le cancer ou la covid –, le terme s'est chargé de confusions. Il est temps d'en retrouver le sens historique.

Le livre dirigé par Martin Aurell et Sylvain Gouguenheim réunit une équipe internationale d'historiens pour éclairer les croisades sous un jour nouveau. Non, elles ne se limitent pas à la Terre sainte ni au Moyen Âge central : certaines mènent jusqu'à la Baltique, et bien au-delà de la huitième croisade. Non, elles ne se réduisent pas à une opposition manichéenne entre chrétienté et islam : hors des zones directement concernées, le monde musulman y réagit peu. Certains chrétiens s'y opposent ; d'autres fondent, en Syrie ou en Morée, des sociétés originales.

Et dans ce monde de guerre, les femmes ne sont pas absentes : elles y occupent des fonctions multiples, loin des stéréotypes de la captive ou de la martyre.

Un livre rigoureux et accessible, pour regarder les croisades autrement – non comme un « djihad chrétien », mais comme une construction historique mouvante, ancrée dans son temps. ◗ **J.N.**

RENDEZ-VOUS LE 15 OCTOBRE PROCHAIN POUR NOTRE NUMÉRO :

TOUJOURS PLUS LOIN !

La technologie à la conquête de la terre, de la mer et du ciel



NASA

LES CAHIERS SCIENCE&VIE

REWORLD MEDIA

REWORLD MEDIA MAGAZINES
Une publication du groupe
ÉDITEUR REWORLD MEDIA MAGAZINES SAS
40, avenue Aristide Briand
92227 Bagneux Cedex
DIRECTEUR DE LA PUBLICATION Gautier Normand
ACTIONNAIRE Reworld Media France
RCS Nanterre 477 494 371
Tel accueil : 01 41 33 50 00
RÉDACTION 40, avenue Aristide Briand
92227 Bagneux Cedex Tél. : 01 46 48 19 88.
DIRECTRICE DE LA RÉDACTION Danielle McCaffrey, assistée de Bénédicte Orselli
RÉDACTEUR EN CHEF Julien Nénault
RÉALISATION Delicity
DIRECTRICE ARTISTIQUE Anaïs Delaporte
COUVERTURE Émilien Guillon
COORDINATION Marie-Pierre Ombrédanne
SECRÉTAIRE DE RÉDACTION Amélie Renaud
RESPONSABLE PHOTO Pierre Husson

ONT COLLABORÉ À CE NUMÉRO
Anne Lefèvre-Balleydier, Pascale Desclos, Aimie Eliot, Cécile Gérardin, Fabienne Lemarchand, François Mallordy, Marielle Mayo, Christophe Migeon.
SERVICE LECTEURS sev.lecteurs@reworldmedia.com
DIRECTION-ÉDITION
Directeur d'édition : Germain Périnet
Éditrice adjointe : Charlotte Mignerey
DIFFUSION
Responsable ventes marché : Siham Daassa
Responsable diffusion : Isabelle Fargier
ABONNEMENTS ET DIFFUSION
Directrice marketing client : Catherine Grimaud
MARKETING
Responsable marketing et relations presse : Giliane Douls.
PUBLICITÉ. TÉL. 01 41 33 51 16
Directrice générale : Élodie Bretaudeau-Fonteilles
Directrice de Pôle Commercial : Catherine Mireux
Directrice de Publicité : Anne Lefeuvre
Planning : Sandrine Aleton, Angélique Consoli (53 52), Stéphanie Guillard (53 50)
Trafic : Catherine Leblanc (43 86)
FABRICATION Créatoprint, H. Bernardi, V. Brunehaut
DÉPARTEMENT INTERNATIONAL
Directeur : Andrea Albini, albini@reworldmedia.com
PRÉPRESSE/PHOTOGRAVURE Sylvain Boularand,
IMPRIMERIE IMAYE Graphic, 96, bd Henri-Becquerel, ZI les Touches 53021 Laval.
ISSN : n° 1157-4887
Commission paritaire : n° 1128 K 79605.
Tarif d'abonnement légal : 1 an, 6 n° : 41,40 €.
Dépôt légal : août 2025

RELATIONS CLIENTÈLE ABONNÉS
Service Abonnements :
Cahiers de Science & Vie 59898 Lille Cedex 9
Tél. : 01 46 48 47 87
(Ouverture du lundi au vendredi de 9h à 19h, le samedi de 9h à 18h)
Pour nous contacter par écrit :
https://www.serviceabomag.fr
COMMANDES D'ANCIENS NUMÉROS ET RELIURES :
Tél. : 01 46 48 47 87 www.kiosquemag.com
ÉTATS-UNIS ET CANADA : Express Mag, 8275, Avenue Marco Polo, Montréal, QC H1E 7K1, Canada. Tél. : 1 800 363-1310 (français) et 1 877 363-1310 (anglais). Fax : (514) 355-3332.
SUISSE : Edigroup. 39, rue Peillonnex 1225 Chêne Bourg. Tel. : 022 860 84 50 ; reworld@edigroup.ch
BELGIQUE : Edigroup Belgique. Bastion Tower Etage 20 – Pl. du Champs-de-Mars 5 – 1050 Bruxelles. Tél. : 070 233 304. reworld@edigroup.be

Affichage environnemental
Origine du papier : Allemagne.
Taux de fibres recyclées : 0 %.
Certification : PEFC. Impact sur l'eau : Ptot 0,014 kg/tonne.

LE TRI + FACILE BAC DE TRI

PEFC 10-31-1141
Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
pefc-france.org

SCIENCE & VIE
GUERRES & Histoire
REWORLD MEDIA
LEADING MEDIA GROUP
HORS-SÉRIE N°19 JUILLET 2025
HORS-SÉRIE

PORTFOLIO SPÉCIAL
LA GUERRE URBAINE, DE SHANGHAI À GAZA



15 BATAILLES
QUI ONT RÉVOLUTIONNÉ LE COMBAT

LEUCTRES: L'ORDRE OBLIQUE **HÉRACLÉE:** LA LÉGION MANIPULAIRE
CANNES: LE PIÈGE À LOUP **GRANDSON:** LE CARRÉ SUISSE
ROCROI: LA MORT DES TERCIOS **DENAIN:** LA COLONNE
AUERSTAEDT: LE CORPS D'ARMÉE **CAMBRAI:** L'ASSAUT BLINDÉ
TARAWA: LE DÉBARQUEMENT AMPHIBIE MÉCANISÉ

BEL : 9,20€ - ESP : 9,20€ - GR : 9,20€ - DOM S : 9,20€ - ITA : 9,20€ - LUX : 9,20€ - PORT CONT : 9,20€ - CAN : 14,50$CAN - MAR : 97,00DH - TOM S : 1030CFP - CH : 11FS - TUN : 29DTU

En vente actuellement
chez votre marchand de journaux
et sur www.kiosquemag.com

KIOSQUE mag.com
VENTE ET ABONNEMENT

LES CAHIERS
SCIENCE&VIE