

stable. Cela signifie physiquement que le niveau fondamental d'un atome a une énergie finie : l'électron ne tombe pas sur le noyau ni ne s'échappe spontanément à l'infini.

Cette constatation permet de présenter un deuxième argument, de nature heuristique au regard des théories atomiques modernes, justifiant les trois dimensions de l'espace. En effet, en appliquant la théorie atomique de Bohr au cas d'un atome d'hydrogène évoluant dans un espace à plus de cinq dimensions, on démontre que le rayon de l'orbite électronique décroît quand son énergie augmente. En pratique, cela signifie que l'électron tombe sur le noyau ! Dans un espace à quatre dimensions, la situation devient ambiguë car il n'existe plus d'échelle caractéristique de longueur dans le système, comme l'est le rayon de Bohr pour un atome d'hydrogène habituel. Cet argument peut être rendu plus rigoureux et permet d'affirmer que les atomes stables, et donc la chimie et les chimistes eux-mêmes, ne peuvent exister que si l'espace a au maximum trois dimensions.

Enfin, le domaine des ondes électromagnétiques fournit aussi un argument. Dans un espace à une ou deux dimensions, on montre que le signal peut se propager à n'importe quelle vitesse inférieure à celle de la lumière. En revanche, dans un espace tridimensionnel, les ondes électromagnétiques n'ont d'autres choix que de se déplacer à la vitesse de la lumière. En pratique, cela signifie qu'à deux dimensions des signaux émis à des instants différents peuvent être reçus simultanément, ce qui cause une réverbération. Et cet effet se généralise aux espaces de dimensions paires. Dans les espaces de dimensions impaires, seule la dimension trois permet une propagation sans distorsion à grande distance. En résumé, la propagation d'une onde électromagnétique dans un espace à trois dimensions se fait sans réverbération et sans distorsion, ce qui permet de transmettre un signal bien défini à grande distance.

Malgré les arguments précédents, l'espace pourrait compter plus de trois dimensions ! En 1999, les physiciens américains Lisa Randall and Raman Sundrum ont proposé un modèle selon lequel notre Univers n'est qu'un sous-ensemble d'une structure ayant plus de dimensions. Leur motivation était d'expliquer la faiblesse de la gravitation vis-à-vis des autres interactions : à l'échelle microscopique, l'attraction gravitationnelle entre le proton et l'électron d'un atome d'hydrogène est 10^{39} fois plus faible que la force électrique qui les lie.

Imaginons alors que notre univers tridimensionnel soit plongé dans un espace comportant une dimension spatiale supplémentaire et que toutes les interactions, sauf la gravitation, restent confinées dans les trois dimensions qui



La stabilité de l'atome élimine certaines possibilités



nous sont familières. Pouvant s'exprimer dans toutes les dimensions, la gravité semble être, pour nous, observateurs tridimensionnels, victime de « fuites » qui se traduisent par son apparente faiblesse quand nous l'expérimentons dans les trois dimensions ordinaires. En théorie des cordes, ce n'est pas une quatrième dimension étendue, mais six dimensions supplémentaires compactées qui sont invoquées (voir l'encadré page 70) !

BIENVENUE DANS L'HYPERCUBE

L'hypothèse de dimensions spatiales supplémentaires joue un rôle important dans le film *Interstellar* (Christopher Nolan, 2014). Vers la fin du film, Cooper, l'un des astronautes, pénètre dans le trou noir Gargantua, qui est au cœur de l'intrigue. Il se retrouve alors dans un espace-temps étrange à cinq dimensions spatiales, nommé « tesseract », d'où il peut voir la chambre de sa fille Murph démultipliée à l'infini mais avec des temporalités différentes (voir la photo pages 66-67). Il est alors capable de communiquer avec elle à travers le temps au moyen de signaux gravitationnels, lui fournissant les données dont elle a besoin pour résoudre l'équation qui sauvera l'humanité.

Par ses propriétés fascinantes, le tesseract apparaît dans bien d'autres œuvres. Ainsi, dans le film *Cube²: Hypercube* (2002), huit personnages sont piégés dans un tesseract qui est constitué d'un réseau de cubes connectés dont certains altèrent le déroulement du temps. Dès 1941 et sa nouvelle *La Maison biscornue*, Robert Heinlein décrivait une maison construite selon le patron tridimensionnel d'un tesseract. C'est ce même patron que Salvador Dalí utilisa pour sa peinture de 1954 « Crucifixion (Corpus Hypercubus) » suggérant que, tout comme le tesseract existe dans un espace quadridimensionnel inaccessible à l'esprit humain, Dieu pourrait résider dans une dimension qui nous est incompréhensible. À l'instar des pauvres hères, enfermés dans la caverne de Platon, ne serions-nous que des êtres confinés dans trois dimensions, totalement ignorants des dimensions supplémentaires qui nous englobent ? ■

BIBLIOGRAPHIE

A. K. Dewdney, **The planiverse**, Springer, 1984 (nouvelle édition 2001).

M. Tegmark, **On the dimensionality of spacetime**, *Classical and Quantum Gravity*, vol. 14, n° 4, pp. L69-L75, 1997.

J. D. Barrow, **Dimensionality**, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, vol. 310, p. 337-346, 1983.

P. Ehrenfest, **In what way does it become manifest in the fundamental laws of physics that space has three dimensions ?**, *Proceedings of the Royal Academy of Amsterdam*, vol. 20, p. 200-209, 1918.

L'ESSENTIEL

> Au Moyen Âge, les prédictions météorologiques étaient fondées sur l'influence supposée des planètes et de la Lune sur le temps qu'il fait.

> Cette météorologie à caractère astrologique a été développée par les savants du monde islamique médiéval

puis, à partir du xv^e siècle, adoptée et affinée en Europe.

> L'« astrométéorologie » s'est appuyée sur des tables de données et d'observations de plus en plus nombreuses. Elle a perduré jusqu'au $xviii^e$ siècle.

L'AUTRICE



ANNE LAWRENCE-MATHERS
professeuse d'histoire
à l'université de Reading,
au Royaume-Uni

Ce texte est traduit de
l'article « **Medieval weather
prediction** » publié
dans *Physics Today*
(avril 2021, pp. 38-44), avec
l'autorisation de l'American
Institute of Physics.

Prédire le temps au Moyen Âge

Y aura-t-il de la neige à Noël ? La sécheresse va-t-elle durer tout l'été ?
Afin de répondre à de telles questions, les savants de l'Europe médiévale
ont développé l'« astrométéorologie », avec des registres de données
qui ont préparé le terrain à la science météorologique moderne.

Ross Castle, un château médiéval
Irlandais du xv^e siècle, sous un
orage. À cette époque, on faisait
des prédictions du temps fondées
sur des hypothèses astrologiques,
et non de véritables prévisions
météorologiques.

En août 1861, le quotidien londonien *The Times* publiait le premier « bulletin journalier de prévisions météorologiques » au monde. L'expression (en anglais *daily weather forecast*) est due à Robert FitzRoy, précurseur de la météorologie moderne (et officier de marine qui a été le capitaine du *Beagle*, à bord duquel Darwin a voyagé) qui voulait marquer la différence entre ses travaux et les « pronostications » astrologiques. Cela a conduit à l'idée répandue que les prévisions météorologiques sont une science entièrement moderne, et qu'auparavant les signes annonciateurs du temps ne relevaient que du charlatanisme ou du folklore.

Cependant, des recherches récentes ont montré que les astronomes et astrologues du monde islamique médiéval ont largement exploité les connaissances grecques, indiennes, perses et romaines pour créer une nouvelle discipline, l'astrométéorologie. Celle-ci se fondait sur la conviction universelle que les planètes et leurs mouvements agissaient sur les conditions atmosphériques et donc sur le temps qu'il fait. Les savants de l'Europe latine et chrétienne ont repris cette nouvelle science et l'ont développée.

Le souhait de produire des prévisions météorologiques fiables a mené les savants à la conclusion que l'astrométéorologie gagnerait en justesse s'ils s'appuyaient sur des observations précises et en conservaient des archives écrites. Ce type d'archives existe en Europe à partir du XIII^e siècle. Leur corrélation avec les données astronomiques a ouvert la voie à l'approche systématique de FitzRoy.

Les astrométéorologues du monde islamique ont été les premiers à ne plus se contenter, comme dans le monde antique, d'observer les seuls signes immédiats, tels les nuages et le vol des oiseaux, pour prédire le temps. Ils fondaient leur approche sur l'hypothèse que la situation météorologique résulte du mouvement des planètes, du Soleil et de la Lune, à travers des conditions climatiques régionales et saisonnières. Cette astrométéorologie a bénéficié du perfectionnement des calculs des orbites planétaires et de la mise à jour des informations géographiques et météorologiques, avancées qui ont donné à la jeune science sa crédibilité.

Censée fournir des prévisions météorologiques fiables, indicatrices des futures tendances en matière de santé humaine et de production agricole, cette nouvelle discipline est devenue très attrayante pour l'Europe chrétienne également. Une grande fierté transparaît dans les écrits chrétiens médiévaux concernant les questions météorologiques auxquelles on pouvait désormais commencer à répondre. Au premier plan de ces questions figurait celle-ci, qui échappait aux météorologues classiques :

comment expliquer que le temps varie tant d'une année sur l'autre, alors que les saisons sont dues aux configurations régulières et répétitives produites par la forme sphérique de la Terre et ses interactions avec le Soleil ?

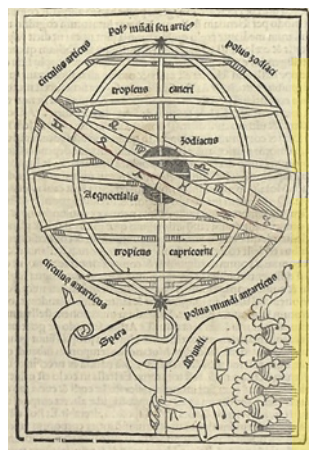
Au XI^e siècle, Geoffroy V d'Anjou, le père du roi d'Angleterre Henri II, posa cette question au philosophe Guillaume de Conches. S'appuyant sur des traductions d'œuvres attribuées à l'astronome Māshā'allāh (VIII^e siècle), au savant Constantin l'Africain (XI^e siècle), et sur les discussions contemporaines d'Adélarde de Bath, Guillaume invoqua les modèles ptoléméens des mouvements planétaires et les théories islamiques de leurs impacts sur les saisons et le temps qu'il fait localement.

Le corpus de documents scientifiques traduits de l'arabe a continué à s'étoffer aux XII^e et XIII^e siècles. À cette même époque, l'accroissement de la population a stimulé l'urbanisation, le commerce sur de longues distances et la prospérité. Avec des prévisions censées être meilleures, les dirigeants étaient mieux à même d'aborder des préoccupations sociétales pratiques, comme la stratégie militaire et le ravitaillement des populations, qui dépendent fortement de la météo. Les banquiers et les commerçants étaient prêts à payer pour ces pré-

L'astrométéorologie s'est développée et n'a été discréditée qu'au XVIII^e siècle

cieuses informations. En conséquence, l'astrométéorologie a continué à se développer aux XIV^e et XV^e siècles, et a atteint un public de plus en plus large aux XVI^e et XVII^e siècles. Elle n'est tombée en disgrâce qu'au XVIII^e siècle, quand les prévisionnistes ont commencé à discréditer l'astrologie.

Les prédictions astrométéorologiques étaient-elles satisfaisantes ? Nous savons aujourd'hui que la théorie sur laquelle elles s'appuyaient est complètement erronée. Il est cependant difficile de mesurer leur inexactitude : la plupart des prédictions qui nous sont parvenues portent sur des jours particuliers et l'on ne dispose que très rarement de registres météorologiques détaillés. Toujours est-il que les contemporains leur accordaient un certain



Cette illustration du livre *De sphaera* de Joannes de Sacrobosco (1195-1256 environ), imprimé en 1488, montre le cercle du zodiaque et ses divers signes entourant plusieurs lignes latitudinales qui démarquent l'équateur, les tropiques et les régions polaires. Pour les savants du Moyen Âge, les zones climatiques et les divisions célestes étaient à la base des prédictions astrométéorologiques.

crédit ; et les savants s'efforçaient d'améliorer leurs prédictions en essayant d'identifier des corrélations entre les données planétaires et les situations météorologiques.

UNE MÉTÉOROLOGIE INSPIRÉE DE L'ASTROLOGIE

L'astrométéorologie puise ses sources dans l'Antiquité. Les savants hellénistiques, en particulier Claude Ptolémée d'Alexandrie, avaient réalisé des avancées considérables. Ptolémée a produit des modèles géométriques et mathématiques des mouvements planétaires fondés sur des observations consignées par écrit au fil des siècles ainsi que sur de nouvelles observations qu'il effectuait lui-même. Ses œuvres fondamentales (*l'Almageste* et le *Tetrabiblos*) fournissaient les moyens de calculer les positions planétaires, avec des instructions quant à la manière d'interpréter les données.

À chaque planète étaient attribuées des qualités spécifiques qui exerçaient leur influence sur la Terre. Saturne, caractérisée comme lointaine, lente et de couleur froide, était associée aux éléments froids et secs de la Terre. Mercure, petite planète rapide, habituellement proche de Vénus et de la Lune, était associée aux éléments chauds et humides de l'air. La façon exacte dont ces qualités planétaires influençaient sur le temps était matière à débat, mais le mécanisme le plus largement admis était que des rayons imperceptibles étaient émis par les planètes et transportaient leurs qualités jusque sur Terre.

Le Soleil et la Lune étaient les deux corps astronomiques les plus importants. L'effet du Soleil sur le temps et le climat par sa lumière et sa chaleur était établi de longue date, et l'influence de la Lune sur les marées des océans, les fluides corporels et la croissance des plantes était largement reconnue, du moins parmi les personnes instruites.

Pour faire une prédiction, il fallait dans un premier temps calculer, pour une date choisie, les positions de toutes les planètes par rapport à la ceinture zodiacale et à l'écliptique (la trajectoire apparente du Soleil sur la sphère céleste). Toutes deux étaient considérées comme circulaires, le zodiaque étant divisé en douze secteurs égaux, ou signes (*voir la figure ci-dessus*). Ptolémée avait systématisé les divisions du ciel et expliqué que chaque secteur avait ses propres caractéristiques, qui agissaient sur toutes les planètes qui le traversaient.

Pour les astrométéorologues, les relations angulaires entre les planètes déterminaient en grande partie leurs effets mutuels. Les planètes opposées, de part et d'autre du zodiaque, étaient négativement liées ; un angle de 45 degrés était également problématique et très susceptible d'entraîner une perturbation atmosphérique. En revanche, les planètes

formant des angles de 60 ou 120 degrés interagissaient plus favorablement et produisaient un temps plus clément. Quand les planètes étaient proches l'une de l'autre, l'intensité de leurs effets augmentait selon la nature et la position des planètes impliquées. Les prévisionnistes devaient également prendre en compte la zone climatique du lieu choisi et la saison en cours. Par exemple, une augmentation de la chaleur atmosphérique aurait un certain ensemble d'effets l'été près de l'équateur, et un autre l'hiver près du tropique du Cancer. À partir d'un ensemble apparemment simple de principes, les prévisionnistes devaient faire preuve de jugement pour déterminer les résultats de tous les facteurs en jeu.

Les calculs intervenant dans une prévision reposaient sur l'acquis des astronomes du monde islamique, qui avaient construit des modèles précis et des tables de référence remises à jour des structures et des mouvements célestes. Ces travaux avaient eux-mêmes été rendus possibles par les progrès des mathématiques ainsi que par des outils et instruments scientifiques plus performants. Les astronomes ont testé et révisé les instructions de Ptolémée relatives aux prédictions météorologiques, et nombre d'entre eux ont produit leurs propres traités sur le sujet. Ces écrits spécialisés donnaient non seulement des indications sur les techniques de base, mais s'appuyaient également sur les données planétaires actualisées et les nouveaux modèles cosmographiques. Le résultat était un corpus d'ouvrages sophistiqués, séduisants et complexes.

UN HÉRITAGE DES SAVANTS DU MONDE ISLAMIQUE

Les avancées scientifiques du monde islamique ont été remarquées dans l'Europe latine à partir du XI^e siècle. Elles ont suscité curiosité et émulation plutôt que rejet. Les conquêtes territoriales dans la péninsule Ibérique d'al-Andalus ont mis à la disposition des nouveaux gouvernants chrétiens des bibliothécaires, des érudits et des traducteurs connaissant la langue arabe. Ainsi est né l'un des plus grands mouvements de traduction savante et d'assimilation culturelle de l'histoire de l'Europe.

Les textes d'astrométéorologie y avaient une place honorable. Par exemple, les savants de l'Occident chrétien ont traduit et exploité avec enthousiasme les versions actualisées des tables des mouvements planétaires de Ptolémée, même si cela nécessitait de travailler avec un calendrier et un système de dates étrangers, ainsi qu'avec les chiffres indo-arabes et des concepts mathématiques sous-jacents peu familiers.

Plusieurs savants du monde islamique ont ainsi acquis une autorité dans l'Europe