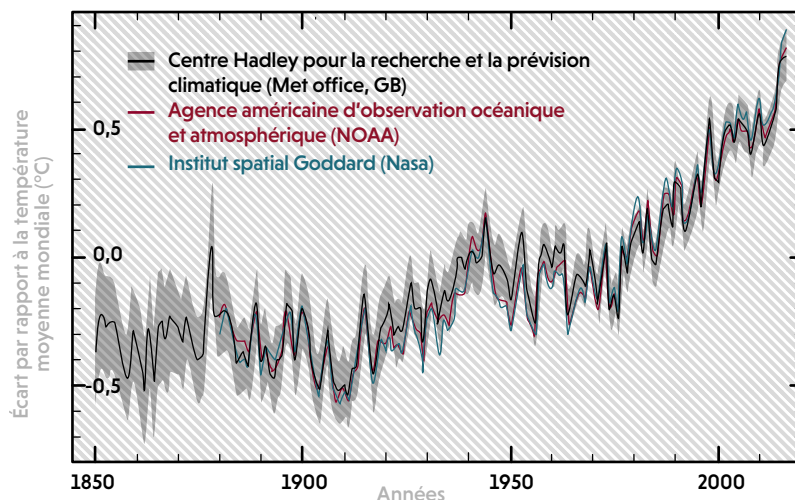


que les variations naturelles du climat.» Le rapport du Giec incitait l'ONU à mettre en place la Convention-cadre sur les changements climatiques, qui sera ratifiée par 154 États en 1992, au sommet de Rio de Janeiro.

En 1995, le constat scientifique s'est affiné: pour la première fois, les auteurs du deuxième rapport du Giec concluent qu'un faisceau d'éléments suggère une influence humaine sur le climat. Le troisième rapport, en 2001, le confirme: «Des preuves plus récentes et plus concluantes permettent de dire que la majeure partie du réchauffement observé au cours des cinquante dernières années est due aux activités humaines.»

En 2007, sur la base des nouveaux résultats, le quatrième rapport affirme que l'essentiel du réchauffement observé depuis le milieu du xx^e siècle est, avec un niveau de confiance de 90%, lié aux activités humaines. Et en 2013, le cinquième rapport conclut avec un niveau de confiance encore plus élevé (95%). Il décrit de façon plus quantitative l'influence humaine, qui domine à l'échelle planétaire non seulement les réchauffements atmosphérique et océanique, mais aussi la montée du niveau des mers. On décèle désormais cette influence également au niveau régional (tendance des températures, évolution des glaciers, vagues de chaleur, intensité des pluies torrentielles...).



Depuis 2013, aucun résultat scientifique n'a contredit ces conclusions. Les climatologues continuent patiemment leur travail pour mieux anticiper les conséquences du réchauffement climatique. Ils se concentrent en particulier sur les épisodes extrêmes singuliers que peuvent constituer certains ouragans de forte intensité, pluies torrentielles ou vagues de chaleur. Ces nouvelles estimations contribueront au sixième rapport du Giec, prévu pour 2021. ■

Ci-dessus, l'évolution de la température moyenne annuelle à la surface de la Terre par rapport à la période de référence 1961-1990 traduit la tendance mondiale au réchauffement. Elle est calculée à partir des mesures de température de l'air au-dessus des continents et de la température de surface des océans. Trois jeux de données sont comparés. La plage d'incertitude des données britanniques est en gris.

TEDx Saclay

présente

30
NOVEMBRE

@CENTRALESUPÉLEC

tedxsaclay.com

AU SERVICE DU VIVANT

CentraleSupélec

PARIS
SACLAY

DATA
CAMPUS

NOVOTEL
HOTELS & RESORTS

POUR LA
SCIENCE

Elphane
LE DÉBUTANT

P
P R

AirLiquide

BANQUE POPULAIRE VAL DE FRANCE
ADDITIONNER LES FORCES
MULTIPLIER LES CHANCES

4X

2015 L'astronomie gravitationnelle est née

La coalescence de deux astres compacts crée des vibrations dans la trame de l'espace-temps. Longtemps attendue, la détection de ces ondes gravitationnelles a inauguré une astronomie nouvelle. L'exploit vient d'être récompensé par le prix Nobel de physique.

Ce lundi 14 septembre 2015, les détecteurs de *Ligo*, aux États-Unis, enregistrent un signal, noté GW150914, de moins de une seconde. Cinq mois plus tard, les physiciens de cet observatoire particulier révéleront qu'il traduisait le passage de l'onde gravitationnelle créée par la fusion de deux trous noirs lointains. Le 26 décembre, *Ligo* détecte un nouvel événement comparable. Un troisième est enregistré le 4 janvier 2017. Et le 27 septembre dernier, *Ligo* et *Virgo*, le détecteur européen situé près de Pise et devenu pleinement opérationnel entre-temps, ont annoncé une quatrième mesure du même type.

Ligo est l'acronyme pour « Observatoire d'ondes gravitationnelles par interférométrie ».

laser». Il est composé de deux interféromètres, l'un en Louisiane, l'autre dans l'État de Washington. Un puissant faisceau laser y est divisé en deux pinceaux lumineux perpendiculaires qui, après s'être réfléchis sur des miroirs distants de 4 kilomètres, reviennent se combiner sur un détecteur de photons. Leur sensibilité à toute variation de la distance parcourue par les faisceaux est si grande qu'un déplacement d'un centième de la taille d'un proton est détectable.

Depuis que les interféromètres de *Ligo* ont atteint la sensibilité requise pour détecter les signaux gravitationnels, et que celui de *Virgo* les a rejoints, une nouvelle page de l'astronomie s'est ouverte, dont on attend une moisson de nouveaux résultats.

Un trou noir est de la gravitation à l'état pur. Une solution *a priori* déconcertante des équations d'Einstein (les équations de la relativité générale) nous avait prédit leur existence avant leur découverte. Leur surface est immatérielle : on ne s'y pose pas, on la traverse, sans possibilité de retour. D'où son nom d'« horizon », et celui de « trou noir » donné à l'astre, puisqu'aucune lumière ne peut en échapper.

Les trous noirs sont omniprésents dans l'Univers. Certains sont très massifs, tel celui qui se situe au centre de la Voie lactée, dont on infère les propriétés en observant le ballet d'une douzaine d'étoiles en orbite autour de lui. Par ailleurs, l'existence dans notre galaxie d'une vingtaine de trous noirs membres de systèmes doubles est prouvée par leurs masses supérieures à celle que peut atteindre une étoile compacte. Leurs masses valent une dizaine de fois celle du Soleil et leurs horizons n'ont que quelques dizaines de kilomètres de rayon. On les détecte grâce au rayonnement X de la matière en provenance de l'autre étoile, chauffée au cours de sa chute vers l'horizon du trou noir, au-delà duquel elle disparaît à jamais.

L'existence des ondes gravitationnelles avait été établie indirectement, grâce à l'observation de quatre « pulsars binaires » – des systèmes doubles formés d'objets compacts, dont un au moins est une étoile à neutrons munie d'un gyrophare radio. L'analyse fine des temps d'arrivée sur Terre des impulsions montre un rétrécissement de leurs orbites relatives (quelques millimètres par révolution pour une orbite de plusieurs centaines de milliers de kilomètres), imputé à la perte d'énergie par émission d'ondes gravitationnelles.

Ces mesures sont en tout point conformes à la prédiction faite par Einstein en 1918, mais qui n'est apparue comme solide que beaucoup plus tard. Il a en effet fallu comprendre comment les ondes gravitationnelles peuvent transporter au loin de l'énergie et de l'information sur leur source.

Cependant, avant le 14 septembre 2015, on n'avait jamais observé de systèmes à deux trous

LES AUTEURS



NATHALIE DERUELLE
directrice de recherche
au CNRS, laboratoire
APC (AstroParticule
et Cosmologie),
université Paris-Diderot



JEAN-PIERRE LASOTA
directeur de recherche
émérite à l'IAP (Institut
d'astrophysique de
Paris) et professeur
au Centre d'astronomie
Nicolas Copernic,
à Varsovie (Pologne)

noirs et il manquait la détection directe d'une onde gravitationnelle.

Chacun des quatre signaux gravitationnels détectés jusqu'ici a été émis après que deux trous noirs, en spiralant l'un vers l'autre, ont fini par approcher la vitesse de la lumière, puis ont fusionné en une fraction de seconde en un seul trou noir, laissant derrière eux quelques brefs soubresauts de l'espace-temps.

Le défi posé par leur détection a d'abord été expérimental. Sous l'impulsion d'Alain Brillet (Médaille d'or du CNRS en 2017), la France y a apporté une contribution importante : le revêtement des miroirs, qui réfléchissent 99,9999% de la lumière, a été élaboré à Lyon, au Laboratoire des matériaux avancés fondé par Jean-Marie Mackowski. Le défi a aussi été théorique, car il fallait chercher des signaux extraordinairement faibles dans la botte de foin du bruit expérimental. Cela impliquait de les prédire avec une extrême précision. L'école menée par Thibault Damour (aussi Médaille d'or du CNRS en 2017) s'est particulièrement illustrée dans ce domaine.

Le défi a été relevé et, à chaque détection, la comparaison de centaines de milliers de formes théoriques d'ondes avec les signaux recueillis a permis d'extraire les caractéristiques des

Les ondes détectées à ce jour correspondent à la chute de deux trous noirs l'un sur l'autre

BIBLIOGRAPHIE

S. Bailly, La détection des ondes gravitationnelles, une nouvelle fenêtre sur l'Univers, Pour la Science, n° 462, pp. 26-37, 2016.

N. Deruelle, De Pythagore à Einstein, tout est nombre, Belin, 2015.

J.-P. Lasota, La science des trous noirs, Odile Jacob, 2010.

systèmes émetteurs. Par exemple, les deux trous noirs initiaux liés au signal GW150914 pesaient 36 et 29 masses solaires, tandis que le trou noir résultant de leur fusion est de 62 masses solaires.

L'astronomie des ondes gravitationnelles est devenue une réalité. Elle nous a déjà appris que la surface des trous noirs est bien un horizon immatériel ; bientôt, on devrait enregistrer des fusions d'étoiles à neutrons, qui s'accompagnent *a priori* de flashes électromagnétiques. Gageons que d'ici quelques années, avec la mise en service d'autres détecteurs en projet au Japon et en Inde, et plus tard la mise en orbite de l'interféromètre spatial européen *eLisa*, l'astronomie gravitationnelle fera partie du quotidien des chercheurs. ■

2016

Apprentissage profond

pour intelligences artificielles

Après des décennies de trop lents progrès, les recherches en intelligence artificielle ont franchi un pas décisif, qui explique l'effervescence actuelle autour des réseaux neuronaux profonds.

En 2016, un ordinateur a battu Lee Sedol, champion professionnel du jeu de go, grâce à un logiciel conçu par la société Google DeepMind. Cet exploit remarquable est le fruit de grands et récents progrès dans le domaine de l'intelligence artificielle. Mais est-on pour autant proche de l'intelligence humaine? Non, car le logiciel de DeepMind ne sait rien faire d'autre que jouer au go. Comment en est-on arrivé là et comment envisage-t-on de progresser?

L'intelligence se démontre à travers une compétence dans des domaines particuliers, ce qui nécessite de bonnes connaissances dans les domaines en question. Pour rendre les ordinateurs aussi intelligents que les humains, il faut donc faire en sorte que les ordinateurs aient au moins autant de connaissances qu'un humain ordinaire. Plusieurs décennies durant, l'approche dominante dans les recherches sur l'intelligence artificielle a ainsi consisté à fournir directement à la machine des connaissances.

Il s'agissait alors de formaliser nos connaissances, c'est-à-dire de les mettre sous une forme claire et compréhensible par l'ordinateur. Mais beaucoup de nos connaissances sont intuitives et ne nous sont pas consciemment accessibles.

L'intuition est ce qui permet au joueur de go de bien choisir son prochain coup, au bon conducteur d'éviter un accident, au médecin d'allier ses connaissances livresques à la psychologie du patient; et surtout, cela implique presque toutes nos capacités perceptives, que l'on ne sait pas décrire précisément, mais qui sont essentielles à notre compréhension du monde.

Pour l'intelligence artificielle, la solution qui s'est révélée fonctionner à merveille est que l'ordinateur acquière lui-même ses connaissances, en apprenant à partir d'exemples. Le domaine scientifique relatif à cet «apprentissage automatique» a connu plusieurs vagues de progrès, et l'on y a exploré de nombreux algorithmes et formalismes mathématiques. Une bonne partie d'entre eux sont regroupés derrière l'idée des «réseaux de neurones», qui consiste à s'inspirer du cerveau pour effectuer des formes de calcul différentes de celles de l'ordinateur classique.

Dans cette approche, des neurones artificiels (des éléments logiciels ou matériels) reçoivent des signaux provenant d'autres neurones, font un calcul relativement simple pour combiner ces signaux et renvoient le résultat à d'autres neurones (voir l'encadré page 102). Les réseaux neuronaux artificiels sont souvent organisés en couches successives, les résultats calculés par une couche étant envoyés aux couches suivantes.

L'AUTEUR



YOSHUA BENGIO
professeur
au département
d'informatique
et recherche
opérationnelle
de l'université
de Montréal



Fondé sur de l'apprentissage profond, le programme AlphaGo de la société Google DeepMind a permis à un ordinateur (plutôt qu'un robot) de battre au jeu de go un champion mondial, le Coréen Lee Sedol.

L'apprentissage se fait par une modification du calcul effectué par chaque neurone, selon un algorithme qui ajuste les «poids» des connexions entre neurones (des coefficients dont dépend le calcul fait par chaque neurone).

Au début des années 2000, les recherches sur les réseaux neuronaux n'étaient plus en vogue, faute de résultats suffisamment probants. Or c'est précisément à ce moment qu'une percée a eu lieu, hors de la lumière des projecteurs médiatiques qui inondent aujourd'hui le domaine. Pour la première fois, en 2006, trois équipes, autour de Geoffrey Hinton, à l'université de Toronto, de moi-même, à l'université de Montréal, et de Yann LeCun, à l'université de New York, ont réussi, avec un nouvel algorithme, à entraîner des réseaux neuronaux «profonds» – composés de plus d'une ou deux couches entre l'entrée et la sortie du réseau. Nous avions l'intuition, depuis longtemps, qu'un réseau profond pourrait être plus puissant que ceux explorés jusque-là. Ce qui a été confirmé dans les années suivantes.

Les tentatives précédentes pour entraîner des réseaux profonds n'avaient pas été fructueuses, sans doute à cause d'une difficulté mathématique que l'on ne comprend pas encore totalement. C'est seulement en 2011 que notre équipe a découvert que certaines formes de non-linéarité dans le calcul effectué par les

neurones artificiels facilitaient beaucoup l'entraînement de réseaux profonds. Depuis, les succès et les progrès se sont accélérés, d'abord pour la reconnaissance de la parole – de nos jours, presque tous les systèmes opérationnels de ce type utilisent l'apprentissage profond –, puis pour la vision par ordinateur.

Ces progrès ont été possibles non seulement grâce à de nouveaux algorithmes et architectures de réseaux neuronaux, mais aussi grâce à la puissance de calcul accrue des puces graphiques (les GPU) et à la disponibilité de grandes bases de données étiquetées (qui contiennent des millions d'exemples servant à l'entraînement, pour lesquels on indique à l'ordinateur la bonne réponse à produire, par exemple la catégorie à laquelle appartient l'objet principal figurant dans une image).

L'ordinateur fait de l'apprentissage supervisé: on le nourrit avec des exemples constitués chacun d'un couple (entrée, sortie désirée). Souvent, la sortie désirée doit être fournie par un humain. Ce travail d'étiquetage, fastidieux et coûteux, est aujourd'hui au cœur de la plupart des systèmes industriels fondés sur l'apprentissage profond.

Alors que les réseaux neuronaux des années 1990 étaient essentiellement limités à la reconnaissance des formes, appliquée à une >

BIBLIOGRAPHIE

Y. LeCun et al., **Deep learning**, *Nature*, vol. 521, pp. 436-444, 2015.

D. Bahdanau et al., **Neural machine translation by jointly learning to align and translate**, *ICLR Conference*, 2015.

X. Glorot et al., **Deep sparse rectifier neural networks**, *AISTATS Proceedings, PMLR*, pp. 315-323, 2011.

G. E. Hinton et al., **A fast learning algorithm for deep belief nets**, *Neural Computation*, vol. 18(7), pp. 1527-1554, 2006.

Y. Bengio et al., **Greedy layer-wise training of deep networks**, *NIPS Proceedings*, pp. 153-160, 2006.

> entrée représentée par un vecteur de taille fixe, les réseaux neuronaux d'aujourd'hui peuvent traiter des entrées dont la taille est variable – listes, ensembles, arbres, graphes, etc.

Par ailleurs, certains algorithmes et architectures confèrent aux réseaux neuronaux un mécanisme dit d'attention diffuse, qui permet à chaque instant de focaliser le calcul sur un élément (ou un petit nombre d'éléments) de l'entrée qui est plus pertinent. Ces éléments peuvent être des positions dans une image, auquel cas on parle d'attention visuelle, des parties d'un graphe ou de tout autre ensemble d'éléments que l'ordinateur doit traiter.

Le mécanisme d'attention diffuse facilite l'entraînement du réseau neuronal et a été l'élément principal qui nous a permis d'obtenir une percée en traduction automatique, à partir de 2014-2015. On retrouve maintenant un tel système dans Google Translate, avec une qualité de traduction de loin supérieure à ce qui existait auparavant.

L'attention diffuse intervient aussi dans l'exploration moderne de mécanismes appris de raisonnement. Les chercheurs en apprentissage profond considèrent aujourd'hui le raisonnement comme une façon de combiner séquentiellement plusieurs éléments (des faits) afin de parvenir à une conclusion (un fait inféré ou déduit). Le mécanisme de raisonnement (par exemple, une règle d'inférence du type: « Si A et B, alors C ») lui-même n'est pas fixé d'avance, mais est appris par la machine, de façon à pouvoir résoudre les problèmes qui lui sont soumis et dont la solution exige un raisonnement.

APPRENTISSAGE NON SUPERVISÉ

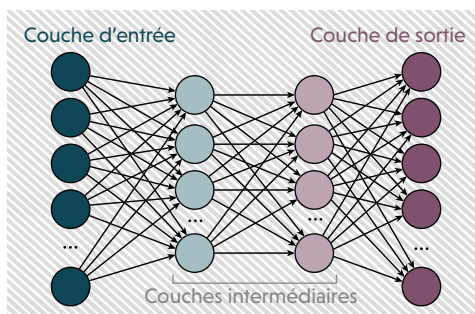
Pour s'approcher de l'intelligence humaine, il faudra découvrir des mécanismes d'apprentissage grâce auxquels la machine pourra réellement comprendre les rouages profonds de son environnement. Or il est impossible de compter sur les humains pour fournir une interprétation sémantique de toutes les données utilisées pour entraîner la machine. C'est pourquoi les chercheurs s'éloignent du cadre classique de l'apprentissage supervisé et se mettent à combiner apprentissage non supervisé et apprentissage « par renforcement ».

Dans l'apprentissage profond non supervisé, on fournit à la machine un ensemble de données ou d'exemples sans lui spécifier le résultat qu'elle doit assigner à chacun d'eux: l'algorithme doit permettre au système de classer de lui-même ces données (par exemple, à partir de nombreuses images de véhicules présentées lors de l'apprentissage, la machine pourra déterminer, sur une nouvelle image, si l'objet représenté est un véhicule ou quelque chose d'une autre nature).

Les chercheurs s'intéressent particulièrement à l'apprentissage profond non supervisé et « génératif », où l'ordinateur peut créer

RÉSEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS

Les réseaux de neurones artificiels sont des systèmes, étudiés dès la fin des années 1940, qui s'inspirent des propriétés des neurones biologiques et de leurs connexions.



aléatoirement de nouvelles données intéressantes, par exemple synthétiser de nouvelles images, de nouveaux sons, de nouvelles phrases. La tâche d'un tel ordinateur-artiste n'est pas aisée: il ne suffit pas de produire des pixels au hasard, ces pixels doivent être organisés d'une façon qui soit plausible, qui puisse, par exemple, correspondre à une image naturelle.

Quant à la démarche dite d'apprentissage par renforcement, elle consiste à apprendre à produire une séquence d'actions qui maximisent un ou plusieurs objectifs ou récompenses futures. C'est ainsi que, par exemple, l'enfant apprend une physique intuitive sans l'aide de ses parents, en jouant, en observant et en interagissant avec son environnement.

L'apprentissage non supervisé et par renforcement permettra peut-être à une machine de bien se représenter le monde qui l'entoure (c'est-à-dire de le comprendre) et ainsi de mieux planifier ses actions. Il est difficile d'évaluer le chemin qui reste à parcourir pour atteindre un tel niveau d'intelligence artificielle. Mais ce qui est sûr, c'est que de nombreuses applications utiles seront possibles dès demain grâce aux techniques d'apprentissage profond que nous connaissons déjà (d'où l'engouement de nombreuses entreprises pour ce domaine). Et que ces potentialités seront plus énormes encore quand les recherches fondamentales déboucheront sur de l'intelligence artificielle comparable à celle d'un humain. ■

Un neurone artificiel peut être un composant logiciel ou un composant matériel. À partir des signaux numériques qu'il reçoit d'autres neurones, il calcule, selon des règles simples, un résultat qu'il transmet aux neurones suivants. Ce signal est lui-même pondéré par la « force » – on dit aussi le « poids » – de la connexion par laquelle il passe.

Typiquement, un réseau neuronal est constitué d'une couche de neurones d'entrée, d'une couche de sortie et d'une ou plusieurs couches intermédiaires ou « cachées » (jusqu'à plusieurs centaines dans les réseaux profonds). Les neurones d'entrée recueillent les données (par exemple les valeurs des pixels d'une image), ceux de sortie transmettent un résultat (qui code par exemple le type d'objet que le réseau a reconnu dans l'image).

Dans le processus d'apprentissage, où un grand nombre d'exemples sont présentés au réseau, les poids des connexions sont modifiés peu à peu selon un algorithme approprié, afin d'obtenir des performances optimales de reconnaissance.

ABONNEZ-VOUS À **POUR LA SCIENCE**

OFFRE
SPÉCIALE

40
ANS

FORMULE
INTÉGRALE
-46%



99€

FORMULE
PASSION
-33%



79€

FORMULE
DÉCOUVERTE
-33%



59€



EN CADEAU AVEC VOTRE ABONNEMENT LE LIVRE "RELATIVITÉ ET QUANTA : UNE NOUVELLE RÉVOLUTION SCIENTIFIQUE..."

LHC, particules, trous noirs, cosmologie... Enfin un point clair et concis sur la dernière révolution scientifique ! Ces trois dernières années, les moissons scientifiques ont été exceptionnellement fructueuses, de la découverte du boson de Higgs à celles des ondes gravitationnelles émises lors de la coalescence de deux trous noirs massifs, et aux observations du fond cosmologique par le satellite Planck. L'humanité vient alors d'atteindre un nouveau palier dans la compréhension du monde quantique et du monde de la gravitation : nos bases théoriques, expérimentales et technologiques forment un socle scientifique solide pour aller plus loin et tenter de répondre aux nouvelles questions qui surgissent suite à ces découvertes... Enquête et mise au point sur une révolution en cours.

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

☐ **OUI**, JE M'ABONNE À **POUR LA SCIENCE** POUR 1 AN, JE CHOISIS MA FORMULE CI-DESSOUS :

☐ FORMULE **INTÉGRALE**

12 n° de *Pour la Science*
+ 4 Hors-Séries
+ Accès illimité aux archives en ligne depuis 1996
+ Le livre "Relativité et quanta : une nouvelle révolution scientifique..."

11A99EK4

99€
Au lieu de 183,45€*

☐ FORMULE **PASSION**

12 n° de *Pour la Science*
+ 4 Hors-Séries
+ Le livre "Relativité et quanta : une nouvelle révolution scientifique..."

PIA79EK2

79€
Au lieu de 118,45€*

☐ FORMULE **DÉCOUVERTE**

12 n° de *Pour la Science*
+ Le livre "Relativité et quanta : une nouvelle révolution scientifique..."

DIA59EK2

59€
Au lieu de 88,45€*

J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom : _____ Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____

Téléphone : _____

• Mon e-mail : (à remplir en majuscule) _____
@ _____

J'accepte de recevoir les informations de *Pour la Science* ☐ OUI ☐ NON
et de ses partenaires ☐ OUI ☐ NON

• Je choisis mon mode de règlement :

☐ Par chèque à l'ordre de *Pour la Science*

☐ Par carte bancaire

N° : _____

Date d'expiration : _____ Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB) : _____

Signature obligatoire

* Par rapport au prix de vente en kiosque, l'accès numérique aux archives et la valeur du livre. Vous pouvez également si vous le souhaitez acquérir séparément le livre "Relativité et quanta : une nouvelle révolution scientifique..." au prix de 10€, chaque n° de *Pour la Science* au tarif de 6,50€, notre n° spécial au tarif de 6,95€ et nos hors-séries au tarif de 7,50€. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/03/2018 en France métropolitaine uniquement et dans la limite des stocks disponibles. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à *Pour la Science*. Photos non contractuelles.

Quel âge a vraiment Pour la Science?

Quarante ans pour un Terrien. Mais 21 ans pour un Martien.
Il a fallu environ 14 600 jours pour produire les 481 numéros
de *Pour la Science* ; combien de temps vous faudra-t-il
pour les lire ?



Le premier numéro
de *Pour la Science*
est paru en
novembre 1977.
Il y a exactement
quarante ans.

Pour fêter un anniversaire, il faut définir un point de départ, puis un événement régulier et récurrent pour déterminer une durée en comptant le nombre d'occurrences. Ainsi,

le premier numéro de *Pour la Science* étant paru en novembre 1977, la revue aura donc 40 ans révolus à la fin de cette année, en prenant comme référence la révolution de la Terre autour du Soleil. Mais ce choix est bien sûr arbitraire : compter le nombre de levers du Soleil confère à *Pour la Science* un âge de 14610 jours, ou 495 lunaisons si l'on se réfère au nombre de nouvelles lunes depuis la création du magazine. Notons que cette dernière valeur est à peu près égale au nombre de numéros parus, ce qui est normal pour une revue dont la périodicité est voisine de la durée moyenne qui sépare deux nouvelles lunes (29,5 jours environ).

Une autre façon d'annoncer son âge, qui amuse beaucoup les enfants, consiste à le mesurer en référence à la période de révolution d'une autre planète. Ainsi, 40 années terrestres correspondent à environ 166 années mercuriennes, 65 années vénusiennes ou 21 années martiennes, pour ne parler que des planètes telluriques du Système solaire.

Ce jeu sur l'âge nous rappelle qu'une histoire, la vôtre ou celle de votre revue préférée, est une succession d'événements séparés par des durées perçues et mesurées en les rapportant à un mouvement périodique, astronomique (Soleil ou Lune), mécanique (clepsydre, horloge ou montre) ou quantique (horloge atomique). Autrement dit, une histoire est un empilement de durées et le choix d'une origine, votre date de naissance ou celle de la parution du premier numéro de votre revue, permet de définir un « temps » : nous sommes en l'an 40 après *Pour la Science*.

ET LE TEMPS DEVIENT RELATIF

La question du temps et de la mesure des durées a pris un relief particulier avec les travaux d'Albert Einstein. La nouvelle théorie de l'espace et du temps qu'il publia en 1905 est fondée sur deux postulats en rupture profonde avec la physique de son époque : «... pour tous les systèmes de coordonnées où les équations de la mécanique sont valables, ce sont également les mêmes lois de l'optique et de l'électrodynamique qui sont valables. Nous voulons élever cette conjecture [dont le contenu sera appelé dans ce qui suit « principe de relativité »] au rang d'une hypothèse et introduire en outre la supposition, qui n'est qu'en apparence incompatible avec ce principe, que la lumière se propage toujours dans le vide à une certaine vitesse c indépendante de l'état de mouvement de la source lumineuse. »

Si le premier postulat d'Einstein ne fait qu'étendre le principe de relativité de Galilée à toute la physique alors connue, le second est

véritablement révolutionnaire. Jusqu'alors, espace et temps formaient le cadre universel dans lequel se déroulent les événements, et la vitesse, quotient d'une distance par une durée, est une notion qui découle de ce cadre. Poser que la vitesse de la lumière est indépendante du mouvement de la source revient à lier le temps et l'espace pour s'adapter à cette vitesse : ils deviennent « relatifs » au système de référence de l'observateur. Le second postulat d'Einstein implique alors que la durée d'un phénomène n'est plus identique pour tous les observateurs et Einstein montre qu'elle dépend de leurs vitesses relatives. Il définit aussi une durée « propre », celle qui sépare deux événements se produisant au même endroit.

En 1908, Hermann Minkowski proposa de fusionner l'espace à trois dimensions et le temps unidimensionnel pour former une nouvelle entité physique, l'espace-temps à quatre dimensions, ensemble de tous les événements. Une histoire, succession d'événements se déroulant en différents lieux, est alors une ligne de

À bord d'un vaisseau intersidéral, la durée du voyage est plus courte que pour le Terrien

l'espace-temps dont chaque portion a une durée qui est propre à l'observateur qui suit cette ligne. Le temps, construit par accumulation de durées propres, est donc une grandeur purement personnelle, liée à chaque observateur, et qui n'a *a priori* rien à voir avec le temps d'un autre observateur. Cela interdit de définir une grandeur universelle nommée « temps » construite par l'addition de durées successives sur lesquelles tous les observateurs s'accorderaient.

En 1971, les physiciens américains Joseph Hafele et Richard Keating réalisèrent une expérience pour tester cette prédiction étonnante. Des horloges atomiques extrêmement précises furent embarquées dans deux avions partis pour faire le tour du monde. À leur retour, les durées des voyages mesurés par ces horloges furent comparées avec celle mesurée par une horloge identique, restée au sol et avec laquelle elles avaient été préalablement synchronisées. Les horloges de l'avion accusaient, selon la direction de leur vol vers l'est ou vers l'ouest, >

LES AUTEURS



ROLAND LEHOUCQ
astrophysicien
au CEA, à Saclay



SÉBASTIEN STEYER
paléontologue
au CNRS-MNHN