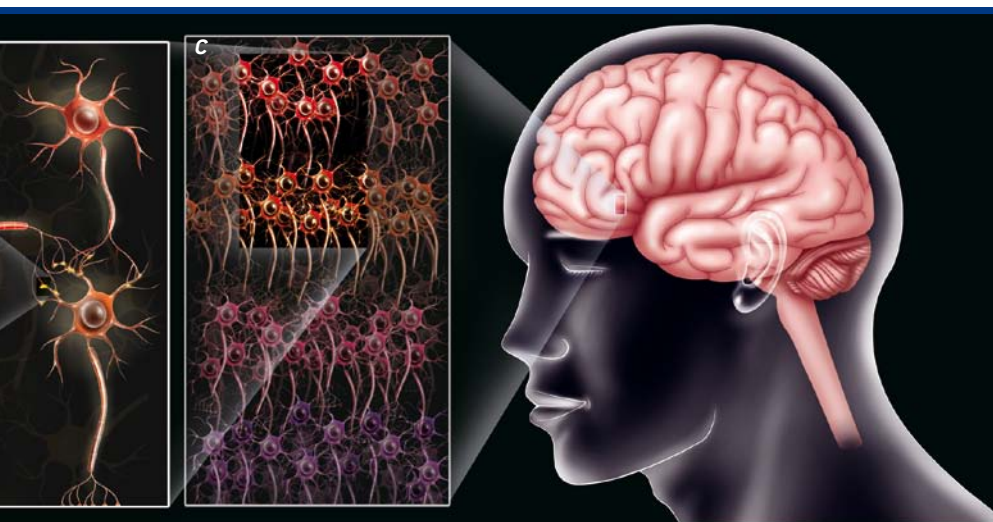




portent des milliers de synapses [b]. Viennent ensuite des clusters de synapses et de dendrites, et les réseaux locaux de neurones, ou cliques [c], activés par le même événement.

Enfin, on trouve des réseaux de neurones plus ou moins vastes, qui mettent en jeu des aires réparties dans tout le cerveau et communiquent. Le *cloud* de l'être humain ?

au fil du temps. La mémoire numérique est-elle supérieure à la « métamémoire » humaine, somme de toutes les connaissances de tous les êtres humains ?

Si l'on fait une comparaison (approximative) entre le cerveau et l'ordinateur, les deux systèmes présentent une mémoire procédurale qui permet de maintenir temporairement une quantité limitée d'informations pour réaliser des opérations. Dans un ordinateur, il s'agit de la mémoire vive (RAM), localisée au niveau des microprocesseurs réalisant les opérations, les résultats étant enregistrés sur le disque dur. Dans le cerveau, la mémoire est distribuée dans un réseau plus ou moins vaste de structures réparties dans les différents lobes du cerveau (préfrontal, pariétal, temporal et occipital) qui servent elles-mêmes à stocker des informations à long terme.

Le numérique perturbe-t-il la mémoire biologique ?

Au-delà des performances respectives des deux types de mémoires, l'utilisation de plus en plus importante des divers médias numériques, et donc des situations de tâches multiples simultanées qui demandent une division de l'attention, n'aura-t-elle pas une influence sur la mémoire biologique ?

L'utilisation de jeux vidéo qui nécessitent de gérer simultanément plusieurs paramètres (flux visuel dans l'environ-

nement produit par le déplacement des personnages, évolution de leurs positions, interactions des personnages, gestion des armes, des munitions, etc.), souvent dans des fenêtres différentes, permet de développer les capacités multitâches des sujets. En revanche, le traitement de l'information selon que l'on réalise une tâche unique ou plusieurs tâches simultanées diffère. La résolution de tâches multiples simultanées entraîne un traitement automatisé et non conscient des informations qui fait intervenir des structures différentes de celles que nécessite une attention focalisée.

Quelle est l'influence sur la mémoire ? Un début de réponse est donné par les résultats de l'expérience réalisée en 2003 par Helene Hembrooke et Geri Gay, de l'Université Cornell, aux États-Unis. Durant un cours, la moitié des étudiants devait utiliser un ordinateur portable pour surfer sur le Web, chercher des pages relatives au cours (ou non), et donc suivre le cours en mode multitâches, pendant que l'autre moitié devait simplement écouter le cours. Lors du rappel du contenu du cours, les performances des étudiants multitâches ont été inférieures à celles des autres étudiants.

De plus, les étudiants ayant consulté plus de pages relatives au cours n'avaient pas de meilleures performances que les autres étudiants ayant utilisé Internet pour des recherches sans lien avec le cours. Ainsi, suivre un cours en situation de multitâches et de multisupports entraîne un déficit mnésique. Les étudiants « monotâche » ont suivi le cours de façon consciente, en focalisant leur attention, alors que les « multitâches » l'ont fait de façon superficielle, partageant leur attention entre l'ordinateur et le professeur.

Si l'on n'a pas encore mis au jour tous les mécanismes qui sous-tendent la mémoire biologique, il est avéré que cette mémoire est performante et pertinente : on sait retrouver, de façon non consciente et en quelques dixièmes de seconde le souvenir adapté à telle ou telle situation. Et même si Internet est plus rapide, donnant des liens en quelques centièmes de seconde, il faut ensuite soi-même faire le tri – conscient – entre les millions de pages correspondant parfois à la requête. L'internaute doit alors décider de la page qui répond vraiment à sa demande, ce qui prend généralement plusieurs minutes, voire bien davantage ! ■

■ BIBLIOGRAPHIE

A. Papoutsis *et al.*, *Coding and decoding with dendrites*, *J. Physiol.*, à paraître, 2013.

T. Bliss et G. Collingridge, *Expression of NMDA receptor-dependent LPT in the hippocampus : bridging the divide*, *Mol. Brain*, vol. 6[5], 2013.

J. Lisman et O. Jensen, *The theta-gamma neural code*, *Neuron*, vol. 77, pp.1002-1016, 2013.

M. Sanhueza et J. Lisman, *The CaMKII/NMDAR complex as a molecular memory*, *Mol. Brain*, vol. 6[10], 2013.

R. Legenstein et W. Maass, *Branch-specific plasticity enables self-organization of nonlinear computation in single neurons*, *J. Neurosci.*, vol. 31, pp. 10787-10802, 2011.

G. Winocur *et al.*, *Memory formation and long-term retention in humans and animals : Convergence towards a transformation account of hippocampal-neocortical interactions*, *Neuropsychologia*, vol. 48, pp. 2339-2356, 2010.

J. Tsien, *Le langage (codé) de la mémoire*, *Pour la Science*, n° 359, pp. 26-32, 2007.

HISTOIRE DES SCIENCES

Cinquante ans de chaos

En 1963, un météorologiste américain, Edward Lorenz, révéla que la prédictibilité déterministe est dans certains cas illusoire. La théorie du chaos prenait forme...

Adilson MOTTER et David CAMPBELL

En physique classique, on apprend qu'à partir des conditions initiales d'un système, on peut calculer tous ses états futurs. Un déterminisme que le mathématicien français Pierre Simon Laplace étendait à tout l'Univers et expliquait en ces termes dans sa *Théorie analytique des probabilités* (1812) : « Une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'Univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux. »

Mais dans la réalité, la connaissance exacte d'un état initial est impossible. Jusqu'à la fin du XIX^e siècle, l'hypothèse tacite était qu'une connaissance approchée de l'état initial conduisait à une connaissance approchée de l'état final. Au vu de leurs succès dans la description du mouvement des planètes, des comètes, des étoiles et de la dynamique d'innombrables autres systèmes, les physiciens n'avaient pas de raison de supposer le contraire.

Cependant, à partir de la fin du XIX^e siècle, une série de travaux ont révélé que la notion de prédictibilité déterministe, bien que séduisante et intuitive, est fautive pour la plupart des systèmes. De petites incertitudes sur l'état initial peuvent conduire à d'énormes erreurs sur l'état final. Même des systèmes dont toutes les forces sont connues peuvent

avoir un comportement imprévisible. Le déterminisme n'exclut pas le chaos.

Le point culminant de ces recherches fut un article publié il y a 50 ans par un météorologiste de l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT), Edward Lorenz [1917-2008]. C'est cette histoire de la découverte

du chaos déterministe et de ses implications que nous racontons ici. Ses acteurs sont nombreux – trop pour être tous cités. Nous présentons nos excuses à ceux dont nous n'avons pu mentionner les contributions.

Une galerie de monstres

La théorie du chaos, telle que nous la connaissons aujourd'hui, a pris forme au cours du dernier quart du XX^e siècle. Mais dès la fin des années 1880, les physiciens ont été confrontés au phénomène, à commencer par Henri Poincaré lorsqu'il s'intéressa au problème des trois corps en mécanique céleste. Il s'agissait de déterminer la trajectoire de trois corps interagissant selon la loi de la gravitation universelle.

De tels systèmes sont bien décrits dans l'espace des phases. Dans cet espace, les dimensions correspondent aux variables dynamiques – les positions, les quantités de mouvement –, qui permettent de décrire le système par des équations différentielles du premier ordre. L'idée dominante avait longtemps été que, laissé à lui-même, un système classique ordinaire finit par converger soit vers un état stable, correspondant à un point dans l'espace des phases, soit vers un état périodique (une boucle fermée dans l'espace des phases), soit vers un état quasi-périodique (un tore dans l'espace des phases).

Or les trajectoires à trois corps calculées par Poincaré ne s'inscrivaient dans aucune de ces catégories : elles formaient un enchevêtrement complexe de courbes, aujourd'hui bien connu des théoriciens du chaos. Pour Poincaré, le déterminisme avait



1. EDWARD LORENZ étudiant une série temporelle de solutions numériques de son modèle météorologique, générée par ordinateur (a). En comparant deux séries produites à partir des mêmes équations, mais avec des conditions initiales légèrement différentes, il s'aperçut que les séries divergeaient rapidement (b).

trouvé ses limites : « Il peut arriver que de petites différences dans les conditions initiales en engendrent de très grandes dans les phénomènes finaux [...]. La prédiction devient impossible », écrit-il en 1912 dans l'introduction de son *Calcul des probabilités*.

Pour la plupart des scientifiques de l'époque, les résultats de Poincaré étaient des artéfacts ou le fruit d'erreurs méthodologiques. Il en était de même de conclusions similaires indépendantes du mathématicien français Jacques Hadamard et d'indices expérimentaux du chaos observés par leurs contemporains, rangés eux aussi dans la galerie des monstres. La théorie du chaos ne s'imposa qu'un siècle plus tard.

Selon toute vraisemblance, Lorenz ne connaissait pas les travaux de Poincaré quand il s'est lancé dans la météorologie

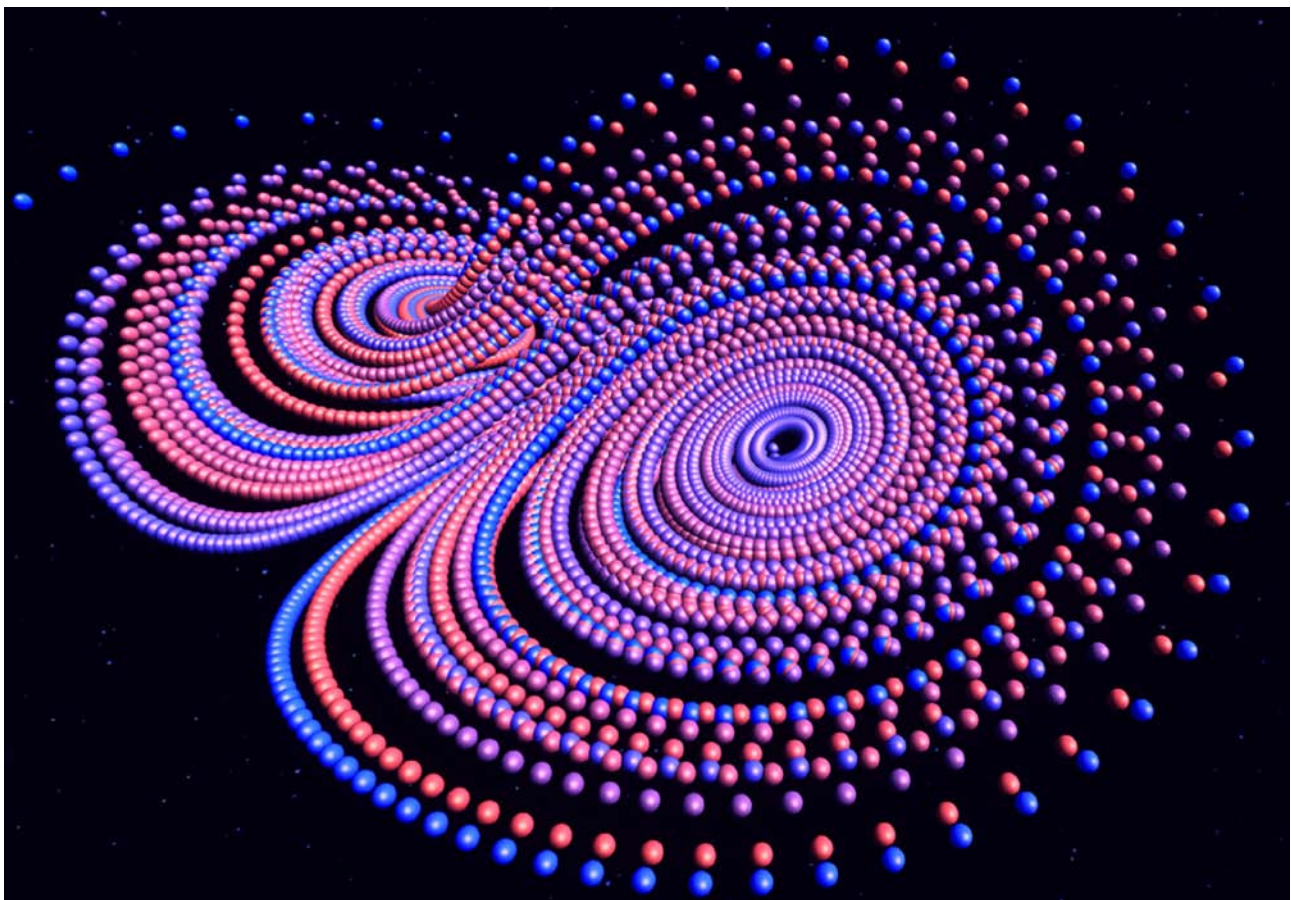
au milieu du XX^e siècle. Muni d'une maîtrise de mathématiques, Lorenz avait servi en tant que météorologiste pendant la Seconde Guerre mondiale, avant de finir sa thèse en météorologie au MIT et de rejoindre la faculté en 1955.

Une découverte fortuite

À l'époque, la plupart des météorologistes prévoyaient le temps en utilisant des procédures linéaires, qui reposaient sur l'hypothèse selon laquelle le temps de demain est une combinaison linéaire bien définie des caractéristiques du temps d'aujourd'hui. Mais selon une nouvelle école émergente, le temps pouvait être prédit avec davantage de précision en simulant les équations de la dynamique des fluides décrivant les écoule-

ments atmosphériques. Lorenz, qui venait d'acquiescer son premier ordinateur, un *Royal McBee LGP-30* avec une mémoire interne de 4 096 mots à 32 bits (mille fois plus rapide que sa calculatrice de bureau, mais un million de fois plus lent qu'un ordinateur portable actuel), décida de comparer les deux approches en confrontant les procédures linéaires à un modèle dynamique simplifié à 12 variables.

Lorenz se concentra sur la recherche de solutions non périodiques, qui lui semblaient plus difficiles à modéliser à l'aide de procédures linéaires. Pour se restreindre à ces solutions, il imposa à son système – un vaste volume de molécules d'air – une source de chaleur externe variable selon la latitude et la longitude (modélisant la chaleur du Soleil dans l'atmosphère réelle).



2. L'ATTRACTEUR DE LORENZ, grossièrement visualisé via la trajectoire d'une unique orbite chaotique. Les sphères représentent

les itérations des équations dites de Lorenz, calculées en utilisant les paramètres originaux des travaux fondateurs de Lorenz.

Avec l'aimable autorisation de Stefan Ganey

En d'autres termes, il força son système à ne jamais atteindre d'équilibre.

Les modèles linéaires montrèrent en effet leurs limites. Mais Lorenz ne s'arrêta pas à cette conclusion. Ayant trouvé les solutions non périodiques de son modèle intéressantes en elles-mêmes, il les examina plus en détail. Il reproduisit les données, imprimant cette fois-ci les variables de sortie après chaque jour de météorologie simulée. Pour gagner de la place, il les arrondissait à la troisième décimale, même si les calculs sur l'ordinateur se poursuivaient avec une précision plus élevée. Il obtint alors un curieux résultat, qu'il relate ainsi dans son ouvrage *The essence of chaos* [1993] :

À un moment, j'ai décidé de répéter certains des calculs afin d'examiner plus en détail ce qui se passait. J'ai arrêté l'ordinateur, tapé une ligne de nombres qu'il avait imprimés plus tôt, et je l'ai relancé. Je suis sorti dans le couloir boire un café et je suis revenu environ une heure plus tard, tandis que l'ordinateur avait simulé environ deux mois de prévisions météorologiques. Les nombres qu'il avait imprimés n'avaient rien à voir avec les anciens.

J'ai tout de suite soupçonné une faiblesse d'un tube à vide ou un autre problème matériel, ce qui est fréquent, mais avant d'appeler le service technique, j'ai décidé de regarder à quel endroit l'erreur s'était produite, sachant que cela pourrait faciliter

le dépannage. Au lieu d'une rupture soudaine, j'ai trouvé que les nouvelles valeurs répétaient au début les anciennes, puis divergeaient rapidement, d'abord d'une unité sur la dernière décimale, puis de plusieurs, puis sur l'avant-dernière décimale et, ensuite, sur celle d'avant encore.

En fait, les différences doubleraient tous les quatre jours à peu près, jusqu'à ce que toute ressemblance avec le résultat initial s'efface au cours du deuxième mois. Cela suffisait pour que je comprenne ce qui s'était passé : les nombres que j'avais entrés n'étaient pas les nombres originaux exacts, mais les valeurs arrondies qui étaient apparues dans le document original imprimé. Ces erreurs par arrondi étaient les coupables ; et elles s'amplifiaient peu à peu jusqu'à dominer la solution.

Un papillon au Brésil, une tornade au Texas ?

Avec son modèle, Lorenz a en fait observé ce que l'on nomme aujourd'hui la sensibilité aux conditions initiales — une propriété fondamentale du chaos. Dans l'espace des phases, ce phénomène a une signature : la distance entre deux trajectoires proches quelconques croît exponentiellement avec le temps. Ce comportement confère aux systèmes chaotiques un caractère aléatoire. Mais, comme Lorenz lui-même le notait, les apparences

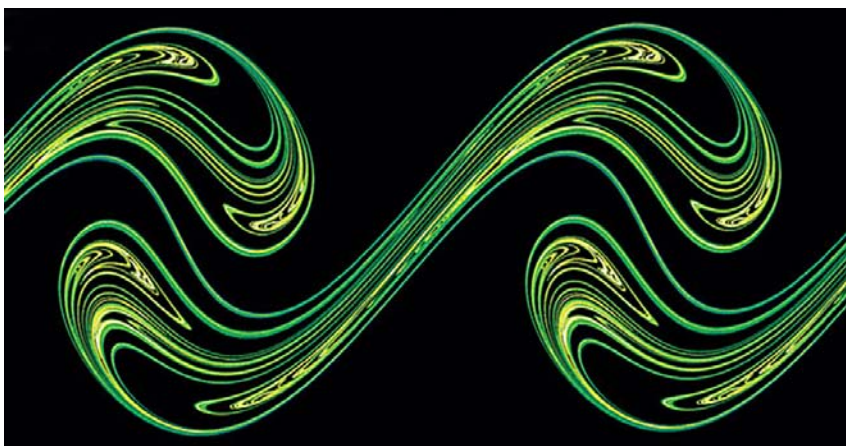
sont trompeuses : alors qu'à tout moment dans un système aléatoire (un lancer de dés, par exemple), il peut se produire une chose parmi deux ou plus, dans des systèmes chaotiques, les résultats sont déterministes. (Et, à strictement parler, c'est la même chose pour le lancer de dés.)

Lorenz comprit que si l'atmosphère avait le même comportement que son modèle, il était impossible de prévoir le temps à long terme. En 1972, lors d'un colloque de l'Association américaine pour l'avancement de la science, dans une conférence intitulée *Prédictibilité : le battement des ailes d'un papillon au Brésil déclenche-t-il une tornade au Texas ?*, il présenta sa découverte en utilisant le papillon comme métaphore d'une minuscule perturbation qui pourrait changer les conditions météorologiques. La métaphore prit et la sensibilité aux conditions initiales devint connue du grand public sous le nom de l'effet papillon.

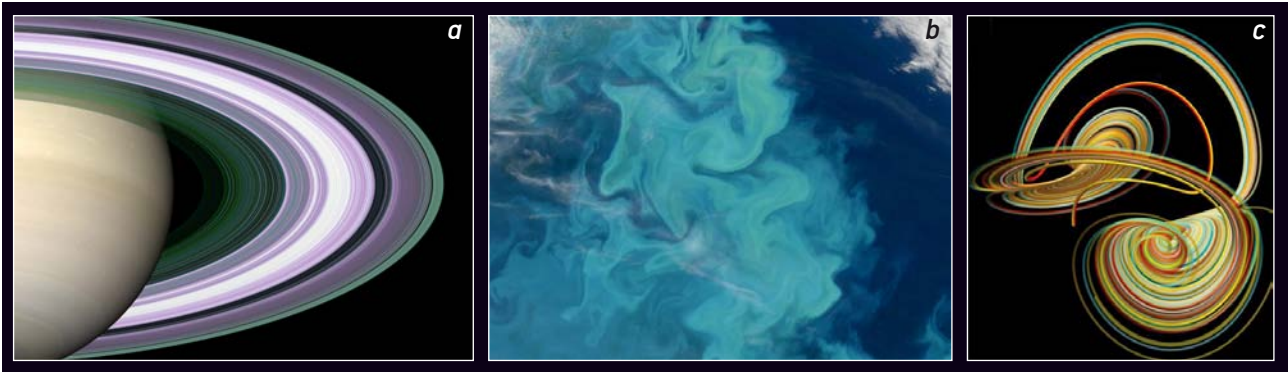
Lorenz présenta les résultats de son modèle à 12 variables en 1960, lors d'un symposium à Tokyo. Il ne mentionna que brièvement l'effet inattendu des erreurs d'arrondi, pensant en parler dans un autre article. Mais la plupart de ses contemporains ne perçurent pas l'importance de ses résultats. De même, les travaux d'autres pionniers du chaos, tel le Japonais Yoshisuke Ueda qui fit en 1961 des expériences numériques analogues, passèrent inaperçus.

Lorenz publia sa découverte fortuite dans un article de mars 1963 intitulé *Écoulement non périodique déterministe*. Entre-temps, il avait passé une bonne partie de son temps à rechercher le modèle le plus simple présentant une sensibilité aux conditions initiales, et avait abouti à un système d'équations différentielles non linéaires à trois variables, aujourd'hui connues sous le nom d'équations de Lorenz.

Comme le système à trois corps de Poincaré, les équations de Lorenz donnaient des trajectoires dans l'espace des phases qui ne se recouvrent jamais et n'engendrent pas des surfaces de dimension entière. Au lieu de cela, les trajectoires convergent vers une structure bornée de dimension non entière — fractale —, nommée attracteur de Lorenz (voir la figure 2).



3. LES TRAJECTOIRES DANS L'ESPACE DES PHASES d'un pendule amorti forcé périodiquement (système physique dissipatif) convergent vers un attracteur chaotique dont les points sont tracés ici à des instants qui sont des multiples entiers de la période de forçage. L'étirement et le pliage des volumes dans l'espace des phases confèrent à l'attracteur une structure fractale.



4. LE CHAOS SE MANIFESTE dans des contextes variés : les anneaux de Saturne, où les régions vides correspondent à des orbites chaotiques [a] ; les efflorescences de plancton (vues ici sur une image satellite de la mer de Barents) qui forment des structures semblables à des

fractales en raison du comportement chaotique des écoulements dans le sillage d'une île [b] ; le champ géomagnétique de la Terre qui inverse ses pôles à des intervalles chaotiques irréguliers – un comportement visualisé dans l'espace des phases par cette simulation [c].

Les attracteurs chaotiques – dits aussi étranges –, dont celui de Lorenz est un exemple, ont tendance à émerger quand un système dissipatif est régulièrement forcé à compenser la perte d'énergie, comme quand un enfant sur une balançoire accompagne le mouvement de ses jambes pour ne pas s'arrêter. Dans le cas du système de Lorenz, c'est la source de chaleur qui compense la perte d'énergie due à la viscosité du fluide.

Dès le début, Lorenz semble avoir saisi une caractéristique essentielle du chaos : il a reconnu non seulement que la non-périodicité implique une sensibilité aux conditions initiales, mais aussi que cette sensibilité est la cause profonde de la non-périodicité. De fait, on sait aujourd'hui que dans l'espace des phases, une structure chaotique telle que l'attracteur de Lorenz baigne dans un ensemble infini d'orbites périodiques instables : si l'on s'écarte un tant soit peu d'une telle orbite, la trajectoire du point représentatif du système devient chaotique.

La publication fut peu remarquée. Douze ans après, l'article était cité moins de 20 fois. Le tournant a eu lieu en 1975, notamment via sa citation dans l'article qui établit le nom du domaine : *Period three implies chaos*, de Tien-Yen Li et James Yorke, de l'Université du Maryland, aux États-Unis. Dès la fin des années 1980, non seulement la recherche sur le chaos a connu un essor considérable, avec des milliers de publications scientifiques à l'appui, mais elle est aussi familière aux

■ LES AUTEURS

Adilson E. MOTTER est professeur de physique et d'astronomie à l'Université du Nord-Ouest à Evanston, dans l'Illinois, aux États-Unis. David K. CAMPBELL est professeur de physique et de génie électrique et informatique à l'Université de Boston.

■ BIBLIOGRAPHIE

A. E. Motter et D. K. Campbell, *Chaos at fifty*, *Physics Today*, vol. 66, pp. 27-33, 2013.

Fifty years of chaos : applied and theoretical, *Chaos*, numéro spécial, vol. 22, 2012.

E. Ott, *Chaos in Dynamical Systems*, Cambridge University Press, 2002.

Y. Ueda, *The Road to Chaos-II*, Aerial Press, 2001.

J. Gleick, *La théorie du chaos*, Flammarion, 1999.

F. Diacu et P. Holmes, *Celestial Encounters : The Origins of Chaos and Stability*, Princeton Univ. Press, 1996.

E. N. Lorenz, *The Essence of Chaos*, Univ. of Washington Press, 1993.

non-scientifiques. Aujourd'hui, le chaos est aussi décrit dans les systèmes dynamiques conservatifs – dont l'énergie totale est conservée au fil du temps. Dans de tels systèmes, il ne peut y avoir d'attracteur : le chaos se manifeste comme une sorte de poussière en mouvement dans l'espace des phases (parfois nommée poussière de Cantor).

Le chaos se distingue des autres grandes théories de la physique. Contrairement à la relativité ou à la mécanique quantique, il ne décrit pas un phénomène physique particulier, mais apporte un ensemble de concepts et de méthodes pour analyser un comportement insoupçonné qui peut se manifester dans des disciplines diverses. Ces caractéristiques expliquent en partie l'indifférence avec laquelle ont été accueillies les premières indications du phénomène. Les premières confrontations avec le chaos ont eu lieu dans des disciplines disparates (mécanique céleste, mathématiques, ingénierie), les uns n'étant pas au courant des découvertes des autres.

Aujourd'hui, si nombre de problèmes liés au chaos demeurent irrésolus, tels que ses implications dans les systèmes quantiques et relativistes, la théorie du chaos est utilisée dans de multiples domaines : physiologie, informatique, finance, dynamique des fluides... Comme le résume l'annonce du prix de Kyoto que reçut Lorenz en 1991 : « [Le chaos déterministe] a amené l'un des changements les plus importants de notre vision de la nature depuis Isaac Newton. » ■

La sélection de livres

■ POUR LA SCIENCE

Découvrez la sélection
du mois *Pour la Science*
avec des ouvrages scientifiques
amusants. Ne manquez
pas la nouvelle collection
« InfoGraphie »
Bonne lecture !

En partenariat
avec les éditeurs

Belin:
ÉDITEUR INDÉPENDANT
DEPUIS 1777

Éditeur
Le Pommier

Tous ces livres sont
également disponibles
en librairie.

Requins

De la préhistoire à nos jours

Gilles Cuny, Illustrations d'Alain Beneteau

Les requins ? Ils sont presque
à égalité avec les dinosaures
dans l'imaginaire collectif. Ce livre
original, illustré de 200 reconsti-
tutions et photographies, écrit par
LE spécialiste français des requins, est
riche en informations scientifiques, en
sensations et en surprises.

Éditions Belin 2013

224 pages – 27,90 euros – ISBN 978-2-7011-5423-7



Réf. 005423

La science amusante !

La physique surprise

Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik



Réf. 075121

Éditions Belin-Pour la Science 2013

224 pages – 26 euros – ISBN 978-2-8424-5121-9

Passionnés de physique et
curieux de tout, Jean-Michel
Courty et Édouard Kierlik vous
invitent à de nouvelles prome-
nades scientifiques dans un
langage accessible, simple et
imagé, sans jargon ni formules.
Avec eux, laissez-vous sur-
prendre par les phénomènes
que vous avez déjà côtoyés sans même les
remarquer.

50 expériences pour épater vos amis au jardin

Jacques Guichard, Kamil Fadel et Guy Simonin

Marcher sur l'eau, tirer la nappe sans
faire tomber ce qui est sur la table,
créer un double arc-en-ciel, trans-
percer un ballon sans qu'il explose...
Voici 50 nouvelles expériences très
faciles à réaliser avec, pour chacune,
du matériel simple, le déroulé pas à pas, les
gestes précis et les trucs pour la réussir à coup
sûr. Et pour ceux qui veulent en savoir plus, des
compléments scientifiques et des indications
sur les lieux où l'on peut observer ces phéno-
mènes à grande échelle.

Éditions Le Pommier 2013

168 pages – 18,90 euros – ISBN 978-2-7465-0618-3



Réf. 090618*

Faire léviter de l'eau

Florian Briant



Réf. 007535

Éditions Belin 2013

128 pages – 21 euros – ISBN 978-2-7011-7535-5

Comment provoquer une tempête
dans une bouteille ? Sauriez-vous al-
lumer une ampoule sans la brancher,
souffler une bulle géante ou bien
extraire votre propre ADN ? Décou-
vrez le plaisir de faire de la science,
à travers des expériences ludiques et
réalisables avec du matériel simple. À
vous l'excitation du « labo » !

Mathémagic

David Acheson

De pi au pendule chaotique,
de Pythagore à Andrew Wiles,
embarquez pour une fasci-
nante balade au pays des
mathématiques ! De savou-
reuses illustrations achève-
ront de convaincre le profane comme l'initié
qu'il s'agit là d'un des livres les plus réjouissants
jamais écrit sur le sujet.

Éditions Belin 2013

176 pages – 15 euros – ISBN 978-2-7011-7686-4



Réf. 007686