POUR LA SCIENCE
Édition française de Scientific American
HORS-SÉRIE

M 01930 - 102H - F: 7,90 € - RD
FÉVRIER-MARS 201
Nº 10

MÉDECINE
UN TRAITEMENT CONTRE ALZHEIMER ?

PSYCHOLOGIE
ATTENTION AUX PIÈGES DE LA MÉMOIRE

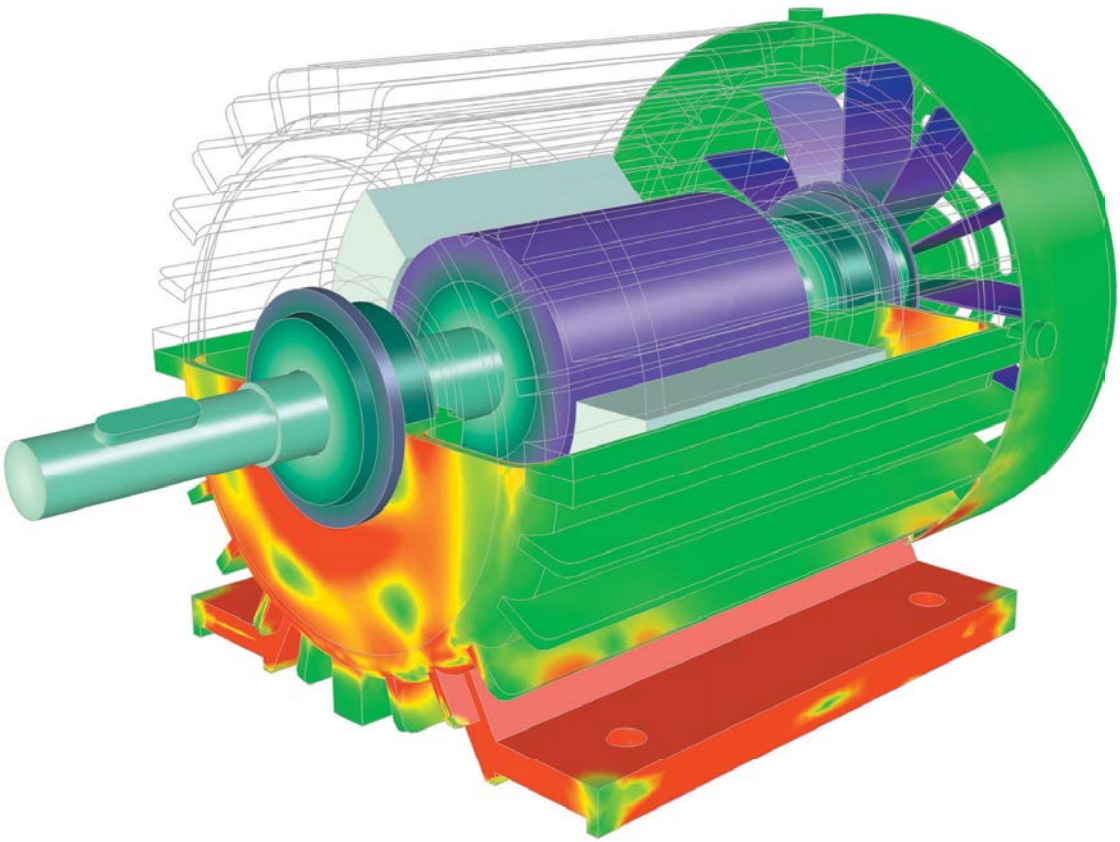
MÉMORISATION
LES RISQUES DU TOUT NUMÉRIQUE

NEUROLOGIE
DES SOUVENIRS POUR BÂTIR UN AVENIR

GRAND TÉMOIN
BERNARD STIEGLER

LES MUTATIONS DE NOTRE MÉMOIRE

Inventé au 19ième siècle. Optimisé pour aujourd'hui.



Distribution des contraintes de von Mises dans le carter d'un moteur à induction avec prise en compte des effets électromécaniques.

Au 19ème siècle, deux scientifiques ont inventé séparément le moteur à induction AC. Aujourd'hui, c'est un composant commun en robotique. Comment y sommes nous arrivé, et comment les ingénieurs d'aujourd'hui peuvent-ils continuer d'améliorer ces moteurs?

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour simuler des produits, des systèmes et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche. Découvrez comment l'appliquer pour vos designs.

comsol.blog/induction-motor

COMSOL

POUR LA SCIENCE
Édition française de Scientific American
HORS-SÉRIE

www.pourlascience.fr
70 bis boulevard du Montparnasse – 75014 Pari
Tél. 01 55 42 84 00

GROUPE POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions: Cécile Lestienn

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangi
Maquettiste: Pauline Bilbault

POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef: Maurice Mashaal
Rédactrice en chef adjointe: Marie-Neige Cordonnie
Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésipp
Community manager: Aela Kervhuel

Conception graphique: William Londiche
Directrice artistique: Céline Lapert
Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy
Réviseuse: Anne-Rozenn Jouble
Marketing & diffusion: Arthur Peys
Direction du personnel: Olivia Le Prévost
Direction financière: Cécile André
Fabrication: Marianne Sigogne et Olivier Lacam
Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mério
Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique: Hervé This

PRESSE ET COMMUNICATION
Susan Mackie
susan.mackie@pourlascience.fr • Tél. 01 55 42 85 05

PUBLICITÉ France
stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS
Abonnement en ligne: http://boutique.pourlascience.f
Courriel: pourlascience@abopress.fr
Tél.: 03 67 07 98 17
Adresse postale: Service des abonnements
Pour la Science – 19 rue de l'Industrie – BP 90053
67402 Illkirch Cedex
Tarifs d'abonnement 1 an (16 numéros)
France métropolitaine: 79 euros – Europe: 95 euros
Reste du monde: 114 euros

DIFFUSION
Contact kiosques: À Juste Titres ; Stéphanie Troyard
Tél. 04 88 15 12 43
Information/modification de service/réassort:
www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN
Editor in chief: Mariette DiChristina
President: Dean Sanderson
Executive Vice President: Michael Florel

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris.
© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».
En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

Origine du papier : Italie
Taux de fibres recyclées : 0%
« Eutrophisation » ou « Impact sur l'eau » :
Ptot 0.008kg/tonne
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées

PEFC 10-32-2813 / Certifié PEFC / pefc-france.org

ÉDITORIAL

LOÏC MANGIN
Rédacteur en chef adjoint

Vous êtes un phénomène !

« Je suis convaincu depuis des années que le sujet qui fascine le plus les gens, qui concerne ce qui est commun à tous les êtres humains, c'est le cerveau. » Peter Brook s'exprime ainsi, en 1998, à l'occasion de sa pièce *Je suis un phénomène*. Elle raconte l'histoire de Salomon Cherechevski, un Russe hypermnésique, à la mémoire infinie, et du neuropsychologue Alexandre Luria qui l'a suivi au début du XXe siècle. Et le metteur en scène britannique d'ajouter : « La mémoire est le secret du cerveau. »

Un secret de mieux en mieux compris grâce aux nouvelles techniques d'exploration du cerveau. Imaginez. On peut désormais suivre en direct la mémoire se former ou bien modifier des souvenirs grâce à de simples « interrupteurs » ! On découvre également que notre mémoire est par essence orientée vers le futur en ce qu'elle nous aide à anticiper, sur la base du passé, ce qui pourrait advenir.

Ces progrès de la connaissance se font dans un monde qui change à toute vitesse et met à rude épreuve notre propre mémoire, individuelle et collective. Elle s'échappe dans nos dispositifs numériques, toujours plus nombreux, et sur lesquels on compte trop. Nous négligeons, ou sous-estimons, nos propres capacités de mémorisation.

Ce sont toutes ces mutations, et d'autres encore, dont il est question dans ce hors-série. Elles rappellent le titre du livre où Luria décrit Cherechevski : *L'Homme dont le monde volait en éclat*. Vous avez en main un numéro indispensable pour vous aider à recoller les morceaux et faire de chacun de vous, en vous invitant à prêter plus d'attention à votre mémoire, un phénomène ! ■

SOMMAIRE

POUR LA SCIENCE HORS-SÉRIE
N° 102
Février-Mars 2019

INCROYABLE PLASTICITÉ

LE FUTUR DE LA MÉMOIRE

Constituez votre collection de *Hors-Séries Pour la science* Tous les numéros depuis 1996

pourlascience.fr

P. 6
Repères
Glossaire, atlas, grands principes... l'indispensable pour apprécier ce numéro

P. 10
Avant-propos
BERNARD STIEGLER
« La mémoire humaine est intégralement conditionnée par les dispositifs de mémorisation externes »

P. 16
Une mémoire en mode survie
Patrick Bonin et Aurélia Bugaïska
Bonne nouvelle: notre mémoire fonctionne encore comme à l'âge de pierre.

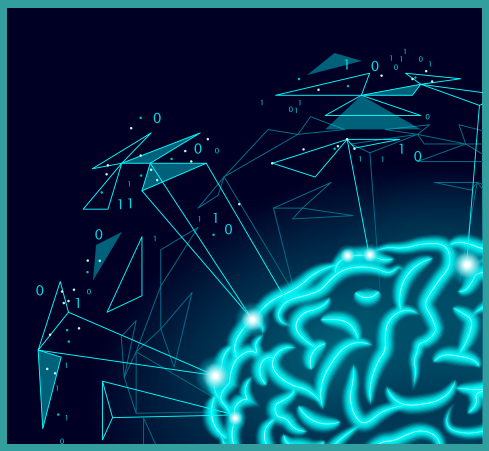
P. 20
Un ballet de neurones en direct
Alcino Silva
On peut désormais observer des souvenirs se former dans les neurones du cerveau.

P. 28
Dormir pour mieux se souvenir
Ken Paller et Delphine Oudiette
Apprendre en dormant? Nous le faisons tous, au plus profond de notre sommeil.

P. 36
Ne rien oublier, une précieuse malédiction
Daniela Zeibig
On commence à percer les secrets des champions de la mémoire.

En couverture : © Sofia Bonati

ATTENTION, DANGER !



DEMAIN, VOUS VOUS SOUVENEZ ?

RENDEZ-VOUS

par Loïc Mangin

P. 44
Alzheimer, traitement en vue ?
Laura Poupon
Aujourd'hui, plusieurs molécules contre la maladie d'Alzheimer sont au banc d'essai

P. 52
Le zapping de la mémoire
Pierre-Marie Lledo
Gommer le souvenir d'une rupture amoureuse, se créer une enfance heureuse: c'est possible.

P. 60
Attention aux faux souvenirs
Gérard Lopez
Certaines personnes s'inventent des souvenirs fictifs. Comment démêler le vrai du faux?

P. 66
Une meilleure résilience face aux catastrophes
Emmanuel Garnier
Comment mieux se souvenir d'événements extrêmes et s'y préparer? Grâce aux historiens

P. 70
Apprendre par cœur ou comprendre ?
Alain Lieury
Il faut valoriser l'apprentissage par cœur, mais sans négliger la compréhension.

P. 78
La mémoire à tous les temps
Francis Eustache
La mémoire n'est pas uniquement tournée vers le passé, elle est aussi orientée vers le futur.

P. 86
Les fausses promesses du numérique
Jean-Gabriel Ganascia
Les changements opérés par le numérique modifient notre projection vers le futur.

P. 92
L'explosion mémorielle change la donne
Gilles Dowek
L'essor des mémoires numériques annonce des transformations profondes de la société

P. 98
Des souvenirs à la carte
Robert Jaffard
Des molécules de l'oubli seront-elles bientôt disponibles?

P. 102
Les futurs possibles de la mémoire
Denis Peschanski
Que peut faire l'historien face aux trajets de la mémoire entre passé, présent et futur?

P. 108
À lire en plus

P. 110
Rebondissements
Une algue en promenade • Apprentissage profond au cœur des poumons • Quand la musique est bonne... contre l'autisme • Venir à bout des résistances tumorales

P. 114
Données à voir
Comment rendre compte de l'anarchie de l'urbanisme dans les villes?

P. 116
Les incontournables
Des livres, des expositions, des sites internet, des vidéos, des podcasts... à ne pas manquer.

P. 118
Spécimen
Les curieux enfants de Dracula

P. 120
Art & Science
Intelligence et art artificie

Le mémo des mémoires

La mémoire est l'ensemble des processus biologiques et psychologiques dédiés au codage, au stockage et à la récupération des informations. Ses composantes sont multiples, des plus globales, telle la mémoire sensorielle, aux plus spécifiques, telle la mémoire des chiffres. L'activation de ces composantes, souvent intriquées, implique plusieurs modules répartis dans tout le cerveau (*voir les figures ci-contre pour les principales zones concernées*) et divers réseaux de neurones. Aujourd'hui aucun «arbre généalogique» des mémoires ne fait consensus. Ce glossaire (par ordre alphabétique) des mémoires mentionnées dans ce numéro n'est qu'un panorama pour s'y retrouver un peu mieux dans... le dédale des mémoires.

MEMOIRE AUDITIVE

La mémoire auditive est une mémoire sensorielle de courte durée (2,5 secondes) qui stocke les caractéristiques acoustiques des informations auditives, permettant, par exemple, de se souvenir si une voix était féminine ou masculine, grave ou aiguë.

MEMOIRE AUTOBIOGRAPHIQUE

La mémoire autobiographique comporte des souvenirs épisodiques et des connaissances sémantiques personnelles.

MEMOIRE DES CHIFFRES

Il existe une mémoire des chiffres, qui est phénoménale chez certaines personnes, des calculateurs prodiges.

MEMOIRE DECLARATIVE (OU EXPLICITE)

La mémoire déclarative n'est pas une mémoire spécifique. Elle représente la reconnaissance et le rappel conscients des faits et événements : ce sont les mémoires lexicale, sémantique, épisodique, des images, des visages...

MEMOIRE EPISODIQUE

C'est la mémoire des souvenirs. Elle permet d'enregistrer et d'intégrer à notre mémoire les souvenirs des événements personnellement vécus situés dans leur contexte d'acquisition, avec l'impression de revivre l'événement.

MEMOIRE LEXICALE

Elle intègre les caractéristiques morphologiques associées à un mot, c'est-à-dire les propriétés phonétiques et orthographiques. On considère que le sens est stocké dans une autre mémoire, ce qui explique le phénomène du « mot sur le bout de la langue », où l'on cherche le nom d'un personnage dont on a le « sens » (par exemple, c'est un acteur, un journaliste).

MEMOIRE A LONG TERME

Ensemble des mémoires qui ont une longue durée de vie. Ces mémoires sont spécialisées : les informations sont enregistrées en fonction de leur niveau d'abstraction. On peut distinguer quatre grands « étages » : les mémoires sensorielles (mémoire iconique) ; les mémoires symboliques (mémoire lexicale, mémoire imagée) ; la mémoire la plus abstraite, la mémoire sémantique ; la mémoire épisodique, ou mémoire des souvenirs.

MEMOIRE MUSICALE

Cette mémoire sensorielle auditive discrimine les sons musicaux des bruits. Elle nous donne accès à tout notre répertoire de chansons et de mélodies.

MEMOIRE OLFACTIVE

Peu développée chez l'homme, elle permet pourtant de mémoriser plusieurs centaines d'odeurs. Mais moins d'une dizaine d'odeurs évoquent des souvenirs spécifiques de notre vie.

MEMOIRE PHONOLOGIQUE

Les phonèmes (syllabes) et leur association sont stockés dans une mémoire spécifique.

MEMOIRE PROCEDURALE (OU IMPLICITE)

Il existe deux systèmes de mémoire reposant sur des structures neurobiologiques distinctes : la mémoire déclarative (ou explicite) et la mémoire procédurale (ou implicite). Cette dernière concerne principalement les apprentissages, lesquels sont automatisés quand ils sont acquis (faire du vélo, du piano...), et les conditionnements.

MEMOIRE SEMANTIQUE

Elle représente l'ensemble des connaissances sur le monde et sur soi. Elle stocke les concepts des mots, leur sens. La mémoire sémantique est considérée comme un réseau d'associations, parfois hiérarchique, reliant le mot et le concept (par exemple « canari » et « oiseau »). Cette mémoire est généralement la plus durable, correspondant au sens d'un livre ou d'un film restant après plusieurs années. La mémoire encyclopédique fait partie de la mémoire sémantique. Elle représente le stock immense des connaissances spécialisées (histoire, géographie, mathématiques...) et se chiffre par dizaines de milliers de données, par exemple près de 20 000 concepts et mots en fin de classe de troisième.

MEMOIRE SENSORIELLE

Elle stocke des informations codées par les organes sensoriels, par exemple la couleur (on parle de mémoire iconique, pour la mémoire sensorielle **visuelle**) ou le son de la voix (**mémoire auditive**). Les mémoires sensorielles sont éphémères si le contenu n'est pas recodé verbalement. Il existerait une mémoire sensorielle **visuelle** (iconique), **auditive**, olfactive, tactile et kinesthésique (codant le mouvement).

MEMOIRE SPATIALE

La mémoire spatiale, ou visuospatiale, permet de mémoriser la localisation de différents éléments (provenant d'autres mémoires), formes géométriques ou images, par exemple.

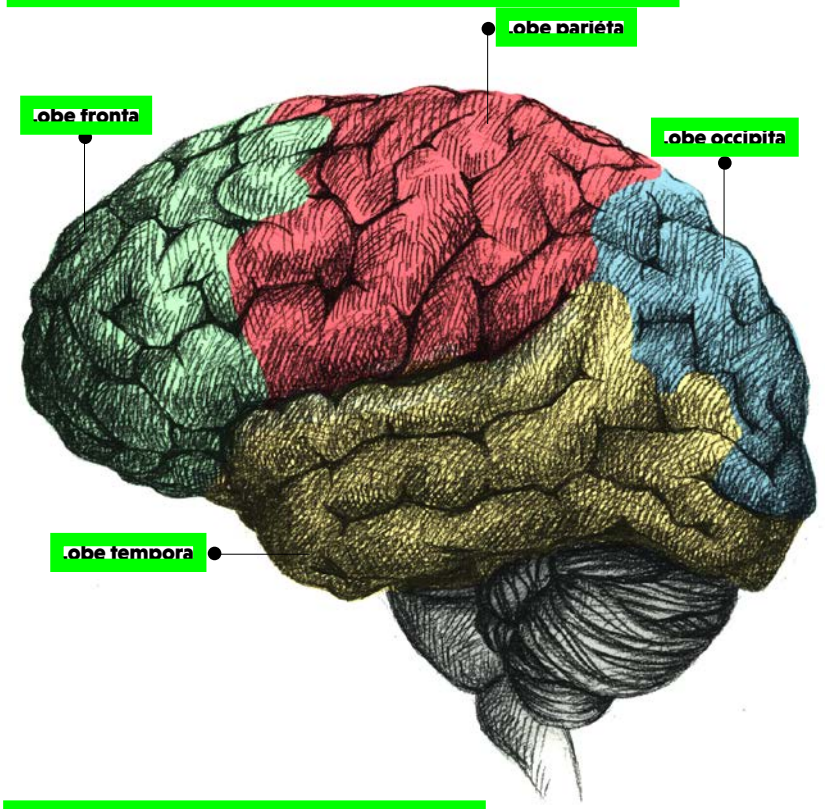
MEMOIRE DE TRAVAIL

Son contenu est limité (environ sept mots familiers) et rapidement effacé à court terme (au bout de vingt secondes environ). Elle est qualifiée de mémoire de travail, car elle joue un rôle actif dans certains processus de mémorisation, tels que l'autorépétition, l'organisation ou la récupération des souvenirs. Elle fut également qualifiée de mémoire primaire.

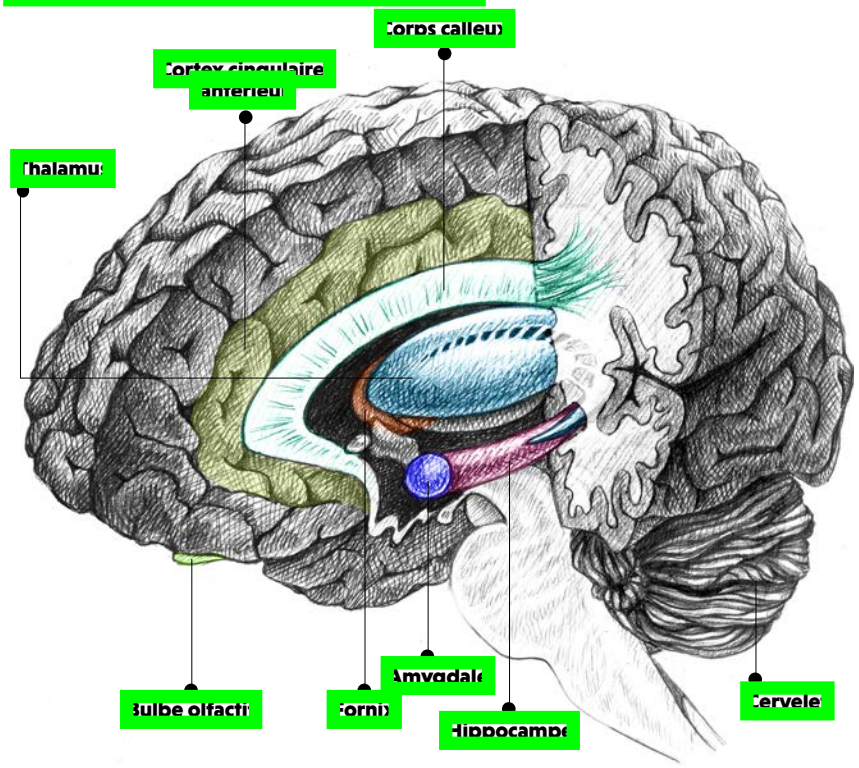
MEMOIRES VISUELLES

On a dénombré jusqu'à trente-quatre aires visuelles dans le cortex visuel du singe. On distingue la mémoire iconique (**sensorielle**), la mémoire imagée (objets, animaux, plantes), la mémoire des visages, la mémoire graphique (orthographe), la mémoire visuelle au sens strict concernant les formes, et la mémoire visuospatiale. Il existe vraisemblablement une mémoire qui code et stocke les formes de base (géométriques, par exemple). La mémoire iconique désigne la mémoire sensorielle visuelle. La mémoire imagée serait le stock des images idéalisées de la nature et des objets qui nous entourent. Ces images ne sont pas des photographies, mais des objets virtuels, qui peuvent être transformés mentalement par l'imagination ou le rêve.

Les lobes cérébraux externes



Le système limbique

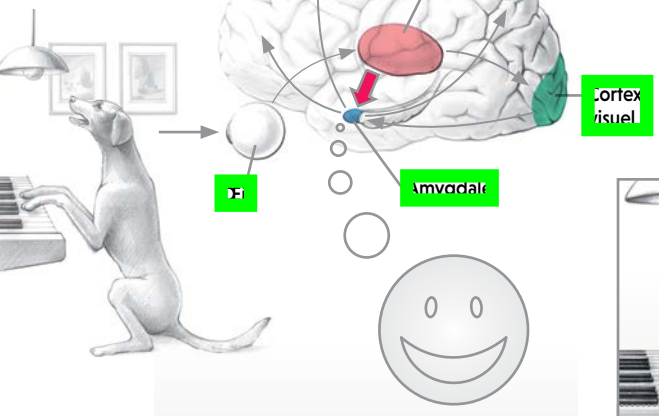


La construction du souvenir

Chaque jour, notre cerveau reçoit des milliers d'informations. Les rares qui s'y graveront durablement devront suivre un parcours en plusieurs étapes.

Texte : Christof Kuhbandner/Graphisme : Martin Mlue

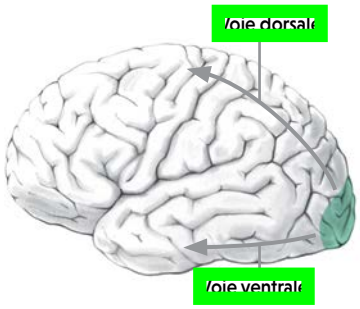
0,1 seconde ▶ Émotion

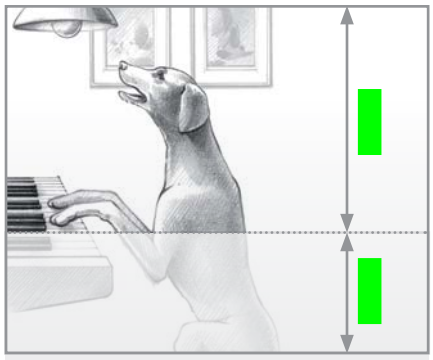


MÉMOIRE ÉMOTIONNELLE

L'image du chien qui joue du piano est transmise de façon grossière sous forme d'esquisse, de l'œil au thalamus puis à l'amygdale, la plaque tournante des émotions dans le cerveau. Celle-ci décide si la scène observée provoque une émotion. Elle module ensuite l'activité de différentes parties du cortex. Si l'épisode est par exemple amusant, l'impression en résultant est incorporée dans une banque de données émotionnelles. Ce classement peut avoir lieu avant même que nous percevions la situation consciemment. Il ne reste alors d'elle, dans notre mémoire, que sa connotation affective.

0,1 seconde ▶ Perception

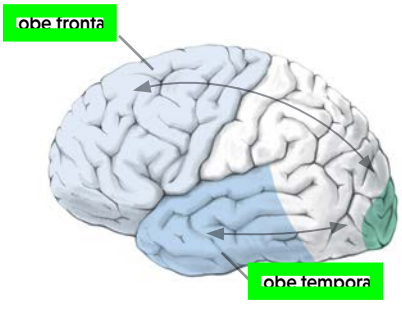




MÉMOIRE SENSORIELLE

L'étape suivante du traitement de l'information a lieu dans les aires sensorielles du cerveau. Ces dernières captent en premier lieu les données brutes fournies par nos sens, lesquelles sont ensuite traitées le long d'une voie dite ventrale qui identifie les objets (un chien, un piano), et le long d'une voie dorsale qui repère leur emplacement (le chien est assis devant le piano !). La mémoire sensorielle peut traiter d'immenses quantités d'informations, mais elles sont ensuite vite oubliées. De l'ensemble de l'épisode ne restera qu'un instantané, dont deux tiers apparaîtront détaillés et un tiers plutôt vague.

1,3 seconde ▶ Attention



MÉMOIRE À COURT TERME

Le cerveau compare l'image du chien jouant du piano avec des « réseaux de connexions visuelles » dans le lobe temporal, réseaux au sein desquels sont stockés des objets ayant été perçus ensemble par le passé – par exemple, un chien avec un os et une écuelle, ou un piano avec une partition et un tabouret. Des zones du cortex temporal activent ces représentations de façon transitoire. Un premier souvenir à court terme de la scène est créé par la mobilisation de ces images mentales qui sont combinées les unes aux autres.

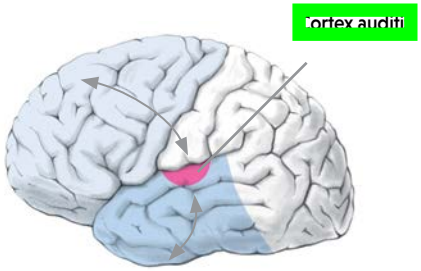
A quel moment un événement se grave-t-il dans notre mémoire ?

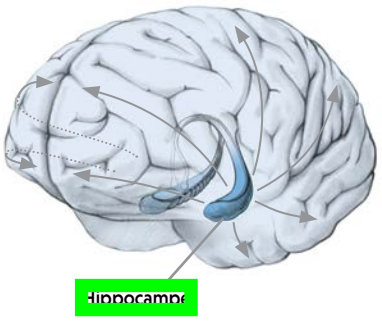
Chaque stimulus doit passer par plusieurs niveaux de traitement dans le cerveau, depuis la toute première perception jusqu'à son appréciation consciente et rationnelle. Chacun de ces niveaux mobilise un système de mémoire relativement indépendant des autres. Mais l'événement vécu ne s'ancrera en mémoire que s'il possède une valeur de nouveauté qui le distingue en partie des contenus déjà stockés. C'est ainsi qu'un chien qui rapporte un bâton ne laissera généralement pas de trace marquante dans notre mémoire, ce que réussira pourtant à faire un chien jouant du piano.

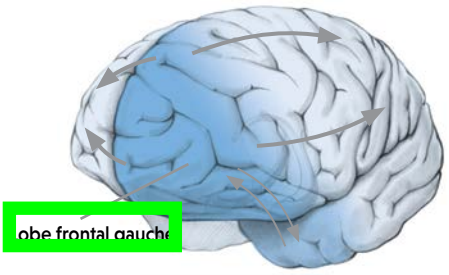
0,5 seconde ▶ Décodage

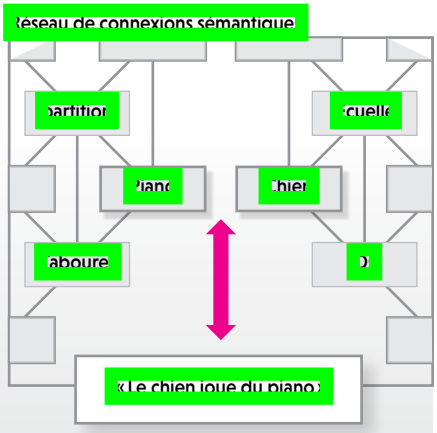
10 seconde ▶ Connexions temporaires

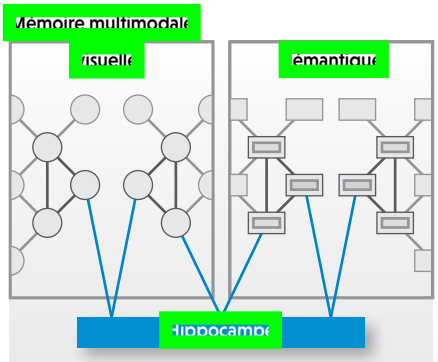
Toute la vie ▶ Consolidation

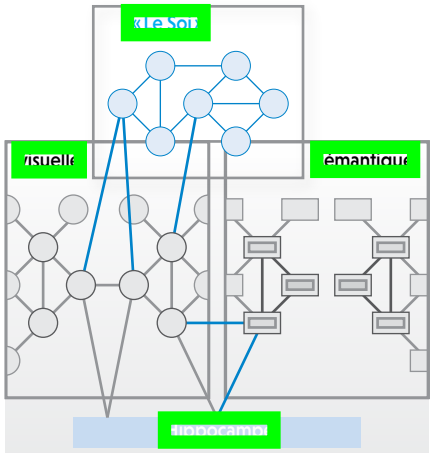












Un souvenir est à la fois visuel et verbal. Pour apporter cette dimension linguistique qui donne un sens à un événement de surcroît, un événement inattendu), les objets représentés visuellement sont codés verbalement par des réseaux de connexions sémantiques situés dans le lobe temporal. Des boucles neuronales entre le cortex auditif et le lobe frontal maintiennent les mots présents à la conscience. A cause de la faible capacité de stockage du cortex frontal, toutefois, il ne subsiste finalement de cette situation que quelques mots.

MEMOIRE EPISODIQUE

Pour stocker l'épisode à plus long terme, des connexions entre les réseaux sémantiques et visuels, jusqu'alors disjoints, s'établissent. L'hippocampe joue ce rôle de rassembleur, mais il stimule aussi de nouvelles connexions à l'intérieur de chaque modalité. Ainsi, le souvenir devient à la fois multimodal et plus riche, davantage personnalisé.

MEMOIRE AUTOBIOGRAPHIQUE

Si les neurones connectés de manière indirecte *via* l'hippocampe sont activés souvent de façon simultanée, il se crée dans le cortex des connexions directes qui aboutissent à une consolidation du souvenir. Notre cerveau possède toutefois une particularité : il stocke dans le lobe temporal des connaissances sur nous-mêmes et les met en relation avec les réseaux visuels et sémantiques. À l'aide de notre lobe frontal gauche, nous pouvons examiner cette connaissance de nous-mêmes, par une réactivation des mots et images préalablement enregistrés. Nous voyageons mentalement vers l'événement passé.

BERNARD STIEGLER

« La mémoire humaine est intégralement conditionnée par les dispositifs de mémorisation externes »

Commençons par un peu d'histoire. En 1987, vous étiez commissaire de l'exposition « Mémoires du futur », au centre Pompidou, à Paris. Quel en était le principe ?

Bernard Stiegler : À l'époque, je travaillais au Collège international de philosophie, où je donnais un séminaire autour de mes réflexions d'alors sur les rapports entre la mémoire humaine et la technique. Un colloque s'est ensuivi, au château de Vincennes. En pleine préparation du dixième anniversaire de l'établissement, Jean Maheu, le président du centre Pompidou m'a ensuite proposé d'organiser une exposition sur ce que serait la culture du XXIe siècle. Avec Catherine Counot, de la Bibliothèque publique d'information, nous nous sommes attachés à figurer l'avenir des bibliothèques dans un contexte où j'étais convaincu que la mémoire collective allait devenir l'enjeu central du développement industriel. Ni moi ni personne ne savait ce que serait la bibliothèque du XXIe siècle. J'ai donc proposé de montrer ce que je souhaitais qu'elle soit.

Pendant plus de deux ans, nous avons travaillé avec des historiens, des archéologues, des informaticiens, des spécialistes des bibliothèques et de la « documentique »... C'était le début des bases de données, et le succès en France de la télématique.

L'exposition, tout en jouant sur une mise en perspective où l'on remontait le temps, mettait en regard le temps réel et le temps différé : d'un côté, des téléscripteurs de l'AFP et leur flot de dépêches, des chaînes de télévision du monde entier... ; de l'autre, les premiers CD-Rom, le *Trésor de la langue française informatisé*, qui était une production du CNRS, les archives de l'INA, notamment.

BIO EXPRESS

1er AVRIL 1952
Naissance à Villebon-sur-Yvette (Essonne).

1993
Thèse de philosophie sous la direction de Jacques Derrida.

2002
Directeur de l'Ircam.

2006
Directeur de l'Institut de recherche et d'innovation (IRI) du centre Pompidou.

2018
La Technique et le Temps, vol. 1, 2 et 3, Fayard, 2018.

2018
Qu'appelle-t-on panser ? L'immense régression, Les liens qui libèrent, 2018.

L'INA était associé à un atelier au sein duquel les visiteurs pouvaient s'inscrire pour apprendre à monter des images – avec de prestigieux formateurs, tel Serge Daney. Après une journée de formation, et l'étude des journaux télévisés de la veille (à cette époque, 30 chaînes de télévision étaient accessibles en France), les participants pouvaient construire des « contre-journaux télévisés » en s'appuyant en particulier sur les archives de l'INA et les bases de données. Les résultats étaient souvent saisissants !

Dans d'autres ateliers, où intervenaient des écrivains, on apprenait à interpréter les dépêches de l'AFP avec un logiciel d'aide à l'écriture dans les styles de Zola, de Flaubert… inspiré des travaux de l'Oulipo. Dans un troisième, on pratiquait la recherche documentaire avancée pour tous.

Nous posions ainsi que l'avenir était aux réseaux, et que le XXIe siècle verrait s'en développer les pratiques instrumentées les plus inattendues. Nous voulions en outre affirmer qu'une société est constituée par sa mémoire, et que cette mémoire doit être vivante – son industrialisation pouvant à cet égard induire quelques questions : comment en effet imaginer l'avenir du savoir dans une société qui transforme tout en information ?

Quelle différence faites-vous entre savoir et information ?

Bernard Stiegler : Le savoir est une transformation de l'information. Celle-ci perd de la valeur avec le temps. De fait, la valeur d'une dépêche d'actualité s'évapore du jour au lendemain. Du point de vue de la théorie de l'information, cette valeur est calculable à partir d'un modèle entropique selon lequel plus l'information diffuse, moins elle informe.

À l'inverse, le savoir est cumulatif, et, en cela, néguentropique : il ne perd pas sa valeur et, tout au contraire, il s'enrichit avec le temps. Albert Einstein ne rend pas Isaac Newton obsolète : il le réinterprète. Il faut étudier Newton pour étudier Einstein. Tous les savants sont de tels « nains sur des épaules de géants », et tous les domaines du savoir sont plus ou moins cumulatifs – y compris le football, la cuisine, la maçonnerie et le jeu d'échecs…

Avec l'exposition « Mémoires du futur », nous annoncions que le XXIe siècle serait celui de la mémoire et de son exploitation par des moyens technologiques et industriels, mais aussi des menaces qu'il pouvait y avoir à la réduire à de l'information. Le défi était alors – et est toujours – d'empêcher que l'information ne détruise le savoir, et avec lui, la société. Pour ce faire, l'éducation doit être réinventée de A à Z, du Collège de France à la maternelle, et de façon à faire des citoyens des connaisseurs de ces technologies, qu'ils en soient des praticiens, et non des esclaves, ni même de simples « utilisateurs » en réalité consommateurs. Pour le moment, c'est très mal parti…

Vous différenciez également l'avenir et le devenir. De quelle façon ?

Bernard Stiegler : Pour répondre, voyons ce qui distingue d'une part le vivant du non vivant, et d'autre part les êtres humains des autres êtres vivants. Une table n'a pas de besoin particulier à assouvir : elle n'a pas à se nourrir par exemple – à l'inverse du moindre asticot. Sans garantie d'être encore vivant demain, ce minuscule être vivant est emporté à court terme par le devenir entropique de l'Univers. Si la table peut conserver sa structure à beaucoup plus long terme, elle n'a pas à maintenir sa structure en se nourrissant, cependant que table et asticot sont tous deux inéluctablement pris dans l'augmentation de l'entropie, c'est-à-dire du désordre.

Avec l'apparition au XVIIIe siècle du concept d'entropie, la question de l'instabilité fondamentale de l'Univers en totalité fut tout à coup posée. Ce bouleversement aura été un choc énorme, qui n'est d'ailleurs toujours pas surmonté aujourd'hui – ni par les physiciens, ni par les philosophes. On sait désormais que l'Univers va vers un refroidissement généralisé.

Cependant, depuis les travaux d'Erwin Schrödinger, tout être vivant est caractérisé par sa capacité à lutter contre ce devenir, contre cette augmentation de l'entropie : il a un avenir, qu'il inscrit dans le devenir, et, en provoquant ce que la théorie des systèmes appelle une bifurcation, il peut « remonter le courant » de l'entropie, et produire localement un ordre au lieu d'un désordre. Schrödinger parlait en cela d'entropie négative, ou néguentropie.

Caractérisé par sa lutte contre l'entropie, tout être vivant inscrit dans le devenir une bifurcation qui constitue son avenir

Qu'en est-il des êtres humains ?

Bernard Stiegler : Ce ne sont pas seulement des êtres vivants : regardez Stephen Hawking, un être biologiquement non-viable, et néanmoins considéré comme l'un des personnages les plus importants de la physique contemporaine. Il « était » à travers ce qui n'était pas vivant. Pour le comprendre, il faut mobiliser un concept qui a été formulé par Alfred Lotka. Ce mathématicien et statisticien est surtout connu pour les équations dites de Lotka-Volterra concernant la dynamique des populations, mais le plus important est ce qu'il publie en 1945 : il pose alors que les êtres humains sont essentiellement dotés d'organes exosomatiques, en premier lieu les outils. Ils ont bien des organes endosomatiques (des yeux, des oreilles…), mais les plus importants sont exosomatiques.

L'anthropologue André Leroi-Gourhan avançait ce genre d'idées en prenant de ne pas se fâcher avec le point de vue darwinien dominant. Lotka est plus direct. Selon lui, l'évolution humaine est avant tout exosomatique et donc orthogénétique. En d'autres termes, elle peut échapper à la sélection naturelle, et cette vision rompt avec une compréhension darwinienne de l'être humain.

La rupture entre l'animalité et l'humanité relève de ce que les Grecs appelaient la *noèsis*, c'est-à-dire la capacité à penser, à faire une démonstration, à raisonner, à prendre une décision… L'asticot ne décide de rien, il essaie de vivre en étant mu par les instincts inscrits dans son patrimoine génétique et ses relations avec l'environnement.

Nous, en principe, nous avons des facultés de décision, ce qu'on appelle la liberté : nous pouvons créer des bifurcations *délibérées*.

Et nous *devons* délibérer pour une raison que Lotka explique très bien : si les organes naturels de l'asticot sont spontanément et intégralement mis en œuvre et organisés pour lutter contre l'entropie, ce n'est pas le cas des humains. Dans cet article paru au sortir de la Seconde Guerre mondiale, Lotka affirme que les organes (exosomatiques) que produit l'homme sont aussi destructeurs que constructeurs. C'est pourquoi la délibération est *impérativement* requise.

Et, justement, la mémoire est externalisée dans des organes exosomatiques ?

Bernard Stiegler : Dès le début, il y a trois millions d'années, et pour ce qui concerne la mémoire sensorimotrice. Mais il y a au moins quarante mille ans et sans doute beaucoup plus, l'humanité procède à une externalisation de sa mémoire mentale dont les grottes témoignent. La mémoire sensorimotrice de l'être humain se transmet à travers les outils cependant qu'à partir du Paléolithique supérieur ce sont les contenus mentaux eux-mêmes qui sont transmis. Une orthogenèse s'opère alors par la sélection des individus qui ont les meilleurs organes artificiels, et les meilleures capacités à les produire et à les utiliser.

La mémoire de l'homme n'est pas dans son corps, ni donc dans son cerveau : elle est dans ses productions. Or, aujourd'hui, l'humanité produit sans cesse plus vite de nouveaux organes sans parvenir à élaborer les savoirs nécessaires à leur pratique.

C'est ce que vous appelez la disruption ? On perd le contrôle de notre mémoire de plus en plus externalisée ?

Bernard Stiegler : Ce mouvement très complexe étant assez récent, nous manquons de recul pour l'appréhender. Le principal argument de l'exposition « Mémoires du futur » était que ces technologies doivent être prises en charge par une politique repensée en fonction de ce qu'elles portent de nouveau qui ne doit pas être abandonné aux lois du marché et des actionnaires. Je soutiens dans *Qu'appelle-t-on panser ?* que c'est l'enjeu de ce que Nietzsche appelle une politique de la mémoire.

Les plateformes *via* nos smartphones créent de la dépendance en prenant le contrôle de nos mémoires. Une pédopsychiatre avec qui je travaille en Seine-Saint-Denis tente de prendre soin de jeunes mères qui calment leurs nouveau-nés avec leurs smartphones. Deux ans ou trois ans plus tard, les bébés ont tous les symptômes de l'autisme. La disruption qui prend de vitesse les organisations sociales ruine ainsi les savoirs les plus élémentaires.

Est-ce une stratégie délibérée par la Silicon Valley ? Et dans quel but ?

Bernard Stiegler : C'est évidemment une expression de la « volonté de puissance », où la question est la place du calcul : dans la Silicon Valley, on pense que le calcul peut tout résoudre. Or c'est absolument faux : les bifurcations néguentropiques ne sont jamais calculables par les systèmes.

Dans la Silicon Valley, on pense que le calcul peut tout résoudre. Je ne le crois pas

À l'inverse, cette accélération en quoi consiste la disruption nous précipite vers une augmentation de l'entropie à une échelle incommensurable, ce qui se révèle dans le dérèglement climatique et tout ce que le terme d'anthropocène recouvre plus largement – et qu'il faudrait appeler l'*Entropocène*.

Que faire ?

Bernard Stiegler : D'abord se souvenir qu'il y a toujours de l'improbable et que tout n'est pas calculable. Ensuite contribuer à générer des bifurcations positives, et nous nous y employons en Seine-Saint-Denis, sur un territoire où résident 430 000 habitants, en partenariat avec Plaine Commune, la Fondation de France, Orange, Dassault, la Caisse des dépôts, la Société générale, le Crédit du Nord, Danone et l'Afnic.

Nous travaillons au développement d'une économie organisée avant tout en vue de combattre l'entropie. Le point de départ est l'étude de l'université d'Oxford affirmant en 2013 que 47 % des emplois aux États-Unis sont automatisables. Ils le sont parce que ce sont des emplois prolétarisés, c'est-à-dire occupés par des employés obéissant au système, tâche pour laquelle les algorithmes et robots seront de plus en plus efficaces : ils occuperont ces emplois.

La prolétarisation telle que l'ont décrite Adam Smith puis Karl Marx repose sur le transfert du savoir du travailleur vers la machine, qui se soumet ainsi à ce travailleur se retrouvant privé de ce savoir et de la mémoire. À présent que les prolétaires peuvent être remplacés par des robots ou des algorithmes, comment à la fois rendre du pouvoir d'achat à ceux qui n'ont plus d'emploi et lutter contre l'entropie générée par les systèmes fermés que sont les systèmes automatisés ? La réalité de l'anthropocène, c'est l'augmentation de l'entropie thermodynamique, de l'entropie biologique et de l'entropie informationnelle. L'économie de demain sera nécessairement une économie de lutte contre l'entropie.

Pour ces êtres exosomatiques que sont les humains, le seul moyen d'y parvenir est le savoir : c'est ce que montre Lotka. Quel qu'il soit – celui du cuisinier, du sportif, du mathématicien, du juriste, du philosophe, du physicien – seul un savoir est capable d'introduire dans le monde quelque chose qui n'y était pas et qui réduit l'entropie. Le savoir n'est pas automatisable : il dépasse toujours tout calcul (on parle de créativité). Valoriser la lutte contre l'entropie suppose de redonner alors de

a valeur au local. D'ailleurs, Schrödinger explique pourquoi la néguentropie est toujours locale.

Puisque l'on parle de demain, quels liens entretient la mémoire avec le futur ?

Bernard Stiegler : Elle est toujours orientée vers le futur. Le philosophe allemand Edmund Husserl, marqué à la fois par saint Augustin et David Hume, a montré que la conscience humaine est constituée de rétentions et de protentions dont l'agencement constitue l'étoffe du temps vécu. Les rétentions sont ce qui est retenu, constituant le passé, les protentions sont ce qui est projeté à partir de ce qui est retenu, constituant le futur. Mais il montre que le présent est lui aussi constitué de rétentions, qu'il appelle « primaires », pour les distinguer des rétentions du passé, qu'il appelle « secondaires ». Car lorsque je perçois quelque chose qui est présent, par exemple un paysage que je parcours des yeux, je retiens « primairement » ce que j'ai perçu précédemment dans ce que je perçois actuellement, et par où le paysage m'apparaît – comme dans ce que l'on appelle au cinéma un « panoramique ». *Primairement* signifie ici : retenu dans et par le présent, par où cela se présente.

Ces rétentions primaires sont-elles comparables à la mémoire de travail ?

Bernard Stiegler : Certains neurologues confondent les deux, mais les rétentions primaires sont autre chose que la mémoire de travail, qui est un stockage temporaire. L'enjeu est ici de bien comprendre les rapports entre rétentions primaires et rétentions secondaires. Supposons que vingt personnes écoutent ce que j'ai dit depuis le début de notre entretien, et que nous demandions à présent à ces vingt personnes de redire ce que j'ai dit : nous aurons vingt versions différentes, et sans doute très différentes. Il en va ainsi parce que chaque personne entend ce que j'ai dit en fonction de son passé et des expériences au cours desquelles il s'est élaboré, ce qui veut dire que les rétentions primaires sont aussi et d'abord des sélections primaires, dans ce que j'ai dit, de ce qui intéresse ceux qui m'écoutent, leurs rétentions secondaires constituant les critères à partir desquels sont sélectionnées les rétentions primaires.

Sur ces bases s'opèrent des anticipations que Husserl appelle des protentions, et ces protentions engagent elles-mêmes des actions. Cependant il faut ici introduire un élément supplémentaire, que Husserl évoque à la toute fin de sa vie, et que j'ai moi-même appelé la rétention tertiaire. Si les Égyptiens ont pu exploiter le Nil, c'est grâce aux rétentions tertiaires que constituent les systèmes d'écriture et de numération apparus après le néolithique. Les rétentions secondaires mises sous forme écrite sont des rétentions tertiaires accessibles non seulement à l'individu qui les a vécues, mais à ses successeurs : nous. Ainsi, en accumulant sur le temps long des notations sur les mouvements des étoiles qui ont établi le calendrier égyptien et sur les crues du Nil, les Égyptiens ont pu exploiter le fleuve et gérer un vaste système d'irrigation. C'est ainsi qu'est née cette civilisation.

Toute l'histoire de la connaissance est conditionnée par les organes exosomatiques produits par l'homme depuis trois millions d'années

On retrouve à nouveau l'externalisation de la mémoire ?

Bernard Stiegler : En effet, et la mémoire humaine est intégralement conditionnée par la rétention tertiaire. C'est vrai des peintures de Lascaux, du silex taillé par nos ancêtres, de nos agendas et de nos smartphones, services GPS, systèmes d'intelligence artificielle… – la *data economy* étant une économie industrielle des rétentions tertiaires numérisées et calculables. Des silex taillés aux smartphones en passant par l'écriture alphabétique, toute l'histoire de la connaissance est conditionnée par ces procédés d'externalisation. Cela ne veut pas dire qu'elle y est réductible. Mais sans elle, la transmission de savoir n'aurait jamais pu se produire.

Y a-t-il des ruptures dans l'histoire des rétentions tertiaires, et donc de notre mémoire ?

Bernard Stiegler : Evidemment. Cependant, une rupture se fait toujours sur un fond de continuité, elle est toujours relative. Après le Paléolithique supérieur et les peintures rupestres, il y a eu celle, majeure, du Néolithique. La sédentarisation s'est accompagnée d'une augmentation de l'accumulation des rétentions tertiaires et de leur gestion raisonnée. Ainsi se sont formés les empires en Chine, en Mésopotamie, en Égypte, plus tard en Amérique latine.

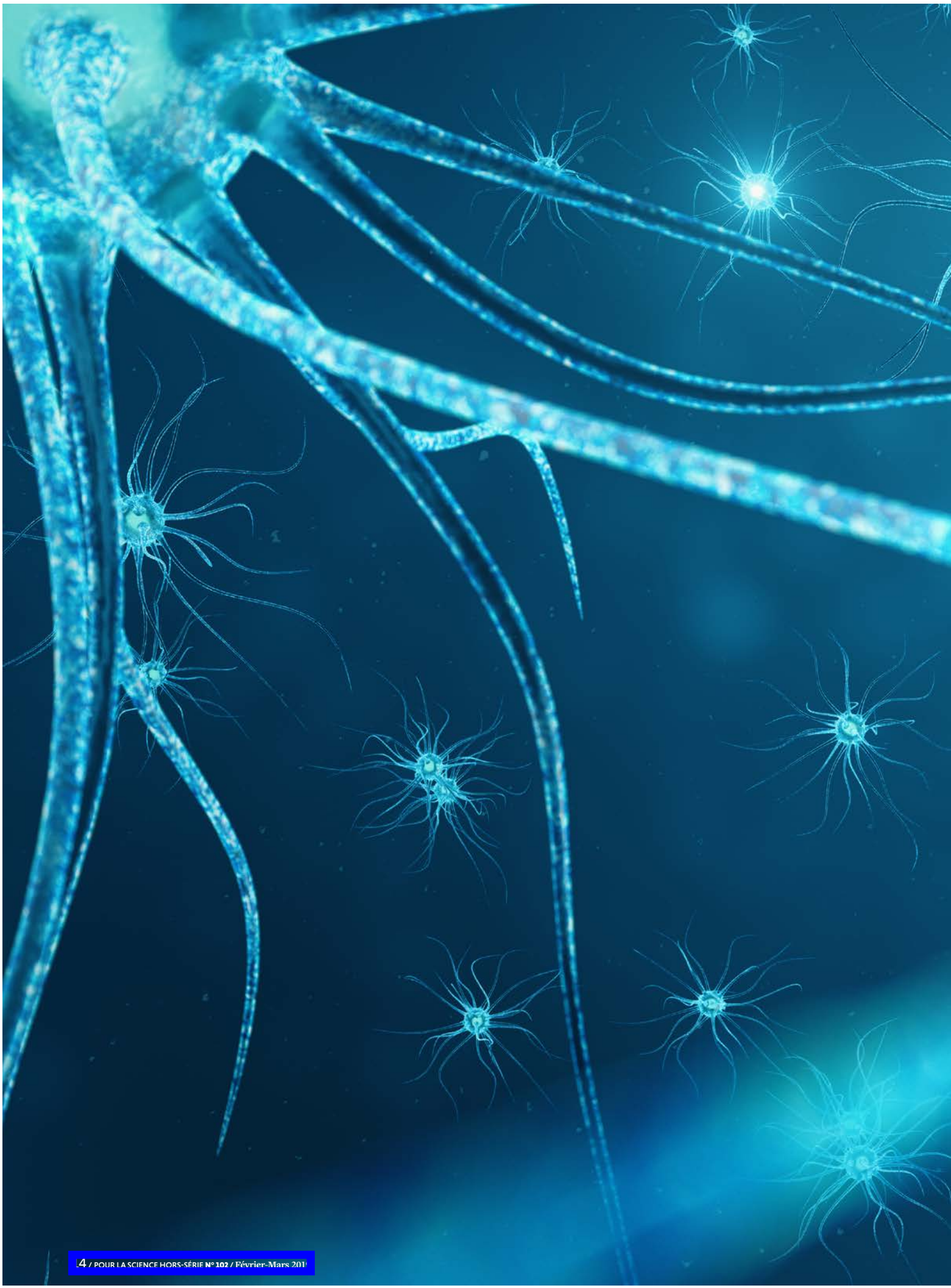
C'est ainsi que sont apparues les formes idéographiques d'écriture. Puis, en passant par l'écriture cunéiforme, est apparu l'alphabet. À présent l'alphabet a été intégré dans le codage alphanumérique de ce que Clarisse Herrenschmidt a appelé l'écriture réticulaire, qui passe par des machines. Tout cela a engendré une série de ruptures sur fond de continuité. La continuité, c'est l'exosomatisation.

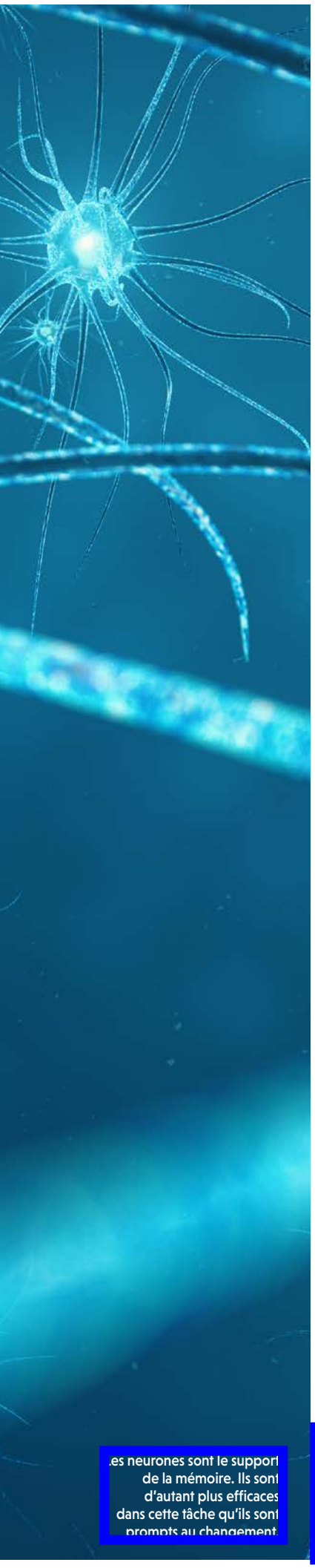
Les ruptures, ce sont les nouvelles organisations sociales requises par les nouveaux organes exosomatiques.

À chaque fois que la mémoire est transformée par les techniques artificielles de mémorisation, c'est le rapport au temps qui change. Ce rapport au temps, qui n'est déterminé ni par notre cerveau, ni par les lois de la physique, est conditionné par ces dispositifs de mémorisation que forment les rétentions tertiaires.

Le problème propre à notre temps – et c'est ce que voyait déjà venir Lotka en 1945 – est que les technologies se substituent aux organisations sociales elles-mêmes, et, ce faisant, détruisent les savoirs, c'est-à-dire les capacités à faire que les organes artificiels produisent plus de néguentropie que d'entropie. Tel est l'enjeu de l'Anthropocène, et de ce que nous tentons de faire avec Plaine Commune pour le dépasser. ■

Propos recueillis par Loïc Mangin.





INCROYABLE PLASTICITÉ

La mémoire se fonde sur la malléabilité des neurones et de leurs connexions. C'est par le renforcement des synapses et l'établissement de nouvelles que les souvenirs s'ancrent dans notre cerveau. C'est particulièrement vrai pendant le sommeil, lorsque les apprentissages sont consolidés. Comment le sait-on ? Parce que désormais, on peut le voir en direct Quand le renforcement est trop efficace, la mémoire devient infaillible. Un atout ? Pas nécessairement...

Les neurones sont le support de la mémoire. Ils sont d'autant plus efficaces dans cette tâche qu'ils sont prompts au changement

L'ESSENTIEL

- Nous retenons beaucoup mieux des mots qui ont trait à la notion de survie que les autres.
- Plusieurs psychologues en concluent que la mémoire a été façonnée par la sélection naturelle pour nous aider à faire face aux aléas de l'environnement.
- En outre, on retient mieux des mots liés à des entités animées.
- On pourrait utiliser ces résultats pour améliorer l'enseignement des mathématiques, de la géologie, de la botanique en mettant en avant le danger.

LES AUTEURS

PATRICK BONIN est professeur en psychologie cognitive à l'université de Bourgogne Franche-Comté (LEAD-CNRS) et membre honoraire de l'Institut universitaire de France.

AURÉLIA BUGAISKA est professeure en psychologie du veillissement cognitif à l'université de Bourgogne Franche-Comté (LEAD-CNRS).

Une mémoire en mode survie

Notre mémoire fonctionne encore comme à l'âge de pierre. En effet, une meilleure mémorisation en situation de survie aurait aidé nos ancêtres à surmonter les dangers. Et cette tendance se serait perpétuée jusqu'à nos jours…

Après une tempête et le naufrage de votre navire, vous échouez, seul, sur le rivage d'une terre inconnue, déserte, sans aucun secours matériel pour survivre. Pour affronter la situation, vous devrez vous approvisionner en nourriture et en eau, mais aussi faire face à des prédateurs. Bonne chance! Ce scénario, qui ressemble à celui d'un jeu de téléréalité, a en fait été imaginé par le psychologue James Nairne et son équipe de l'université Purdue, aux États-Unis, pour les besoins d'une expérience.

Les participants, placés dans le contexte «à la Robinson», devaient évaluer les mots qu'on leur présentait et déterminer si le concept auquel ils renvoyaient serait utile dans une telle situation. Ils disposaient pour ce faire d'une échelle allant de «pas pertinent» (pour la survie) à «très pertinent». Venait ensuite une occupation distrayante, destinée à éviter qu'ils ne répètent mentalement ces mots. Passé ce délai, arrivait enfin un test surprise consistant à coucher sur le papier tous les mots dont ils se souvenaient.

La mémorisation était environ 20% plus élevée lorsque les mots étaient traités dans le cadre du scénario *survie* que dans deux autres conditions témoins (un déménagement en pays étranger et une classification de mots selon leur caractère plaisant). Dans le domaine des études sur la mémoire, cet écart

e retrouver en situation
de survie aurait un impact
positif sur la mémoire.

correspond à un effet considérable ! En outre, cette expérience a été maintes fois répliquée, tant avec des mots qu'avec des images, avec les mêmes résultats aussi bien chez des adultes que chez des enfants.

L'ADVERSITÉ EST BONNE POUR LA MÉMOIRE

De façon générale, le bénéfice lié à la mémorisation après une mise en conditions de survie se révèle notablement plus important que ceux traditionnellement observés avec des traitements réputés accroître fortement la mémorisation, comme le fait de se créer une image mentale à partir de la présentation des mots. L'effet survie est même plus puissant que celui obtenu lorsqu'on demande à des individus d'apprendre intentionnellement des mots.

Pour rendre compte de ces faits, James Nairne a proposé une conception novatrice de la mémoire humaine : la mémoire adaptative. Selon cette hypothèse, notre mémoire aurait été façonnée dans notre passé ancestral pour résoudre des problèmes de survie. Trouver de la nourriture, se protéger des prédateurs, éviter d'être contaminé, trouver un partenaire sexuel… La mémoire, dans cette perspective, serait le fruit de l'évolution, tout comme d'autres fonctions cognitives ou biologiques. Ainsi, nous aurions hérité d'un fonctionnement mnésique dont les caractéristiques sont en partie les conséquences de la confrontation à des pressions sélectives rencontrées par nos ancêtres chasseurs-cueilleurs. Par exemple, la détection des proies et des prédateurs a été primordiale pour la survie de nos ancêtres. Nous nous souviendrions donc mieux d'informations ayant une valeur pour notre survie et notre succès reproductif.

Ce type d'interprétation peut sembler trivial, mais il est rare que la psychologie cognitive se demande pourquoi la mémoire fonctionne de telle manière plutôt que de telle autre. La mémoire adaptative représente alors une conception novatrice car, dans ce cadre, les chercheurs s'interrogent non seulement sur le « comment » du fonctionnement mnésique mais aussi sur le pourquoi : pourquoi la mémoire possède-t-elle ces caractéristiques ? De ce point de vue, l'effet de survie laisse entrevoir que la mémoire s'est développée pour accroître notre pouvoir d'adaptation. En outre, des travaux ultérieurs ont montré que le contexte de survie ancestrale (en milieu sauvage) utilisé par James Nairne n'est pas indispensable : car d'autres situations où il peut être question de survie (dans des villes, notamment) s'avèrent tout aussi efficaces pour améliorer la rétention à long terme.

LA COGNITION AUTOCENTRÉE

Reste à comprendre comment fonctionne « l'effet survie ». Fait notable, les chercheurs ont constaté qu'il ne s'exerce que si l'on envisage sa propre situation et non celle d'un tiers. Ainsi, la psychologue Sheila Cunningham, de l'université Abertay, à Dundee, au Royaume-Uni, et ses collègues ont demandé à des participants d'évaluer la pertinence de mots dans un contexte de survie ancestrale, soit pour leur propre compte, soit pour celui d'une personne connue. L'avantage mnésique n'apparaissait que lorsque la survie concernait les participants eux-mêmes. La référence à soi serait donc un élément critique de l'effet survie même s'il ne peut entièrement en rendre compte.

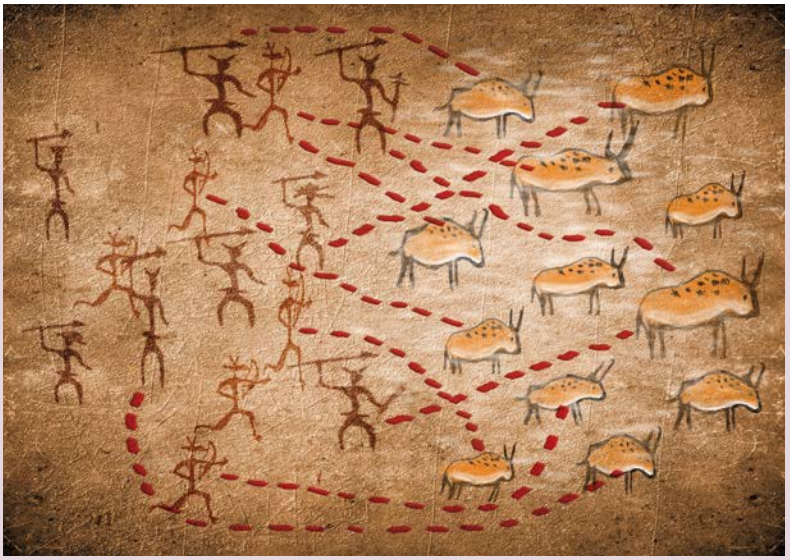
La notion de référence à soi est bien connue et abondamment documentée en psychologie : elle renvoie au fait qu'un mot ou concept est mieux mémorisé s'il est envisagé en lien avec soi-même plutôt qu'avec une autre personne. Cela se traduit par le fait que, dans des expériences, des sujets se demandant si le qualificatif de « courageux » s'applique à leur propre personne retiennent mieux ce mot que s'il s'applique à une tierce personne. Précisons que, même si les situations où nous sommes menacés l'enclenchent indubitablement, l'effet de survie n'est pas uniquement autoréférencé. Qui plus est, il a toujours cours aujourd'hui.

Certes, l'environnement professionnel ou scolaire actuel fait peu appel à des contextes de survie. Mais à en croire quelques études inspirées de la mémoire adaptative, le recours à de tels contextes pourrait profiter à l'apprentissage. Par exemple, dans le cadre de

LA MÉMOIRE DES ENTITÉS ANIMÉES

Des observations récentes, en partie acquises dans notre laboratoire, montrent que des mots renvoyant à des entités animées (*lion, bébé…*) sont mieux retenus à des entités inanimées (*montagne, bouteille…*). L'effet animé est un argument fort en faveur de la théorie de la mémoire adaptative, qui postule que des informations relatives à la survie sont particulièrement importantes. De fait, la distinction entre objets animés et inanimés est essentielle pour assurer sa survie, les animés pouvant être des prédateurs, des proies ou des congénères. Les mots désignant des entités animées captent sans doute plus facilement notre attention que ceux désignant des entités inanimées. Des travaux récents ont toutefois réfuté l'hypothèse que l'effet animé en mémoire serait dû au fait que les mots correspondant à des animés évoquent plus facilement des images mentales que ceux renvoyant à des inanimés.

LA MÉMOIRE EST-ELLE SOLUBLE DANS LA THEORIE DE L'EVOLUTION ?



Notre passé de chasseur-cueilleur a-t-il laissé des traces dans nos processus de mémorisation ?

L'idée selon laquelle le fonctionnement de notre mémoire résulte de millions d'années d'évolution et de contraintes passées [illegible] évolutionniste. Selon cette dernière, notre cerveau n'est pas seulement façonné par l'environnement et la culture, mais hérite aussi de mécanismes – ou de la potentialité de les développer – mis en place dans notre passé ancestral. En raison de pressions sélectives rencontrées par nos ancêtres chasseurs-cueilleurs, le cerveau des humains modernes serait constitué de « modules », des machines cérébrales spécialisées dans la résolution de problèmes adaptatifs spécifiques.

La psychologie évolutionniste correspond à une approche cognitiviste qui intègre la théorie de la sélection naturelle de Darwin. Mal perçue en France, on lui reproche parfois des explications extravagantes ou passe-partout, ainsi qu'un caractère déterministe – nos comportements seraient programmés génétiquement. Tout en reconnaissant l'existence d'explications parfois paroques pour rendre compte de certains phénomènes (comme dans d'autres disciplines, au demeurant), voire de récupérations idéologiques, un examen approfondi des travaux issus de cette discipline (tels les travaux du psychologue David Buss, à l'université du Texas, à Austin, aux États-Unis) montre que ces explications sont relativement peu nombreuses aujourd'hui, et rapidement écartées au sein de cette discipline scientifique, qui, comme d'autres, ne retient pas plus longtemps les hypothèses n'étant pas soutenues par des données d'observation rigoureusement collectées (issues d'expérimentations, de questionnaires, etc.).

Sans nier l'impact ni l'importance de la culture dans l'explication des comportements, cette approche se veut au contraire interactionniste en ce sens qu'elle tente d'expliquer les comportements en prenant en compte à la fois des contraintes biologiques et environnementales.

l'enseignement de la biologie, Pavol Prokop et Jana Fančovičová, de l'université de Trnava, en Slovaquie, ont présenté à des lycéens des informations importantes sur des plantes, quant à leur subsistance (toxicité des fruits), et des informations qui n'y étaient pas reliées (appellation et localisation). Verdict : les premières étaient mieux retenues que les autres.

LA BOTANIQUE DE LA SURVIE

D'un point de vue éducatif, les enseignements en botanique gagneraient donc à inclure des informations pertinentes en termes de survie, comme leurs vertus curatives ou leur toxicité. De même, les anthropologues Clark Barrett et James Broesch, de l'université de Californie à Los Angeles, ont observé que, par rapport à d'autres types d'informations sur des animaux, les enfants se souvenaient mieux de celles relatives à leur dangerosité.

Enfin, une étude de l'équipe de James Nairne a montré que l'apprentissage de couples de mots (l'un en anglais, l'autre en swahili) était facilité par la présence d'un mot animé, ce qui révèle une autre forme de mémoire adaptative (*voir l'encadré page ci-contre*). Pour apprendre une langue étrangère, il serait donc sans doute intéressant de présenter des contextes associant animés et inanimés. En cours d'anglais, il s'agirait de retenir par exemple l'expression « (*the*) *dog* (*is running in the*) *mountain* » plutôt qu'une autre impliquant deux items inanimés, comme : « (*the*) *house* (*is burning in the*) *mountain* ».

Plus généralement, dans l'élaboration de séquences pédagogiques, pourquoi ne pas présenter les notions à apprendre dans un contexte où la survie jouerait un rôle ? Placer les élèves dans une situation imaginaire de catastrophe naturelle, comme un volcan en activité, se révélerait utile à l'apprentissage des notions de géologie (qu'est-ce que la lave ? pourquoi est-elle liquide et brûlante ? qu'est-ce qu'une plaque terrestre ?). Autre possibilité : placer des élèves dans une situation imaginaire de survie pour leur faire comprendre et apprendre des notions d'arithmétique… Ainsi pourront-ils imaginer qu'ils doivent fabriquer un piège pour capturer une proie et se nourrir. Le piège, compte tenu de la taille de l'animal, doit avoir un certain périmètre circulaire. L'enseignant peut alors introduire, dans ce cadre, la notion de périmètre d'un cercle et son calcul ! Une nouvelle discipline est à inventer, la pédagogie par la peur ! ■

BIBLIOGRAPHIE

M. GELIN *ET AL.*, Animacy effects in episodic memory: do imagery processes really play a role?, *Memory*, À paraître, 2018.

P. BONIN, Tous descendants de chasseurs-cueilleurs ! Nos cerveaux le savent…, *Edilivre*, 2017.

J. NAIRNE ET J. PANDEIRADA, Adaptive memory: The evolutionary significance of survival processing, *Perspectives on Psychological Science*, vol. 11(4), 2016.

P. BONIN *ET AL.*, Survivre pour se souvenir, Une approche novatrice de la mémoire épisodique: la mémoire adaptative, in *L'Année Psychologique*, vol. 114, pp. 571-610, 2014.

L'ESSENTIEL

- La base de la mémoire est la capacité à associer plusieurs souvenirs à la suite les uns des autres, ce qui tisse un récit continu du passé.
- Des chercheurs ont observé que ce lien s'opère par le partage de neurones communs à plusieurs souvenirs rapprochés dans le temps.
- En manipulant les « neurones partagés » au moyen de molécules ou de lasers, les neuroscientifiques ont réussi à faire ou défaire les associations de souvenirs.

L'AUTEUR

ALCINO SILVA
est directeur du Centre intégratif de l'apprentissage et de la mémoire à l'université de Californie, à Los Angeles, aux États-Unis.

Un ballet de neurones en direct

Observer des souvenirs se former dans les neurones du cerveau, et même voir des souvenirs se lier pour, au final constituer la mémoire, c'est aujourd'hui possible

Le visage d'un enfant, un canard, un lac... le cerveau doit fusionner les détails mémorisés d'une scène pour les transformer en une expérience réelle, un souvenir, ici le regard d'un enfant qui regardait s'envoler un groupe de canards au milieu des roseaux sur le bord d'un lac.

La mémoire s'appuie sur de nombreux facteurs. En effet, notre survie en tant qu'espèce au fil des millénaires a dépendu de notre capacité à nous rappeler les bonnes informations – un lion ou un serpent? –, mais aussi le contexte entourant ces informations: a-t-on rencontré le fauve ou le reptile dans la savane africaine, ou au zoo? Selon la réponse, le danger n'est pas le même...

LE LAC, LE LION ET L'INVESTISSEUR

La vie quotidienne recèle d'autres dangers. Par exemple, pour décider d'un investissement financier, on doit tenir compte de ce que l'on sait sur l'honnêteté et la fiabilité du conseiller, sous peine de ruine. Ces divers cas illustrent l'importance non pas des souvenirs en eux-mêmes, mais des liens qui les unissent les uns aux autres. Or on ne s'intéresse aux mécanismes de ces interactions que depuis peu...

Aujourd'hui, le champ des neurosciences prend à bras-le-corps cette question fondamentale : comment notre cerveau relie-t-il nos souvenirs dans le temps et l'espace ? Jusqu'à présent, l'immense majorité des recherches sur la mémoire se sont concentrées sur la manière dont nous acquérons, stockons, récupérons et altérons nos souvenirs individuels. Mais la plupart de ces souvenirs ne sont pas des entités uniques et isolées. Nous savons que le rappel d'un souvenir en ravive un autre, suscitant des séquences qui nous aident à mieux prédire et comprendre le monde qui nous entoure.

Les mécanismes fondamentaux que le cerveau utilise pour créer ces associations de souvenirs commencent à être mieux compris après vingt ans de recherches menées dans plusieurs laboratoires, dont le nôtre. Comprendre les processus physiques mis en jeu dans l'intrication de ces souvenirs aura des conséquences qui, outre la connaissance de nos ressorts intimes, nous aideront peut-être à éviter les troubles de la mémoire mettant à mal notre capacité à former des souvenirs et à les lier les uns aux autres…

L'ARCHITECTE DE LA MÉMOIRE

Nous avons commencé à étudier l'association des souvenirs, au début des années 1990. Un élément déclencheur a été notre découverte, par hasard, de l'« allocation neuronale » : nous nous sommes aperçus que le cerveau utilise des règles spécifiques pour attribuer des fragments d'une information apprise à des groupes séparés de neurones dans des régions cérébrales impliquées dans la formation de la mémoire.

Tout a commencé lors d'une conversation avec Michael Davis, aujourd'hui à l'université Emory, à Atlanta, aux États-Unis. Cet ami et collègue me faisait part de travaux où son équipe manipulait chez des rats un gène nommé *CREB* pour amplifier leur mémoire émotionnelle, par exemple l'association, dans leur mémoire, d'un bip et d'un choc électrique.

Par le passé, mon équipe avait découvert, en collaboration avec d'autres, que le gène *CREB* participe à la formation de la mémoire à long terme. Il remplit cette fonction en codant une protéine qui régule l'expression d'autres gènes nécessaires à la mémoire. Au cours d'un processus d'apprentissage, certaines synapses (les structures cellulaires que les neurones utilisent pour communiquer) se créent, ou se renforcent, de façon à faciliter les échanges entre neurones. La protéine CREB agit comme un architecte moléculaire dans ce processus.

Etonnamment, le groupe de Michael Davis avait réussi à améliorer la mémoire en n'augmentant la production de CREB que dans un petit sous-groupe de neurones de l'amygdale, une région cérébrale essentielle pour la mémoire des émotions. Une question me tarauda : comment la mémoire s'était-elle retrouvée dans une poignée de neurones où elle pouvait tirer avantage de quantités plus élevées de CREB ? Se pouvait-il que la protéine CREB non seulement orchestre la formation de souvenirs, mais aide aussi à assurer que les neurones qui la produisent aient plus de chances que les autres de participer à la formation de souvenirs ?

En science, trouver les bonnes questions est tout aussi important que d'y répondre. Lors de cette conversation, j'ai compris à quel point les neuroscientifiques connaissaient peu les règles qui assignent un souvenir donné à un groupe de neurones dans les différentes régions cérébrales dédiées à la mémoire. Nous avons donc décidé d'explorer cette question, et nous nous sommes concentrés sur les fonctions de la protéine CREB dans deux régions cérébrales clés pour la mémoire : l'amygdale, déjà citée, mais aussi l'hippocampe, crucial dans la mémoire des lieux.

On doit une première percée importante à Sheena Josselyn, désormais à l'université de Toronto, au Canada, qui avait étudié CREB dans le laboratoire de Michael Davis. Dans une série d'expériences, elle s'est servie d'un virus pour introduire des exemplaires supplémentaires du gène *CREB* dans certains neurones de l'amygdale de souris. Elle a montré que ces neurones avaient dès lors près de quatre fois plus de chances de stocker des souvenirs effrayants que les cellules voisines.

LES NEURONES SUREXPRIMANT LE GÈNE *CREB* ONT QUATRE FOIS PLUS DE CHANCES DE STOCKER DES SOUVENIRS QUE LES CELLULES VOISINES

En 2007, nous avions accumulé les preuves que les souvenirs émotionnels ne sont pas attribués à des neurones au hasard dans l'amygdale. Les cellules qui prennent en charge les souvenirs sont celles qui produisent le plus de protéines CREB. Nous avons ensuite montré que cette protéine a une fonction analogue dans d'autres régions du cerveau, dont l'hippocampe et le cortex, la partie la plus externe du cerveau.

Pour confirmer le rôle de la protéine CREB dans l'allocation des souvenirs aux différents neurones, nous nous sommes orientés vers des méthodes récentes qui ont bouleversé l'étude de la mémoire ces dernières années. Ces techniques de laboratoire permettent d'activer ou de désactiver des neurones, avec pour effet de raviver un souvenir ou de le maintenir silencieux. C'est grâce à ces outils que

Le miniscope est un minimicroscope qui montre les souvenirs en formation dans un cerveau de souris. Grâce à lui, on observe directement les neurones qui s'activent dans le cerveau de l'animal, sans limiter les mouvements de ce dernier.

Yu Zhou, dans mon laboratoire, a modifié un petit groupe de neurones de l'amygdale de souris de sorte qu'ils produisent de plus grandes quantités de CREB ainsi qu'une autre protéine mise au point par le laboratoire d'Edward Callaway, à l'institut Salk d'études biologiques, à La Jolla, en Californie. Grâce à cette protéine, nous réduisions au silence les neurones produisant de la protéine CREB au moment où nous le souhaitions. Lorsque nous éteignions les neurones riches en CREB et laissions actifs ceux qui en produisaient des quantités plus faibles, la mémoire des émotions était supprimée. Les neurones produisant de grosses quantités de CREB étaient ainsi de toute évidence impliqués dans le stockage des souvenirs.

STOCKAGE À LA CARTE

De fortes concentrations de CREB pouvaient donc déterminer quelles cellules stockaient un souvenir en particulier, mais nous ne savions pas de quelle façon. Or Robert Malenka, de l'université Stanford, en Californie, et ses collègues avaient par ailleurs découvert que le fait d'augmenter la quantité de CREB dans certains neurones les rendait plus facilement activables. Était-ce la raison pour laquelle les neurones produisant beaucoup de CREB étaient sélectionnés pour stocker les souvenirs? Pour répondre à cette question, Yu Zhou a modifié des neurones de l'amygdale de façon à leur faire produire davantage de protéines CREB. Et à l'aide d'électrodes microscopiques, elle a constaté qu'ils étaient dès lors plus faciles à «allumer» que les neurones non modifiés. Leur excitabilité accrue suggérait que ces cellules étaient mieux préparées pour activer les processus nécessaires à la construction d'un souvenir.

Restait à tester cette idée. Yu Zhou a examiné en détail les connexions synaptiques des neurones produisant beaucoup de CREB. On sait depuis longtemps que la force des connexions synaptiques est un aspect déterminant de la formation des souvenirs. Après avoir entraîné les souris à réaliser une tâche qui créait chez elles des souvenirs émotionnels, Yu Zhou a testé la force des connexions synaptiques de neurones de l'amygdale exprimant de fortes quantités de CREB. Pour cela, elle a stimulé les synapses de ces neurones à l'aide d'un faible courant électrique et a enregistré leurs réponses au moyen de fines électrodes. Comme attendu, les synapses des neurones de l'amygdale produisant plus de CREB étaient plus puissantes que les autres, ce qui était en accord avec l'idée que ces neurones contribuaient au stockage des souvenirs.

Plus récemment, l'équipe de Sheena Josselyn a montré que le souvenir d'une expérience effrayante pouvait être stocké dans un ensemble prédéterminé de neurones de l'amygdale. Pour «flécher» ces neurones, les chercheurs leur avaient ajouté un type particulier de canal ionique (des pores ancrés dans la membrane des cellules) qui augmente leur excitabilité. Le laboratoire d'Albert Lee, à l'institut Howard-Hughes, à Ashburn, en Virginie, a obtenu un résultat similaire par une autre méthode: les chercheurs ont augmenté artificiellement l'excitabilité de neurones de l'hippocampe chez un rat lorsqu'il se trouvait en un endroit donné. Ils ont alors observé que ces neurones avaient tendance à se réactiver spontanément lorsque l'animal retournait au même endroit. Ce genre d'observation corrobore les nôtres: l'excitabilité joue un rôle essentiel dans la désignation des neurones mis en jeu pour stocker un souvenir donné.

Finalement, notre équipe et celle de Sheena Josselyn, grâce à l'optogénétique, ont activé sélectivement des neurones plus riches en protéine CREB. Thomas Rogerson et Balaji Jayaprakash ont d'abord modifié génétiquement des neurones de l'amygdale afin de leur faire produire davantage de protéines CREB, mais aussi la protéine Channelrhodopsine-2, un canal ionique spécifiquement activé par la lumière bleue. Nous avons alors montré qu'il était possible de provoquer artificiellement le rappel d'un souvenir de peur chez des souris en utilisant la lumière bleue pour activer les neurones de l'amygdale plus riches en CREB, mais pas ceux qui en contenaient moins. C'était une autre façon de confirmer que la mémoire est stockée dans ces neurones à forte concentration de CREB.

En 2009, à l'occasion de l'écriture d'un article sur nos recherches, j'ai présenté nos idées sur la façon dont les souvenirs sont associés dans le temps. La capacité de CREB à désigner quels neurones entrent dans la composition d'un souvenir – l'allocation neuronale – m'a conduit à l'hypothèse que ce processus pouvait être la clé de notre capacité à lier les souvenirs les uns aux autres. C'est ce que nous avons

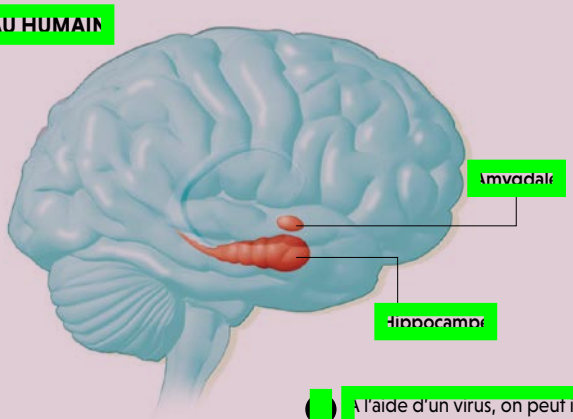
25 %

des neurones activés par un premier souvenir le sont aussi par un second, moins de 5 heures plus tard. Cette réutilisation assure un lien entre les deux événements passés. Par comparaison, seuls 3% des neurones sont réactivés si l'intervalle est de 7 jours.

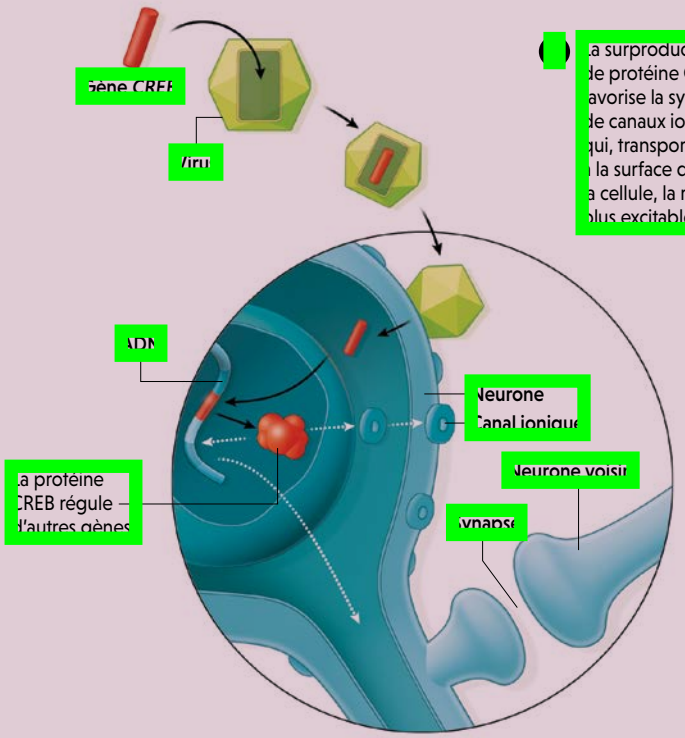
SUR LA TRACE D'UN SOUVENIR

Plusieurs régions de notre cerveau interviennent dans la formation de nos souvenirs. Parmi elles, l'amygdale est essentielle pour les souvenirs à connotation émotionnelle, et l'hippocampe est impliqué dans la formation de ceux liés à nos expériences personnelles. Les neurones où l'on augmente artificiellement la production d'une protéine nommée CREB ont plus de chances de participer à l'encodage d'un souvenir.

CERVEAU HUMAIN



1 À l'aide d'un virus, on peut insérer dans des neurones de souris des copies supplémentaires d'un gène qui code la protéine CREB.



2 La surproduction de protéine CREB favorise la synthèse de canaux ioniques qui, transportés à la surface de la cellule, la rendent plus excitable.

nommé l'hypothèse de l'allocation de lien: les neurones qui surexpriment le gène *CREB* étant plus facilement activés et donc plus plastiques, ils sont plus aptes à stocker un autre souvenir. Et lorsque deux souvenirs ont en commun un grand nombre de neurones, ils sont liés.

LE COUPLAGE DES SOUVENIRS

En conséquence, l'activation de ces neurones au cours de la remémoration d'un de ces deux souvenirs déclenche le rappel du second. Cette vision des choses débouchait sur une prédiction forte: deux souvenirs formés à peu de temps d'intervalle – la même journée, par exemple – ont plus de chances d'être liés que s'ils sont séparés par de plus longues périodes. Pour des intervalles supérieurs à une journée, le second souvenir ne bénéficie plus de l'excitabilité produite par le premier et se trouve donc stocké dans un autre sous-ensemble de neurones. La limite de temps imposée à l'association de souvenirs est *a priori* sensée, car les événements qui se produisent à l'échelle d'une journée ont bien plus de chances d'être connectés les uns avec les autres que ceux distants, mettons, d'une semaine.

Cependant, si l'hypothèse de l'allocation de lien était venue assez naturellement, il n'en allait pas de même de sa validation... Elle fut possible quand Denise Cai et Justin Shobe se sont joints au projet. La première proposa une expérience astucieuse: Justin Shobe et elle ont commencé à placer des souris dans deux cages au cours de la même journée, à cinq heures d'intervalle, dans l'espoir que les souvenirs des deux cages se trouveraient connectés l'un à l'autre. Plus tard, ils leur administrèrent un léger choc électrique alors qu'elles étaient dans la seconde cage. Comme prévu, quand, ensuite, les souris ont à nouveau été placées dans la cage où elles avaient reçu le choc électrique, elles se sont immobilisées, probablement parce qu'elles se rappelaient avoir reçu un tel choc en ce lieu. L'immobilisation est une réaction naturelle chez les souris apeurées, parce que la plupart des prédateurs les détectent alors moins facilement.

Le résultat clé est apparu lorsque les souris ont été placées dans la première cage, où elles n'avaient jamais reçu de choc électrique. Nous pensions que si les souvenirs des deux cages étaient liés, les souris placées dans la première se rappelleraient le choc électrique reçu dans la seconde et, par anticipation, s'immobiliseraient – et c'est ce qui s'est produit.

Nous avons aussi prédit que les deux souvenirs auraient moins de chances d'être liés s'ils étaient séparés de sept jours. Et effectivement, les souris replacées dans la première cage ne semblaient pas se souvenir de la deuxième lorsque l'intervalle de temps entre les deux premières expositions dépassait une semaine. En

général, au-delà d'une journée d'intervalle, les souvenirs ne s'associaient pas.

Aussi excitantes que fussent ces découvertes comportementales, elles ne suffisaient pas à confirmer une prédiction essentielle découlant de notre hypothèse: l'idée que les souvenirs individuels formés à peu de temps d'intervalle soient stockés dans une même zone du cerveau, au sein de populations neuronales se recouvrant partiellement. Ce recouvrement physique devait lier les souvenirs, de sorte que le rappel de l'un entraîne celui de l'autre.

UN MICROSCOPE PORTABLE

Pour tester l'hypothèse d'allocation de lien, nous devions voir les souvenirs se former dans le cerveau. Par chance, la bonne technique d'imagerie est apparue au moment où nous en avions le plus besoin. Mark Schnitzer, de l'université Stanford, et son équipe venaient d'inventer un tout petit microscope, capable de visualiser l'activité de neurones dans le cerveau de souris libres de se déplacer. Cet instrument de 2 à 3 grammes est porté par l'animal comme un chapeau. Il nous a permis de pister les neurones activés par un souvenir donné et de savoir s'ils deviennent actifs quelques heures après, lorsqu'un autre souvenir est créé. En d'autres termes, nous avons pu tester notre prédiction. Nous avons ensuite créé notre propre version de cet outil, le «miniscope».

Pour visualiser uniquement les neurones activés par un souvenir, nous avons également utilisé la technique de l'indicateur de calcium codé génétiquement. Elle consiste à injecter à l'animal une molécule qui devient fluorescente en présence de calcium: or un neurone qui s'active absorbe le calcium présent dans le milieu extracellulaire... et devient donc visible au microscope.

Nous nous sommes concentrés sur la région CA1 de l'hippocampe en raison de son rôle dans l'apprentissage et la mémorisation des lieux. Les souris coiffées de leurs miniscopes ont été placées dans les cages imaginées par Denise Cai: nous voulions savoir si l'intervalle de temps entre les placements dans les deux cages déterminait quels neurones étaient activés.

Les résultats ont dépassé nos espérances. Lorsque les souris reliaient les souvenirs des deux cages, de nombreux neurones de l'aire CA1 qui étaient actifs quand les animaux se trouvaient dans la première cage l'étaient aussi quand ils exploraient la seconde. Si l'intervalle entre les deux visites était de cinq heures, les souris formaient deux souvenirs dans un ensemble similaire de neurones. Si on laissait s'écouler une semaine entre les visites des deux cages, les souvenirs activaient deux ensembles de neurones disjoints.

Ainsi, les souvenirs s'associent quand ils sont stockés dans des ensembles de neurones qui se recouvrent au moins en partie. Si vous réactivez un ensemble de neurones codant un premier souvenir, celui-ci stimule l'autre ensemble et facilite le rappel du second souvenir.

Pour valider plus solidement encore ces résultats, Denise Cai s'est tournée vers la technique système TetTag (pour *tetracycline tag*). Elle permet de marquer les neurones activés dans le cerveau d'une souris quand elle forme le souvenir d'une cage où elle est placée, à l'aide d'une sonde fluorescente qui reste ensuite active pendant des semaines.

Deux souvenirs formés à peu de temps d'intervalle ont plus de chances d'être liés

Grâce à des études *post mortem* sur les animaux, on compare alors les neurones activés récemment – repérables grâce à l'activité des gènes exprimés immédiatement après la formation du souvenir – avec ceux signalés par le marqueur à longue durée. Cette étape identifie non seulement les neurones activés par un événement (les cellules ne présentent qu'un seul marqueur fluorescent), mais aussi ceux qui sont sollicités par deux événements distincts (deux marqueurs différents sont visibles au microscope).

UNE COMPETITION ENTRE NEURONES

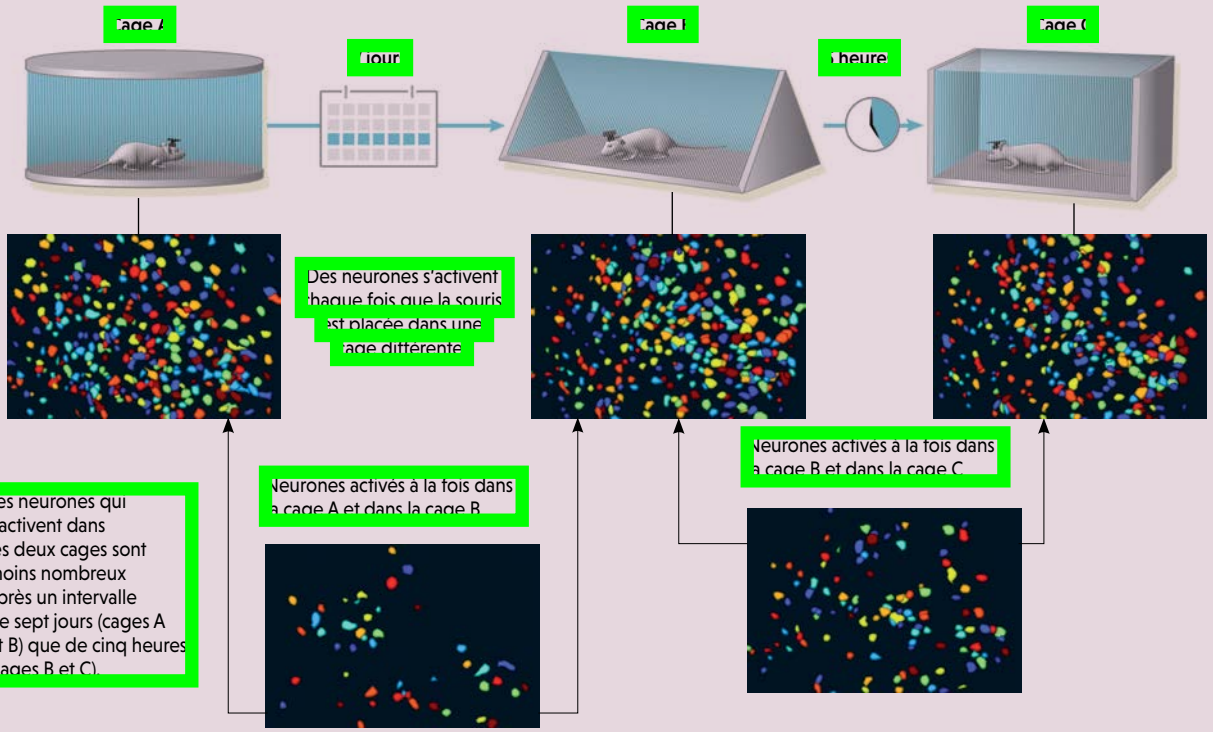
En utilisant le même montage expérimental que précédemment, Denise Cai et son équipe ont montré que pendant un court intervalle de cinq heures, le recouvrement entre les neurones qui codent chacun des deux souvenirs – les neurones avec deux marqueurs – était nettement plus important que si les deux souvenirs avaient mis en œuvre des assemblées aléatoires de neurones. En revanche, si les deux événements mémorisés étaient séparés d'une semaine, le recouvrement ne dépassait pas la répartition aléatoire.

L'équipe de Sheena Josselyn à Toronto a apporté des preuves supplémentaires de notre hypothèse d'allocation de lien, et notamment de nouveaux indices comportementaux. Cette fois, les souris étaient entraînées à distinguer deux >

UNE MADELEINE DANS LE CERVEAU

L'instant « proustien » – quand un souvenir en appelle un autre – a désormais une base cérébrale ! Des expériences ont révélé qu'une souris placée dans i elle les a explorées à moins de cinq heures d'intervalle. lle n'associe pas, en revanche, les souvenirs des cages A t B, où elle a été placée à une semaine d'intervalle.

L'association mnésique des cages B et C se produit parce que es souvenirs de ces deux endroits se sont enregistrés dans des ensembles de neurones qui se recouvrent (contrairement ux souvenirs des cages A et B). Ainsi, quand la souris est eplacée dans la cage B, le rappel de son souvenir réactive ombre de neurones communs aux souvenirs des deux ages, ce qui ravive le souvenir de la cage C.



sons différents, chacun associé à un choc électrique, les deux événements se produisant à divers intervalles de temps. Lorsque six heures ou moins séparaient les deux événements, les souris s'immobilisaient ensuite plus longtemps à l'écoute du second son (sans électrochoc), signe que le souvenir associé à ce son était renforcé. Au-delà de six heures, ce n'était plus le cas.

Ils ont par ailleurs montré que lors du premier stimulus, dans l'amygdale latérale (une région importante dans le conditionnement de la peur), la proportion de neurones où la protéine CREB était activée augmentait pendant les six premières heures, puis redevenait normale dans les heures suivantes. En jouant sur l'excitabilité de ces neurones par optogénétique, les chercheurs ont alors révélé qu'un phénomène de compétition détermine à quels neurones sont assignés deux souvenirs. Ils en proposent le scénario suivant: le premier événement augmente l'excitabilité d'un groupe de neurones – le lieu de son souvenir – en y augmentant l'activité de CREB. Si le deuxième événement a lieu dans les six heures suivantes, l'activité accrue de CREB favorise l'ancrage du second souvenir dans un groupe de neurones qui recouvre partiellement le premier, ce qui renforce le second souvenir. Au-delà de six heures, en revanche, tous les neurones ont *a priori* la même chance d'accueillir le deuxième souvenir, sans recouvrement.

SOUVENIRS SEPARES AU LASER

Récemment, Kaoru Inokuchi et ses collègues de l'université de Toyama, au Japon, ont poussé cette analyse un cran plus loin. Grâce à l'optogénétique, ils ont inactivé, par de la lumière laser, le groupe de neurones partagés par deux souvenirs émotionnels distincts sans altérer l'activité des autres neurones, dont ceux propres et uniques à chacun des deux souvenirs. Ce faisant, ils abolissaient le lien entre les deux souvenirs, sans perturber le rappel de chaque souvenir individuel. Cette expérience élégante a fourni la preuve que les neurones partagés par deux souvenirs constituent le liant de notre mémoire.

Nous avons ensuite étudié les liens entre souvenirs chez des souris plus âgées. Comparées aux jeunes, celles-ci produisent moins de protéines CREB dans leur cerveau, y compris dans les neurones de l'aire CA1 de l'hippocampe. Il en résulte une moindre excitabilité, ce qui nous a amenés à prédire que les souris âgées devraient plus difficilement lier différents souvenirs. Denise Cai et ses collègues ont donc entrepris de répéter sur les animaux âgés une grande partie des expériences mises au point pour des souris jeunes.

Pour quels résultats? Les souris âgées, bien que se rappelant chaque cage, associaient difficilement les souvenirs de l'une et de l'autre, et ce même quand elles les avaient visitées à cinq heures d'intervalle. Et les images obtenues par miniscope montraient un faible recouvrement des ensembles de neurones associés aux deux souvenirs... Les neurones des souris âgées, produisant de faibles quantités de protéine CREB, ne liaient pas les souvenirs avec la même efficacité que les plus jeunes.

CHEZ LES SOURIS ÂGÉES, LES SOUVENIRS SONT MOINS LIÉS, CAR LES RÉSEAUX DE NEURONES QUI LES STOCKENT SE RECOUVRENT MOINS. MAIS ON PEUT RESTAURER CE LIEN

RÉACTIVER LES LIENS

Dès lors, était-il possible d'augmenter artificiellement l'excitabilité d'un ensemble de neurones de l'aire CA1 juste au moment où les souris âgées exploraient les deux cages, de façon à réactiver dans la seconde certains des neurones sollicités dans la première? Pour le savoir, nous avons mis en œuvre une technique d'un genre nouveau (nommée Dreadd) qui permet de munir un neurone de récepteurs sensibles à certaines molécules. Ainsi, en diffusant ces molécules aux alentours du neurone, on provoque son activation à volonté.

L'essentiel à retenir est ceci: en injectant les molécules activatrices à l'animal aux moments souhaités, à savoir quand la souris pénètre dans la première cage, puis quand elle entre dans la seconde, on active à chaque fois le même groupe de neurones: ceux que l'on a modifiés dans l'aire CA1 de l'hippocampe pour porter les récepteurs. Et l'on crée ainsi un lien artificiel entre les souvenirs de ces deux instants.

Une multitude de causes pouvaient faire échouer une telle expérience. Par exemple, les souvenirs de lieux mettent en jeu des millions de neurones disséminés à travers diverses aires cérébrales interconnectées, et pas seulement la région CA1. Le vieillissement pouvait avoir affecté les mécanismes d'association de souvenirs dans un grand nombre de ces aires.

Pourtant, l'expérience a fonctionné. En restaurant une meilleure excitabilité neuronale dans un sous-ensemble précis de l'aire CA1 chez les souris âgées, nous avons réussi à allouer les deux souvenirs de cages en grande partie à un même groupe de neurones de cette zone, ce qui a restauré l'association des souvenirs.

D'autres études en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, tant chez des rongeurs que chez l'humain, ont par ailleurs précisé la façon dont les souvenirs s'interconnectent dans le cerveau. Notamment, Howard Eichenbaum, de l'université de Boston, et ses collègues ont montré chez le rat que l'organisation des souvenirs est très structurée, leurs éléments communs étant codés de façon similaire d'une expérience à l'autre. Alison Preston, de l'université du Texas, à Austin, et ses collègues ont quant à eux observé chez l'humain que la réactivation d'un souvenir peut influencer la façon dont un nouveau souvenir sera encodé.

L'arsenal croissant des outils disponibles pour mesurer et contrôler l'activité neuronale commence à révéler les mécanismes que notre cerveau utilise pour organiser l'information. À présent, notre équipe tente de prolonger ce travail dans de nouvelles directions. En collaboration avec la neurobiologiste et bio-informaticienne Panayiota Poirazi, de l'Institut de biologie moléculaire et de biotechnologie de la Foundation for research and technology – Hellas, en Grèce, nous construisons des modèles informatiques pour simuler comment et quand les souvenirs se lient. Nous essayons aussi de comprendre les mécanismes qui contrôlent l'intervalle de temps nécessaire pour que deux souvenirs s'associent dans telle ou telle région du cerveau.

Peut-être la compréhension de ces phénomènes nous aidera-t-elle un jour à mettre au point des traitements pour les troubles de la mémoire observés dans des maladies comme la dépression, le déclin cognitif lié à l'âge, la schizophrénie ou le trouble bipolaire. Une chose est sûre: les recherches sur la formation des souvenirs sont désormais moins bridées par l'éventail des techniques disponibles que par les limites de notre imagination. Et l'on se souviendra encore longtemps du regard d'un enfant qui observait l'envol d'un groupe de canards au milieu des roseaux... ■

BIBLIOGRAPHIE

L. CARACCIOLO, CREB controls cortical circuit plasticity and functional recovery after stroke, *Nat. Commun.*, vol. 9(1), 2250, 2018

A. SILVA, Miniaturized two-photon microscope: Seeing clearer and deeper into the brain, *Light Sci. Appl.*, vol. 6(8), e17104, 2017.

D. CAI *ET AL.*, A shared neural ensemble links distinct contextual memories encoded close in time, *Nature*, vol. 534, pp. 115-118, 2016.

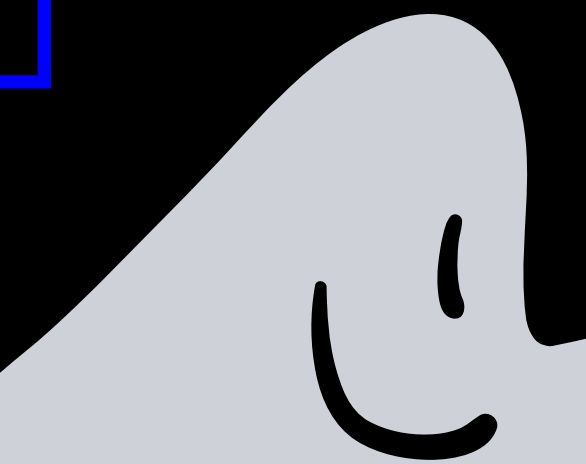
A. J. RASHID *ET AL.*, Competition between engrams influences fear memory formation and recall, *Science*, vol. 353, pp. 383-387, 2016.

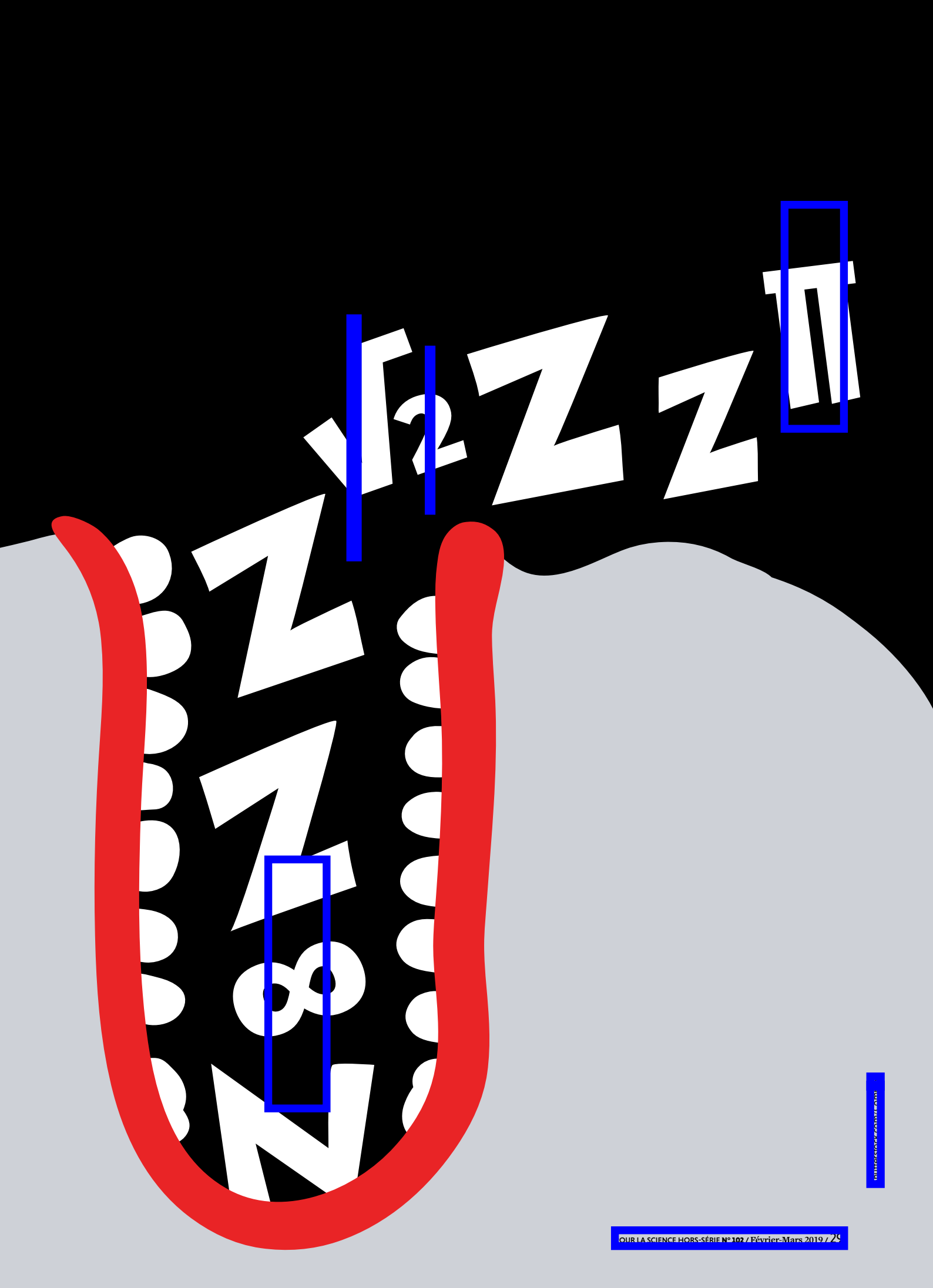
M. L. SCHLICHTING ET A. R. PRESTON, Memory integration: Neural mechanisms and implications for behavior, *Current Opinion in Behavioral Sciences*, vol. 1, pp. 1-8, 2015.

Dormir pour mieux se souvenir

Apprendre en dormant ? Nous le faisons tous lorsque nos souvenirs refont surface au plus profond de notre sommeil, s'ancrant ainsi dans notre mémoire. En explorant les rouages de ce mécanisme, on améliorerait cet apprentissage.

Par Ken Paller et Delphine Oudiette




Zzzz
78

INCROYABLE PLASTICITÉ

L'ESSENTIEL

- On a longtemps pensé que durant le sommeil, le cerveau était éteint et incapable d'apprendre.
- Mais ces dernières décennies, on s'est aperçu qu'il reste actif lorsque l'on dort et que des souvenirs récents sont réactivés.
- En contrôlant cette réactivation de la mémoire, des neuroscientifiques ont montré que l'apprentissage est meilleur quand les souvenirs sont réactivés durant une phase précise du sommeil profond.
- Leur méthode pourrait aider à réduire les dépendances et accélérer le rétablissement après un accident vasculaire cérébral.

LES AUTEURS

KEN PALLER
professeur de psychologie et directeur du programme de neurosciences cognitives de l'université Northwestern, aux États-Unis.

DELPHINE OUDIETTE
chargée de recherche à l'Inserm, à l'Institut du cerveau et de la moelle épinière, à Paris.

Dans *Le Meilleur des mondes,* d'Aldous Huxley, **un garçon mémorise chaque mot d'une conférence en anglais, langue qu'il ne connaît pas.** L'apprentissage survient alors que le garçon dort près d'une radio qui retransmet la conférence. Au réveil, l'enfant est capable de la réciter en entier. S'appuyant sur cette découverte, les autorités totalitaires du monde dystopique de Huxley adaptent la méthode pour façonner l'inconscient de tous les citoyens.

Tout le monde sait que nous apprenons mieux quand nous sommes bien reposés. La plupart des gens, en revanche, pensent *a priori* qu'il est impossible d'apprendre en dormant. Pourtant, de nouvelles découvertes suggèrent que les choses ne sont pas aussi simples. Elles montrent qu'une partie essentielle de l'apprentissage se produit pendant le sommeil: des souvenirs récemment formés refont surface pendant la nuit, et cette relecture aide à les renforcer, voire à en mémoriser certains de façon définitive. Et si aujourd'hui, le scénario imaginé par Huxley en 1932 reste une fiction, des expériences indiquent qu'il est possible de manipuler les souvenirs d'un individu plongé dans un profond sommeil, posant les bases d'une nouvelle science de l'apprentissage.

Pour que de telles manipulations fonctionnent, il s'agit avant tout d'explorer comment un individu peut absorber une information à un moment où sa conscience semble au repos. À l'époque où Huxley écrivait son roman, de sérieuses recherches sur la possibilité d'intervenir durant le sommeil avaient commencé. En 1927, le New-Yorkais Alois Saliger avait inventé une «machine à suggestion automatique à départ différé», commercialisée sous le nom de PsychoPhone, capable de réémettre pendant la nuit un message enregistré. Puis, dans les années 1930-1940, diverses études ont fourni de prétendus exemples d'apprentissage durant le sommeil.

L'EXPERIENCE DOUTEUSE DES ONGLES RONGÉS

Dans un article publié en 1942, notamment, Lawrence LeShan, alors au Collège de William et Mary, aux États-Unis, décrivit une expérience qu'il avait menée dans un camp d'été où nombre de garçons se rongeaient les ongles. Dans une pièce où dormaient vingt garçons, LeShan avait utilisé un phonographe portable qui répétait la phrase «Mes ongles ont un goût terriblement amer». Trois cents fois par nuit, 150 minutes après le début de l'endormissement, le phonographe avait émis la séquence de mots, et ce pendant 54 nuits consécutives (même durant les deux dernières semaines où, le phonographe étant tombé en panne, l'intrépide LeShan avait lui-même prononcé la phrase). Huit des vingt garçons ont cessé de se ronger les ongles, alors qu'aucun parmi vingt autres qui dormaient sans être exposés à l'enregistrement n'avait changé son comportement. Ce résultat reste toutefois suspect, car le chercheur n'avait utilisé aucun dispositif de surveillance physiologique pour vérifier que les garçons étaient réellement endormis quand le phonographe était utilisé.

De fait, le champ de recherche subit un revirement brutal en 1956, lorsque deux scientifiques de la Rand Corporation recoururent à l'électroencéphalographie pour enregistrer l'activité cérébrale des participants à une étude où on leur lisait 96 questions et réponses pendant leur sommeil. (Un exemple : « Dans quel type de magasin Ulysses Grant travaillait-il avant la guerre ? » Réponse : « Une quincaillerie ».) Le lendemain, les participants ne se souvenaient des réponses que lorsque celles-ci leur avaient été lues à des moments où l'électroencéphalogramme montrait des signes de réveil. En d'autres termes, les participants semblaient n'avoir appris que lorsqu'ils ne dormaient pas vraiment au moment où l'information leur était présentée. Ce résultat porta un coup dur au domaine, les chercheurs commençant à douter de la viabilité de l'apprentissage durant le sommeil.

Pendant cinquante ans, de nombreux scientifiques évitèrent le sujet. Néanmoins, d'autres s'intéressèrent plus généralement à la possibilité que le sommeil joue un rôle bénéfique dans la mémoire. Un protocole d'étude typique consistait à déterminer si la privation de sommeil durant la nuit perturbait la mémorisation d'une information apprise la veille. Un autre testait si la mémorisation était meilleure après un sommeil ou après une période identique de veille.

PARADOXAL OU PROFOND ?

Divers facteurs sont susceptibles d'interférer dans de telles études. Par exemple, le stress lié au manque de sommeil peut nuire aux fonctions cognitives, lesquelles diminuent ensuite les performances de la mémoire. Conscients de la difficulté, des chercheurs en neurosciences cognitives ont commencé à relever le défi en rassemblant les données issues de plusieurs méthodes de recherche. Peu à peu, des preuves se sont ainsi accumulées en faveur de l'idée que le sommeil était un moyen de raviver les souvenirs acquis la veille. Le lien entre sommeil et mémoire redevint un domaine de recherche légitime.

Au début, nombre de chercheurs se concentrèrent sur les périodes de mouvements oculaires rapides, ou sommeil paradoxal, la période durant laquelle les rêves sont les plus fréquents et les plus saisissants. L'hypothèse de départ était que le traitement des souvenirs durant la nuit était lié au rêve, mais peu de données la confirmèrent. En 1983, deux biologistes britanniques de renom, Graeme Mitchison et Francis Crick, spéculèrent même que le sommeil paradoxal servait à oublier. Dans le même esprit, au début des années 2000, Giulio Tononi et Chiara Cirelli, tous deux à l'université du Wisconsin à Madison, proposèrent que le sommeil était un moment où les connexions entre les cellules du cerveau faiblissaient, laissant la place aux nouvelles informations acquises le lendemain.

Progressivement, les scientifiques s'intéressèrent à une autre période de sommeil dépourvue de mouvements oculaires rapides, le sommeil lent profond. En 2007, Björn Rasch, alors à l'université de Lübeck, en Allemagne, organisa avec ses collègues une expérience où les participants devaient mémoriser l'emplacement d'un ensemble d'objets tout en sentant une odeur de rose. Plus tard, dans leur lit au laboratoire, les participants étaient de nouveau exposés à la même odeur à différents stades de leur sommeil, confirmés par électroencéphalographie. L'odeur active l'hippocampe, une zone cérébrale essentielle pour apprendre à naviguer dans son environnement et pour stocker les nouvelles connaissances acquises. Au réveil, les participants se rappelaient plus précisément les emplacements – mais uniquement si l'odeur leur avait été présentée durant le sommeil lent profond (et non pendant le sommeil paradoxal).

En 2009, notre laboratoire a étendu cette méthodologie en utilisant des sons plutôt que des odeurs. Nous avons constaté que les sons joués pendant le sommeil lent profond améliioraient la mémorisation de la localisation d'objets individualisés (au lieu de tout un ensemble d'objets, comme dans l'étude avec les odeurs). Dans notre procédure, appelée réactivation mnésique ciblée ou TMR pour *targeted memory reactivation*, les volontaires commençaient par mémoriser les emplacements de cinquante objets. Ils apprenaient par exemple à placer un chat à un endroit désigné sur un écran d'ordinateur et une théière à un autre. Simultanément, ils entendaient un son correspondant (un miaulement pour le chat, un sifflement pour la théière…). Après cette phase d'apprentissage, les participants faisaient une sieste dans un endroit confortable de notre laboratoire. À l'aide d'électrodes placées sur leur tête, nous surveillions leur activité cérébrale afin de vérifier que chacun dormait bien. De fait, nous ciblions un moment, particulièrement important pour la réactivation de la mémoire, où l'activité des réseaux de neurones du cortex cérébral, la couche supérieure du cerveau, était synchronisée (*voir l'encadré page 32*).

Lorsque nous détections le sommeil lent profond, nous diffusions le miaulement, le sifflement et d'autres sons associés à un sous-ensemble d'objets de la phase d'apprentissage. Les sons étaient joués doucement, pas plus fort

UNE SYMPHONIE COMPLEXE D'ACTIVITÉS NEURONALES RÉGIT LA CONNEXION ENTRE SOMMEIL ET MÉMOIRE

LES CHEFS D'ORCHESTRE DU SOMMEIL

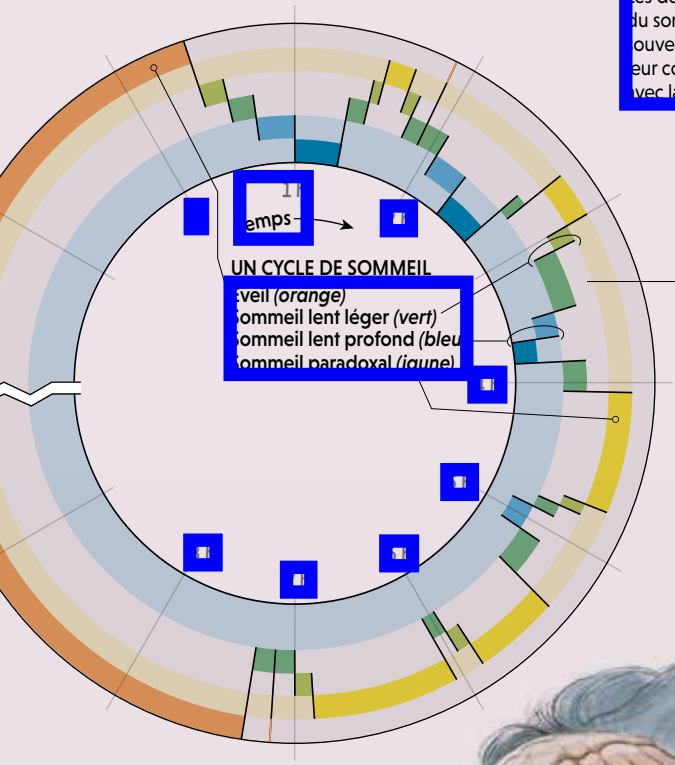
Les rythmes cérébraux fournissent des indices sur la façon dont le sommeil aide à stocker des souvenirs. Leur étude révèle qu'une symphonie complexe

et mémoire. Un type de signal neuronal, nommé ondes entes ou ondes delta, comptant de 0,5 à 4 oscillations par seconde, orchestre l'activité des neurones dans e cortex cérébral. Chaque onde lente comporte une phase descendante, durant laquelle les neurones ont silencieux, et une phase montante, pendant laquelle ls reprennent leur activité. Ce schéma temporel aide renforcer les souvenirs récemment formés en garantissant que plusieurs régions corticales restent ctives simultanément.

La phase ascendante coïncide souvent avec des fuseaux de sommeil, de brèves accélérations de 12 à 15 oscillations par seconde pendant 0,5 à 2 secondes. Les fuseaux proviennent du thalamus, une région du cerveau qui sert de carrefour aux informations, les transmettant potentiellement à toutes les parties du cortex cérébral.

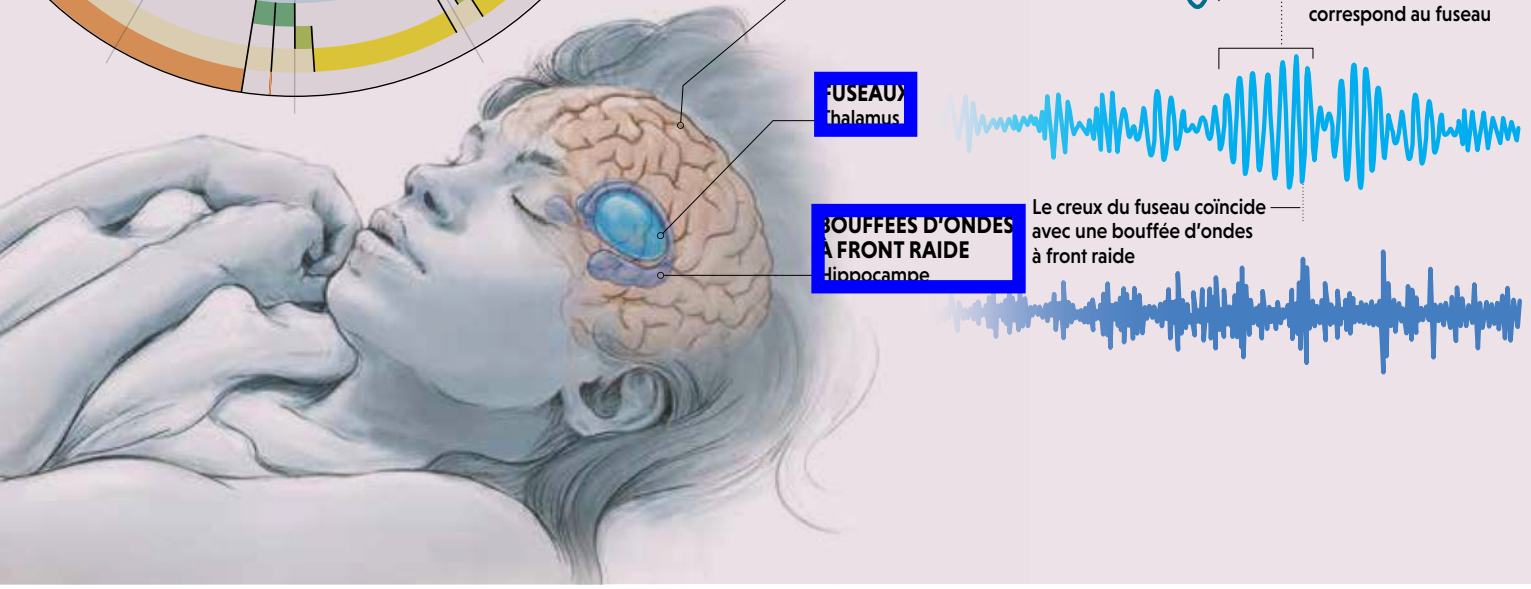
UNE SYMPHONIE EN DEUX MOUVEMENTS

Les deux phases clés du sommeil présentent des différences considérables. Les ondes lentes du sommeil lent profond dominent la première partie de la nuit. Pendant cette période, certains souvenirs se réactivent spontanément. Les interventions qui renforcent ce processus favorisent leur conservation. Le sommeil paradoxal domine la dernière partie de la nuit, mais son lien avec la mémoire reste controversé.



DES ONDES CÉRÉBRALES HARMONISÉES

Les oscillations du cerveau pendant le sommeil semblent jouer un rôle dans le renforcement des nouveaux souvenirs. Un événement clé est la phase montante d'une oscillation lente dans le cortex qui coordonne l'activité d'autres rythmes cérébraux. La partie ascendante de l'oscillation se synchronise avec des fuseaux de sommeil dans le thalamus. Les fuseaux se coordonnent ensuite avec des bouffées d'ondes à haute fréquence localisées dans l'hippocampe. Ces bouffées ont elles-mêmes tendance à coïncider avec le creux d'un fuseau.



ls surviennent à leur propre rythme, environ outes les 5 secondes et coordonnent l'activité de bouffées d'ondes de haute fréquence 150 à 200 hertz) nommées ondes à front raide. Localisées dans l'hippocampe, ces oscillations coïncident avec la réactivation neuronale des souvenirs. Pendant tout ce temps, les ondes entes continuent de jouer le rôle de chef d'orchestre : leurs oscillations mesurées dans e cortex coordonnent le rythme des fuseaux du ommeil et des bouffées d'ondes à front raide.

a réorganisation des souvenirs pendant e sommeil permet d'en extraire 'information essentielle

Le couplage étroit de ces oscillations ous-tend non seulement la réactivation des souvenirs, mais aussi la réorganisation des connexions entre neurones inhérente à leur enforcement. Un dialogue entre l'hippocampe et le cortex impliquant tous ces rythmes érébraux déclenche un ensemble complexe d'interactions au sein du réseau neuronal. Grâce à ce processus dit de consolidation, de nouvelles nformations sont intégrées aux côtés des souvenirs existants. La réorganisation des souvenirs pendant le sommeil permet aussi de dégager des points communs et d'en extraire 'information essentielle, précieuse pour nticiper de nouvelles situations.

Des problèmes de mémoire apparaissent orsque ce dialogue neuronal est altéré. Les personnes souffrant de lésions importantes de l'hippocampe ou de certaines parties du thalamus sont susceptibles de développer une amnésie profonde. Sans les interactions ttendues avec ces régions du cerveau, le cortex ne peut pas stocker les faits ou événements enregistrés durant la journée – c'est-à-dire ce que l'on nomme la mémoire déclarative. Par ailleurs, une forme plus légère de trouble de la mémoire pourrait survenir lorsque le traitement des souvenirs durant le sommeil est perturbé.

La compréhension de la symphonie physiologique du cerveau endormi progresse oujours. Avec elle, de nouvelles stratégies pour utter contre ces troubles consisteront peut-être à renforcer les rythmes naturels du cerveau à l'aide de diverses formes de stimulation électrique ou sensorielle. Après tout, ce ne serait pas très étonnant. Les humains ne se sont-ils pas oujours appuyés sur le rythme de berceuses pour endormir leurs petits ?

K. P. ET D. O.

que le bruit de fond, de sorte que les participants ne se réveillaient pas. Au réveil, ils se souvenaient mieux des positions des objets signalés durant le sommeil que de celles des objets pour lesquels aucun son n'avait été rejoué durant leur sommeil. Quel que soit l'indice sensoriel utilisé – sons ou odeurs –, il avait manifestement déclenché la réactivation de la mémoire spatiale et ainsi diminué l'oubli.

Au début, nos procédures étaient très controversées. Les spécialistes du sommeil pensaient généralement que les circuits sensoriels dans le cortex étaient en grande partie désactivés lorsque l'on dormait, à l'exception de ceux de l'odorat. Nous avons néanmoins continué à suivre notre intuition. Et de fait, de nombreuses études ultérieures ont montré les mêmes bénéfices sur la mémoire. Une technique nommée imagerie par résonance magnétique fonctionnelle a mis en évidence les zones cérébrales participant à la TMR, et l'électroencéphalographie a révélé l'importance de certaines oscillations cérébrales dans la mémorisation. Notamment, deux études publiées en 2018, l'une de Scott Cairney, de l'université de York, en Angleterre, et ses collègues, l'autre de James Antony, de l'université de Princeton, aux États-Unis, et ses collègues ont associé une oscillation, le «fuseau de sommeil», aux bénéfices mnésiques de la TMR.

PIANO ET GRAMMAIRE

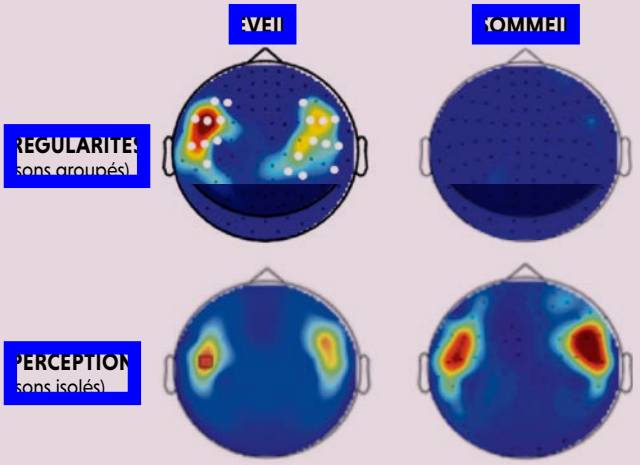
Outre la mémoire spatiale, la TMR a contribué à renforcer la mémoire dans d'autres contextes, comme la maîtrise d'une mélodie au piano et la mémorisation d'un nouveau vocabulaire ou de règles grammaticales. Cette technique facilite aussi l'assimilation de modifications dans la perception de son propre corps. La TMR est par ailleurs capable d'atténuer des réflexes conditionnés de peur : dans des expériences sur des volontaires qui avaient été conditionnés à réagir automatiquement à un stimulus (par association préalable de ce stimulus avec un choc électrique), la réponse émotionnelle des participants au stimulus était diminuée. Des études en cours examinent encore d'autres types de mémorisation, tels que l'association de noms à des visages lors de la première rencontre avec de nouvelles personnes.

À mesure que la technique évolue, la TMR devrait être testée pour aider à traiter divers troubles, à réduire les dépendances ou à accélérer le rétablissement après une maladie. Notre laboratoire, en collaboration avec le neurologue Marc Slutzky, de l'université Northwestern, aux États-Unis, met actuellement à l'essai une nouvelle procédure de rééducation pour récupérer les capacités motrices des bras après un accident vasculaire cérébral. Des sons font partie de la thérapie et sont rejoués pendant le sommeil pour tenter d'accélérer le réapprentissage des mouvements perdus. Les perspectives semblent prometteuses, car la TMR peut modifier des formes similaires d'apprentissage moteur chez des individus en bonne santé.

Il est donc possible de renforcer les souvenirs. Pourra-t-on aussi charger de nouvelles informations dans le cerveau d'une personne endormie – au risque de raviver le spectre éthique du contrôle de l'esprit invoqué par Huxley ? Plusieurs travaux d'Anat Arzi, actuellement à l'université de Cambridge, et ses collègues ont montré qu'il est possible de créer des souvenirs relativement simples en utilisant des odeurs. Dans une expérience publiée en 2014, les chercheurs ont réduit le désir de tabac chez des fumeurs qui souhaitaient arrêter de

MÉMOIRE ET SOMMEIL : DES LIENS MULTIPLES

Réactiver des apprentissages de façon ciblée durant le sommeil à l'aide de sons associés au préalable à ces apprentissages, comme Delphine Oudiette et Ken Paller l'ont fait dans leurs travaux, est une chose. L'hypnopédie en est une autre. Cette méthode consiste à créer directement des associations nouvelles pendant le sommeil (une odeur désagréable mêlée à celle du tabac, par exemple), associations qui influencent ensuite le comportement une fois éveillé (des fumeurs soumis à cette association ont réduit leur consommation de cigarettes, comme l'ont montré en 2014 Anat Arzi, de l'université de Cambridge, et ses collègues). Ces deux voies ont chacune apporté des informations nouvelles sur les mécanismes de consolidation de nouveaux apprentissages au cours du sommeil. La réactivation mnésique ciblée (TMR) a ainsi amplement contribué à montrer que des bouffées d'activité neuronale nommées fuseaux de sommeil jouent un rôle important dans la consolidation de la mémoire dite déclarative, en conjonction avec d'autres marqueurs neurophysiologiques du sommeil à ondes lentes (*voir l'encadré page 32*). Quand, au cours du sommeil lent, on présente à un participant un son lié à un apprentissage préalable, son activité cérébrale augmente dans la bande de fréquence 12-15 hertz (qui correspond



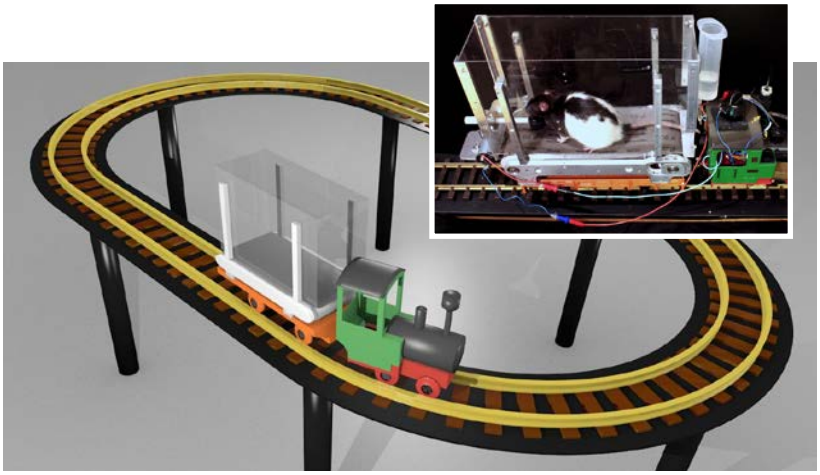
Notre cerveau détecte des régularités sonores à l'état d'éveil *(en haut à gauche, les régions cérébrales activées, vues par magnétoencéphalographie)*, mais pas au cours du sommeil lent profond *(en haut à droite)*, alors que, tant à l'éveil qu'en sommeil, il perçoit des sons isolés *(en bas)*.

aux fuseaux de sommeil), et il se souvient mieux des mots associés le lendemain. Toutefois, notre équipe et d'autres ont montré que si l'on présente une seconde stimulation auditive rapidement (moins de 1,4 seconde) après la première, alors l'activité liée aux fuseaux est abolie et le bénéfice de la présentation de l'indice est perdu. Ces résultats suggèrent que le fuseau de sommeil est un élément important pour la propagation de l'information et son transfert de l'hippocampe vers le cortex. Ils montrent aussi que le succès des procédures de TMR dépend des paramètres utilisés pour présenter les stimulations au cours du sommeil.

Depuis les travaux d'Anat Arzi, plusieurs études sur l'hypnopédie ont par ailleurs confirmé que notre cerveau garde la capacité résiduelle de traiter des stimulations externes au cours du sommeil. Toutefois, des travaux récents ont aussi montré qu'il est impossible de créer des associations plus complexes au cours du sommeil. Notre équipe a ainsi observé, en suivant l'activité cérébrale de participants pendant le sommeil, que leur cerveau ne détectait pas les régularités d'un flux sonore, alors qu'il les détecte à l'éveil, même si le participant n'en est pas conscient. Nos capacités d'apprentissage au cours du sommeil restent donc limitées à des associations élémentaires. Il est possible que cette limitation soit liée au besoin du cerveau endormi d'être protégé de l'environnement pour lancer les processus de récupération qui nous permettent d'être efficients au réveil. Le traitement élaboré d'informations présentées lors du sommeil entrerait en conflit avec les mécanismes qui sous-tendent la consolidation mnésique. Rien ne dit, d'ailleurs, que les processus de consolidation liés à des stimulations externes dépendent des mêmes réseaux neuronaux que ceux mis en place lors de la consolidation spontanée durant le sommeil. Par exemple, on sait depuis plus de dix ans que la concentration d'un neurotransmetteur, l'acétylcholine, diminue dans le cerveau pendant le sommeil lent, et que sans cette diminution, le cerveau n'est pas capable de consolider de nouveaux apprentissages en mémoire déclarative. Or, en janvier 2018, Jens Klinzing, de l'université de Tübingen, et ses collègues ont montré que la TMR renforçait la mémoire de participants même lorsque l'on maintenait élevée la concentration d'acétylcholine pendant le sommeil lent. Cela suggère qu'au moins deux stratégies cérébrales distinctes mènent à la consolidation de nouveaux souvenirs, et que TMR, hypnopédie et consolidation spontanée durant le sommeil ne doivent pas être confondues.

Enfin, n'oublions pas que notre sommeil prend place dans un environnement protégé. Quels effets l'application systématique de stimulations aurait-elle sur les autres fonctions essentielles qu'il assure, en particulier notre équilibre biologique et la restauration de nos capacités de vigilance ?

PHILIPPE PEIGNEUX
UNITÉ DE NEUROPSYCHOLOGIE ET NEUROIMAGERIE FONCTIONNELLE, UNIVERSITÉ LIBRE DE BRUXELLES



Des rats placés dans un wagon doté d'un tapis roulant sont transportés par un train électrique (la locomotive est placée à l'arrière du wagon pour ne pas masquer le champ de vision). Selon que le tapis fonctionne ou non, les neurones de lieu, dans l'hippocampe, ne sont pas activés de la même façon. Avec un tel dispositif, on comprend mieux les mécanismes de la consolidation du souvenir d'un déplacement.

fumer. Une fois endormis, les participants ont été exposés à deux odeurs : la fumée de cigarette et du poisson pourri. Au cours de la semaine suivante, ceux qui avaient senti la succession des deux odeurs allumaient 30 % moins de cigarettes : ils avaient apparemment été conditionnés à associer l'odeur répulsive de poisson au tabac.

Acquérir des souvenirs plus complexes pourrait aussi devenir réalité. Karim Benchenane, de l'ESPCI, à Paris, et ses collègues ont montré en 2015 comment créer un faux souvenir chez la souris. L'équipe savait que lorsqu'une souris explore un nouvel environnement, des neurones, nommés cellules de lieu, s'activent au moment où l'animal traverse des parties spécifiques d'un enclos. Ces mêmes neurones s'activent de nouveau pendant le sommeil lorsque le souvenir semble rejoué. Les chercheurs ont stimulé le circuit de la récompense des souris (des aires cérébrales associées à la sensation de plaisir) au moment même où des cellules de lieu étaient spontanément actives pendant leur sommeil. Étonnamment, les souris ont ensuite passé plus de temps aux emplacements correspondant aux cellules de lieu associées au stimulus, s'y dirigeant immédiatement après leur réveil. D'autres expériences sont cependant nécessaires pour déterminer si de faux souvenirs ont bien été implantés chez les souris pendant leur sommeil ou si les rongeurs ont en fait été guidés par un processus de conditionnement.

DES RATS DANS UN TRAIN

Des travaux récents menés également sur les cellules de lieu ont précisé les mécanismes du renforcement de la mémoire pendant le sommeil. Lors d'un déplacement, ces cellules de lieu s'activent séquentiellement, « inscrivant » ainsi le mouvement dans l'hippocampe. En même temps, l'hippocampe émet des séquences bien plus rapides, « enchevêtrées ». Lesquelles de ces séquences permettent-elles la réactivation pendant le sommeil au moment de consolider le souvenir du déplacement ?

Pour répondre, Michaël Zugaro et ses collègues du Centre interdisciplinaire de recherche en biologie (CNRS/Inserm/Collège de France/université PSL) ont placé des rats… dans le wagon d'un train électrique muni d'un tapis roulant (*voir la figure ci-contre*).

Quand le train circule, mais que le tapis est inactif (le déplacement est passif), seules les séquences lentes s'activent. Ce qui n'est pas le cas lorsque le tapis fonctionne : les deux types de séquences sont activés. En observant l'hippocampe des rongeurs durant leur sommeil, les biologistes ont retrouvé les séquences d'activation correspondant au déplacement uniquement dans le cas où le tapis avait été actionné. Ils en déduisent que les séquences enchevêtrées sont indispensables à la formation des souvenirs.

Les limites du possible restent à explorer, mais ces recherches ont établi qu'une composante normale de l'apprentissage se poursuit la nuit lorsque le cerveau est déconnecté. Le sommeil est nécessaire non seulement pour rester alerte et se ressourcer, mais aussi pour renforcer les souvenirs acquis lors de l'éveil. Nous avons encore beaucoup à apprendre sur le fonctionnement de la mémoire : en quoi le sommeil facilite-t-il l'apprentissage ? Quels mécanismes préservent les souvenirs ? Il est aussi essentiel d'en apprendre plus sur les dangers d'un sommeil insuffisant ou inadéquat, qu'il soit dû au stress de la vie, à diverses maladies ou au vieillissement.

Une étude menée en 2012 par Carmen Westerberg, alors dans notre laboratoire, montre la voie. Carmen Westerberg a effectué des tests sur des patients présentant des problèmes de mémoire qui précèdent souvent la maladie d'Alzheimer. Elle a ainsi mis en évidence une corrélation entre un sommeil de mauvaise qualité et une capacité réduite à se souvenir d'informations après un délai d'une nuit.

Toutes ces connaissances conduiront peut-être à des programmes d'apprentissage durant le sommeil visant à préserver les souvenirs, à accélérer l'acquisition de nouvelles connaissances et compétences, voire à modifier les mauvaises habitudes telles que le tabagisme. À plus long terme, les scientifiques pourraient aussi examiner s'il est possible de prendre le contrôle des rêves. Un nouveau monde s'ouvrirait alors, où l'on explorerait des thérapies contre les cauchemars, où l'on chercherait à résoudre des problèmes pendant le sommeil, voire où l'on vivrait en rêve les aventures de notre choix. Autant de nouvelles façons de transformer les temps morts quotidiens en actions productives, dans une société qui propose déjà nombre de gadgets pour enregistrer l'activité physique et des tests génétiques par correspondance. Une perspective effrayante pour certains mais, pour d'autres, une nouvelle occasion de percer les secrets de l'esprit. ■

BIBLIOGRAPHIE

C. DRIEU *ET AL.*, Nested sequences of hippocampal assemblies during behavior support subsequent sleep replay., *Science*, vol. 362, pp. 675-679, 2018.

N. CELLINI ET A. CAPUOZZO, Shaping memory consolidation via targeted memory reactivation during sleep, *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, vol. 1426(1), pp. 52-71, 2018.

K. A. PALLER, Sleeping in a brave new world: Opportunities for improving learning and clinical outcomes through targeted memory reactivation, *Curr. Dir. Psychol. Sci.*, vol. 26(6), pp. 532-537, 2017.

M. WALKER, *Why We Sleep: Unlocking the Power of Sleep and Dreams*, Scribner, 2017.

D. OUDIETTE *ET AL.*, Upgrading the sleeping brain with targeted memory reactivation, *Trends Cogn. Sci.*, vol. 13(3), pp. 142-149, 2013.

L'ESSENTIEL

- On découvre depuis quelques années des cas extraordinaires de personnes dotées d'une mémoire autobiographique hautement supérieure (MAHS).
- Les souvenirs de leur passé surgissent sans effort, avec une précision maximale.
- Cette mémoire parfaite résulte probablement de connexions anormalement renforcées dans certaines régions du cerveau.
- Parmi elles, on compte notamment l'amygdale et l'hippocampe.

L'AUTEUR

DANIELA ZEIBIG
est journaliste à *Spektrum der Wissenschaft* et à *Gehirn & Geist*

Ne rien oublier une précieuse malédiction

Certaines personnes se souviennent aussi bien d'événements vécus il y a plus de vingt ans que de ceux de la veille. On commence à percer les secrets de ces champions de la mémoire.

Que faisiez-vous le 5 août 1976, le 30 octobre 1986, le 30 mai 1990, le 22 novembre 2016... ? Vous l'ignorez ? Alors vous n'êtes pas doté d'une mémoire autobiographique hautement supérieure.

Ce matin, qu'avez-vous pris au petit-déjeuner ? Il vous est sans doute facile de répondre. Plus difficile : vous rappelez-vous de ce que vous avez mangé le midi du 23 novembre 2006 ? [illegible] la plupart, impossible de s'en souvenir. Mais pour certaines personnes, c'est un jeu d'enfant. Leur mémoire est si remarquable qu'elles peuvent se souvenir de chaque jour de leur vie jusqu'à un certain moment de leur enfance. Et dire sans hésitation à quel jour de la semaine correspond n'importe quelle date du calendrier, tout comme ce qu'on pouvait lire dans les journaux ce jour-là.

« JE SUIS UN PHÉNOMÈNE »

Les spécialistes qualifient ce phénomène d'« hypermnésie », ou de « mémoire autobiographique hautement supérieure » (MAHS). Depuis quelques années, les recherches s'intensifient pour en déchiffrer les causes, même si ces investigations sont ardues à mener, compte tenu du nombre très restreint de personnes qui sont dotées de cette aptitude !

L'histoire de ce syndrome plonge ses racines dans le cas surprenant de Salomon Cherechevski, un journaliste russe ayant vécu au début du XX^e siècle, et qui fut étudié par le neuropsychologue russe Alexandre Luria. Cherechevski était

22 NOVEMBRE 2016

2 SEPTEM

30 MAI 1990

29 JUIN 1983

8 JANVIER 1976

30 OCTOBRE 1986

5 AOÛT 1976

1ER AOÛT 1972

synesthète, capable de ressentir des impressions visuelles en écoutant des sons et *vice versa*, et qui s'appuyait sur cette capacité pour mémoriser des quantités colossales d'informations. Son histoire fut adaptée au théâtre en 1998 par Peter Brook dans la pièce *Je suis un phénomène*.

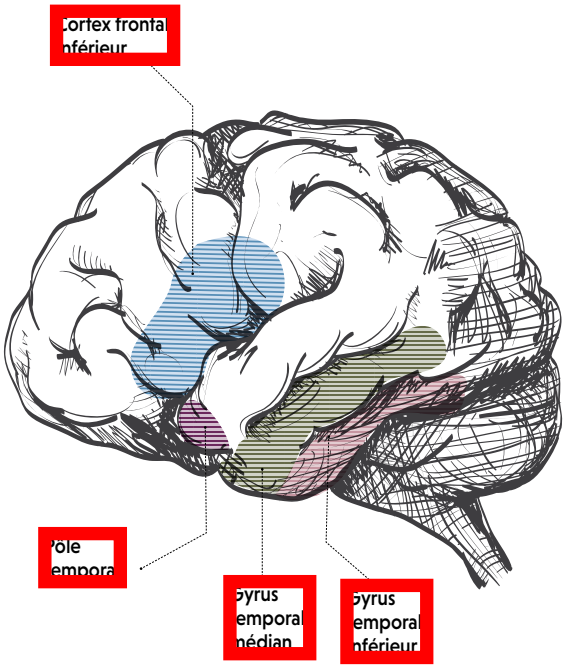
PLUS FORT QUE L'ENCYCLOPÉDIE

Le premier cas documenté à l'aide des méthodes modernes d'analyse scientifique fut une Américaine du nom de Jill Price (*voir la figure page 41*). En 2000, cette jeune femme contacte James McGaugh, un chercheur de l'université de Californie, à Irvine. Dans son message, elle décrit ses capacités extraordinaires. Ses premiers souvenirs remontent, comme pour la plupart d'entre nous, à sa petite enfance; mais à partir du 5 février 1980 (elle a quatorze ans), chaque jour de sa vie est resté imprimé dans sa mémoire. Ces souvenirs, il serait faux de dire qu'elle se les remémore volontairement; ils s'imposent littéralement à elle dès qu'elle est confrontée à une date, que ce soit en lisant un journal, en voyant un calendrier ou au hasard d'une conversation. Si un tel don peut sembler enviable au premier abord, elle le vit en réalité comme un fardeau extrêmement pesant.

James McGaugh est aussitôt fasciné. Il décide de l'étudier en détail, et ce sera son occupation au cours des cinq années qui suivront. Au fil d'innombrables tests d'intelligence et de mémoire, il interroge Jill Price sans relâche à propos de dates particulières du passé. Et il s'aperçoit que sa mémoire est fortement liée à la distribution des dates sur le calendrier. En dix minutes, elle énumère tous les jours de Pâques entre 1980 et 2003. Elle sait aussi tout ce qui s'est passé chaque jour de sa vie. En effet, une partie de ces déclarations seront recoupées avec le contenu de son journal intime qu'elle a un temps tenu adolescente. Tout correspond. Elle a le film dans sa tête.

En outre, la jeune femme se rappelle tous les événements s'étant déroulés dans le monde sur la même période, dans la mesure où elle leur a

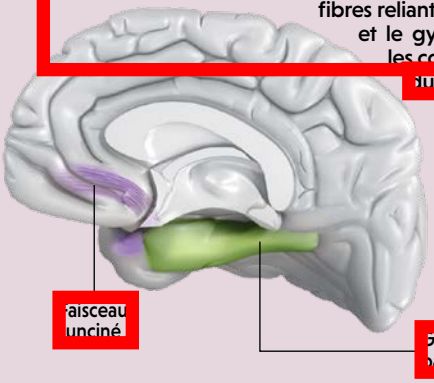
Le souvenir d'un épisode de notre histoire personnelle sollicite trois zones cérébrales : le gyrus temporal inférieur, le gyrus temporal médian et le cortex frontal inférieur. Le pôle temporal tout à l'extrémité du lobe temporal serait une plaque tournante de la mémoire autobiographique.



À LA RECHERCHE DES CHAMPIONS DE LA MÉMOIRE

Pour identifier les personnes présentant une mémoire autobiographique hautement supérieure (MAHS) parmi les multiples candidats autodéclarés, les chercheurs de l'université de Californie, à

Des dizaines de personnes l'ont passée avec succès. Les cerveaux des sujets MAHS ont ensuite été analysés par des expériences d'imagerie, afin de déterminer s'ils diffèrent de ceux de personnes ayant une mémoire ordinaire. Deux structures liées à la mémoire apparaissent différentes entre les deux groupes de sujets : le faisceau unciné – un ensemble de fibres reliant les cortex temporal et frontal – et le gyrus parahippocampique, dont les connexions avec d'autres régions du cerveau semblent plus fortes.



ÉTAPE 1 : QUESTIONNAIRE SUR DES ÉVÉNEMENTS PUBLICS

Plus d'un tiers des sujets s'étant déclarés doués de MAHS se sont souvenus d'au moins 50 % des événements publics. Aucun membre du groupe témoin n'a atteint un tel pourcentage.

LES FONCTIONS EXÉCUTIVES

Les fonctions exécutives sont les processus mentaux qui permettent d'adapter nos comportements de manière flexible en fonction des circonstances. Elles incluent le contrôle de l'impulsivité, la planification et la régulation des émotions.

manifesté un minimum d'intérêt. Les chercheurs, pour cela, se sont procuré un livre détaillant tous les principaux épisodes de l'histoire américaine récente, et lui demandent de citer les dates correspondantes. Elle ne fait aucune erreur, sauf concernant une date: celle de l'occupation de l'ambassade américaine en Iran, en 1979. Sceptiques, les scientifiques se renseignent auprès d'autres sources et s'aperçoivent que leur livre comportait une erreur à propos de cet événement. Jill avait raison.

Autre particularité: Price ne «calcule» pas le calendrier dans sa tête, comme le font certains autistes surdoués pouvant retrouver le jour de chaque date sur une période remontant à 40000 ans... Mais Price ne se remémore les choses précisément que depuis 1980. Sa mémoire autobiographique fonctionne depuis cette date d'une manière mystérieuse.

L'énigme s'épaissit encore quand d'autres tests de mémoire lui sont proposés. Dans certaines tâches comme la reconnaissance de mots, elle fait merveille, capable d'identifier sans erreur ni hésitation cinquante termes précédemment aperçus, mélangés à d'autres. Mais dans des épreuves moins structurées consistant par exemple à apprendre des listes de mots et à les restituer librement, ses performances sont en dessous de la moyenne. Elle déclare d'ailleurs perdre souvent ses clés et noter une foule de choses pour ne pas les oublier...

Son intelligence est moyenne. Elle rencontre les difficultés dans les tests mesurant les fonctions exécutives, c'est-à-dire que la pensée abstraite et la planification ne sont pas ses principaux atouts. À l'école, elle n'avait pas de notes mirobolantes. Elle devait beaucoup travailler et avait, selon ses propres dires, du mal à retenir les dates historiques ou les poèmes.

En 2006, James McGaugh rend pour la première fois le cas de Jill Price public. Pour préserver son anonymat, il la désigne dans ses articles sous le diminutif de «AJ». Peu après, Jill Price finit par raconter son histoire dans de nombreux shows télévisés, et écrit un livre sur ce que représente le fait de vivre avec une mémoire extraordinaire. En ce sens, elle est la plus connue des personnes hypermnésiques.

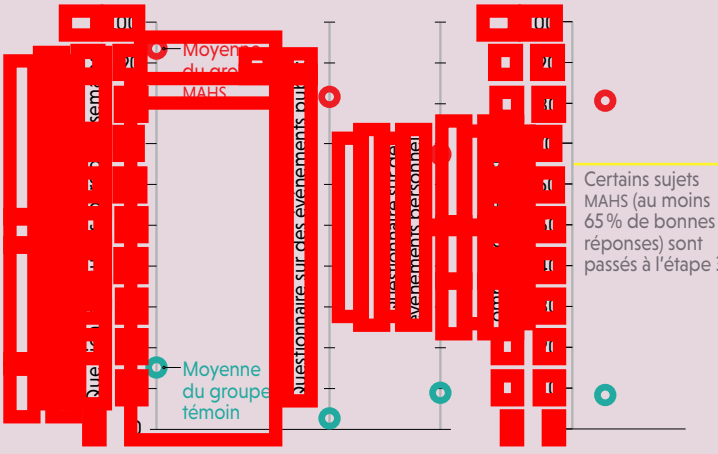
UN CERVEAU ANORMAL ?

Mais pourquoi Jill Price se souvient-elle de tout ? À la différence des troubles de la mémoire, les mémoires extraordinaires ont été très peu étudiées, et quand ce fut le cas, l'attention s'est surtout portée sur des personnes utilisant des techniques particulières pour retenir un grand nombre de choses sans importance comme des plans de rue ou les 10000 premières décimales du nombre Pi. En conséquence, aucun protocole expérimental adapté aux personnes comme Jill Price n'a été mis au point, et ces gens ont été examinés avec des instruments conçus pour les patients affectés de troubles de la mémoire.

Dans les tests que Jill Price réussissait brillamment, un effet plafond est vite apparu, du fait que les épreuves lui étaient beaucoup trop

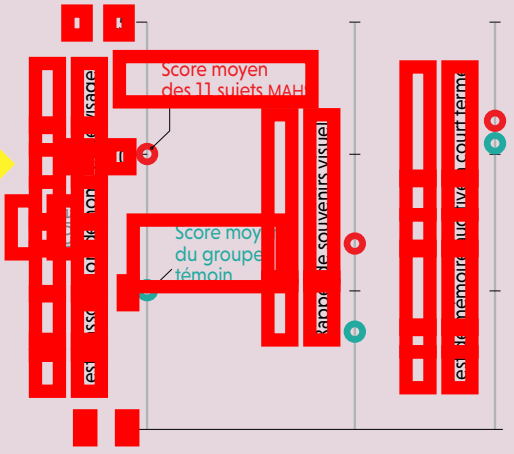
ÉTAPE 2 : TESTS RELATIFS AUX DATES

Les candidats excellaient à identifier les jours de la semaine correspondant à une série aléatoire de 10 dates, et à citer des événements publics et personnels vérifiables survenus à ces dates. Ceux qui ont obtenu au moins 65 % de bonnes réponses ont été déclarés doués de MAHS.



ÉTAPE 3 : TESTS COGNITIFS

Certains sujets MAHS ont passé une série de tests de mémoire. Ils ont obtenu des scores plus élevés que les sujets témoins à des tests où ils devaient associer des noms à des visages ou mémoriser des images, mais pas à d'autres (mesurant notamment la mémoire à court terme).



UN ÉCRIT PROPHÉTIQUE

En 1941, l'écrivain argentin Jorge Luis Borges publie le texte qui reste sans doute le plus fameux sur le thème de la mémoire extraordinaire, et préfigure les études de l'hypermnésie. Dans ce récit, l'auteur dresse le portrait d'un jeune homme nommé Funes, qui, après avoir été percuté par un cheval, devient incapable de rien oublier. Extraits

« Pendant dix-neuf ans, il avait vécu comme dans un rêve : il regardait sans voir, il entendait sans entendre, il oubliait tout, presque tout. Dans sa chute, il avait perdu connaissance ; quand il était revenu à lui, le présent ainsi que les souvenirs les plus anciens et les plus banaux étaient devenus intolérables à force de richesse et de netteté. Il s'aperçut peu après qu'il était infirme. Le fait l'intéressa à peine. Il estima (sentit) que l'immobilité n'était qu'un prix minime. Sa perception et sa mémoire étaient maintenant infaillibles.
D'un coup d'œil, nous percevons trois verres sur une table ; Funes, lui, percevait tous les rejets, les grappes et les fruits qui composent une treille. Il connaissait les formes des nuages australs de l'aube du trente avril mil huit cent quatre-vingt et pouvait les comparer au souvenir des marbrures d'un livre en papier espagnol qu'il n'avait regardé qu'une fois et aux lignes de l'écume soulevée par une rame sur le Rio Negro la veille du combat de Quebracho. Ces souvenirs n'étaient pas simples : chaque image visuelle était liée à des sensations musculaires, thermiques, etc.
Il pouvait reconstituer tous les rêves, tous les demi-rêves. Deux ou trois fois il avait reconstitué un jour entier ; il n'avait jamais hésité, mais chaque reconstitution avait demandé un jour entier.[...]
Il lui était très difficile de dormir. Dormir c'est se distraire du monde. Funes, allongé dans son lit, dans l'ombre, se représentait chaque fissure et chaque moulure des maisons précises qui l'entouraient. Je répète que le moins important de ses souvenirs était plus minutieux et plus vif que notre perception d'une jouissance ou d'un supplice physique.) [...]
Il avait appris sans effort l'anglais, le français, le portugais, le latin. Je soupçonne cependant qu'il n'était pas très capable de penser. Penser c'est oublier des différences, c'est généraliser, abstraire. Dans le monde surchargé de Funes il n'y avait que des détails, presque immédiats. »

« FUNES OU LA MÉMOIRE », *FICTIONS*, JORGE LUIS BORGES, 1941

faciles. Elle les réussissait sans atteindre ses limites et obtenait souvent un score parfait. Si bien qu'à l'époque, James McGaugh pouvait tout au plus supposer que ses capacités étaient probablement dues à un développement anormal de son cerveau.

Au milieu de l'année 2012, l'équipe de Brandon Ally, à l'université Vanderbilt, à Nashville, s'est attaquée à la question. Le but des chercheurs était de découvrir ce qui, dans les neurones, pouvait expliquer les aptitudes mnésiques supérieures. Ils se penchèrent sur le cas d'un patient doté des mêmes caractéristiques que Jill Price. Âgé de 20 ans, HK avait lui aussi une mémoire autobiographique époustouflante. À sa naissance, il avait souffert d'une rétinopathie du nouveau-né, une maladie de l'œil qui le laissa aveugle. Cela ne l'empêcha pas de se rappeler ultérieurement le contenu de toutes ses journées à partir de l'âge de 13 ans.

Comme Jill Price, HK ne se remémore rien consciemment ou volontairement. Cela lui vient de façon arbitraire, comme quelque chose d'imposé. Il s'agit toujours d'impressions sensorielles riches et vivantes. Alors que Price voit son passé défiler devant ses yeux comme un film, ce sont surtout des bruits, des sensations ou des odeurs qui prédominent chez HK. Il n'est ni supérieurement intelligent, ni particulièrement doué pour apprendre par cœur – seule l'histoire de sa vie est comme un musée d'une incroyable richesse.

Pour comprendre comment cela est possible, Brandon Ally et ses collègues ont décidé d'observer en détail le cerveau de leur patient par IRM structurale. Comparé à trente autres jeunes hommes sans mémoire autobiographique particulière, HK possédait dans l'ensemble moins de matière grise et moins de matière blanche, ce que les chercheurs attribuèrent à sa maladie d'enfance. En revanche, une partie de son cerveau apparaissait 20 % plus développée que chez les autres sujets examinés : l'amygdale droite. Et ce, alors que d'autres aires sous-corticales comme les noyaux gris centraux étaient de taille réduite...

LES NEURONES DE LA MÉMOIRE PARFAITE

Autre fait marquant : une connexion beaucoup plus étroite entre l'amygdale et l'hippocampe, ainsi que d'autres régions corticales et sous-corticales. L'amygdale est une partie du système limbique fortement impliquée dans le traitement des émotions. Elle associe les stimulus que nous percevons avec des ressentis affectifs, notamment la peur, au point que les personnes atteintes de lésions à ce niveau n'éprouvent parfois plus la moindre crainte.

Étant donné que l'amygdale de HK est si étroitement connectée à l'hippocampe (lui-même porte d'entrée des souvenirs), Brandon Ally et ses collègues pensent qu'elle joue un rôle décisif dans l'hypermnésie. Les psychologues et les neuroscientifiques connaissent depuis longtemps toute l'importance des sentiments dans notre capacité de mémorisation, ce qui se traduit par la tendance à se rappeler plus aisément des événements teintés d'émotions que des faits neutres.

Ainsi, l'amygdale de HK grefferait des émotions puissantes sur tous ses souvenirs, amplifiant leur portée et leur signification. Le système neuronal sous-jacent, hyperactif, traiterait les informations avec davantage d'efficacité et les restituerait plus aisément que chez le commun des mortels. Mais cette explication vaut-elle également pour d'autres personnes hypermnésiques que Jill Price ? Au cours des années suivantes, James McGaugh s'emploie à identifier un plus grand nombre de personnes hypermnésiques. Son équipe met au point, pour cela, un protocole particulier (*voir l'encadré page 38*).

Quelques dizaines de personnes sont dotées d'une mémoire autobiographique hautement supérieure (MAHS). Parmi elles, Jill Price (la première identifiée, en l'an 2000), l'actrice Marilu Henner et le journaliste et acteur Brad Williams *(de gauche à droite)*

Au début, les scientifiques ne manquent pas de candidats ! Il faut dire que suite à la publication de leur première étude en 2006, ce sont plus d'une centaine de volontaires qui se signalent, tous se prétendant dotés d'une mémoire hors norme. Pour ne retenir que les cas avérés, les chercheurs leur font d'abord passer un quiz à plusieurs étapes, au téléphone. Ils n'en retiennent que dix nouveaux patients hypermnésiques, qui sont alors invités à venir passer des tests au laboratoire. Là encore : épreuves détaillées de mémoire et d'intelligence, et mesure de l'activité du cerveau par IRM…

Pour chaque examen, James McGaugh et ses collègues constituent un groupe de contrôle réunissant des personnes ayant des capacités de mémoire moyennes. Les tests cognitifs ressemblent, dans leurs grandes lignes, à ceux qui avaient été employés avec Jill Price entre 2000 et 2006 : il s'agit de reconnaître des visages, d'apprendre par cœur puis de restituer à l'envers des suites de nombres, de retracer des images de mémoire ou de restituer des histoires entendues. Résultat : tout comme Jill Price avant eux, les participants n'obtiennent des scores supérieurs à la moyenne que dans un nombre restreint de tests, se situant dans la moyenne pour la plupart des autres.

James McGaugh et son équipe ont toutefois noté un certain nombre de points remarquables parmi cet échantillon. Tout d'abord, les sujets étaient très souvent des gauchers. Ils présentaient une tendance à des comportements compulsifs, qu'il s'agisse d'amasser ou de collectionner des objets divers, des CD ou des jouets de leur enfance qu'ils rangeaient selon une méthode toute particulière. Certains reconnaissaient répugner à toucher les poignées de porte ou à utiliser les couverts fournis dans les restaurants, par peur des germes.

À la différence de l'équipe de Brandon Ally, celle de James McGaugh n'a pas trouvé de modifications de l'amygdale chez les personnes étudiées. En revanche, des changements sont apparus dans neuf autres régions cérébrales. La plupart se trouvaient dans le lobe temporal, par exemple le gyrus inférieur, le gyrus temporal médian ou le pôle temporal (*voir la figure page 38*). Beaucoup de ces régions étaient déjà connues pour leur rôle dans la mémoire autobiographique.

Pour le psychologue Hans Markowitsch, de l'université de Bielefeld, en Allemagne, l'implication du pôle temporal est logique : « C'est là que se termine le faisceau unciné, explique-t-il, un ensemble de fibres nerveuses qui connecte le lobe frontal avec le lobe temporal. Ce faisceau a une fonction déterminante dans la mémoire autobiographique. On connaît notamment le cas d'un patient ayant subi une lésion du faisceau unciné lors d'une chute de vélo. Par la suite, il ne pouvait plus se rappeler les épisodes passés de sa vie. Sa mémoire sémantique – sa connaissance du monde, en somme – restait par comparaison en grande partie intacte. »

LE RÔLE DU FAISCEAU UNCINÉ

Or le faisceau unciné est particulièrement développé chez les personnes dotées d'une mémoire hypertrophiée. Et comme le chercheur a repéré dans son étude les caractéristiques cérébrales communes à plusieurs sujets hypermnésiques, en les comparant à des sujets contrôle, ses conclusions semblent plus fiables que celles de Brandon Ally.

Ces derniers résultats ont l'approbation de Hans Markowitsch, qui étudie lui-même actuellement un cas d'hypermnésie : « La connexion de régions frontales du cerveau avec le pôle temporal est apparue, au cours des études menées sur des patients amnésiques, comme essentielle pour la capacité à récupérer des souvenirs dans la mémoire autobiographique – plus importante même que l'amygdale et sa connexion à l'hippocampe. » Quant à la cause première de l'hypermnésie, elle reste à découvrir. Car James McGaugh lui-même est conscient des limitations de son étude, comme de la nécessité de mener plus amples investigations.

Fondamentalement, ce qui reste en suspens, c'est de savoir si les changements cérébraux observés sont véritablement la cause de ce surcroît de mémoire, ou si cela ne pourrait pas être plutôt l'inverse : le cerveau ne se serait-il pas modifié en conséquence d'une capacité de remémoration hors du commun, dont les causes seraient encore différentes ? Pour répondre à cette question, James McGaugh et ses collègues envisagent de concentrer leurs études à venir sur des enfants hypermnésiques, pour observer le développement de cette faculté. Ils ont pris cette décision le 14 novembre 2017. C'était un mardi, vous vous souvenez ? ■

BIBLIOGRAPHIE

V. SANTANGELO *ET AL.*, Enhanced brain activity associated with memory access in highly superior autobiographical memory, *PNAS*, vol. 115, pp. 7795-7800, 2018.

B. ALLY *ET AL.*, A case of hyperthymesia : rethinking the role of the amygdala in autobiographical memory, *Neurocase*, vol. 19, pp. 166-181, 2013.

A. LEPORT *ET AL.*, Behavioral and neuroanatomical investigation of highly superior autobiographical memory (HSAM), *Neurobiology of Learning and Memory*, vol. 98, pp. 78-92, 2012.

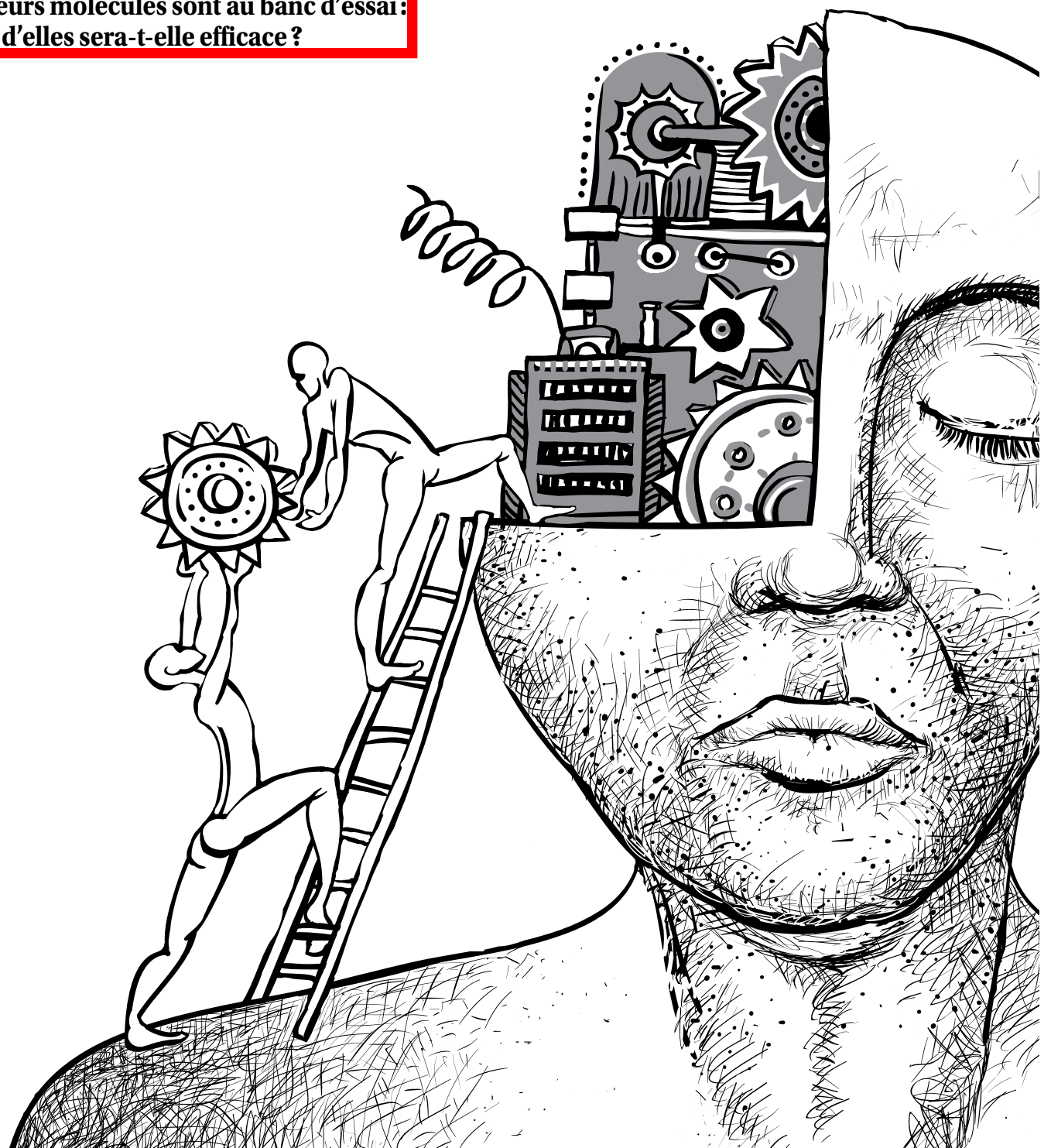
La mémoire est bien à l'abri dans la forteresse du cerveau. Vraiment ?

ATTENTION, DANGER !

Jusqu'où peut-on compter sur notre mémoire ? Est-elle à ce point fiable ? Pas sûr... Elle est attaquée de toute part. Par le vieillissement naturel, par la maladie d'Alzheimer, par les manipulations de toutes sortes qui peuvent implanter de faux souvenirs, par es programmes scolaires qui ne prennent pas assez en compte les différentes facettes de la mémoire pour favoriser les apprentissages... Mais, au fil du temps, a recherche avance et propose des solutions.

Alzheimer traitement en vue ?

La maladie d'Alzheimer est de mieux en mieux comprise. Aujourd'hui, plusieurs molécules sont au banc d'essai : l'une d'elles sera-t-elle efficace ?

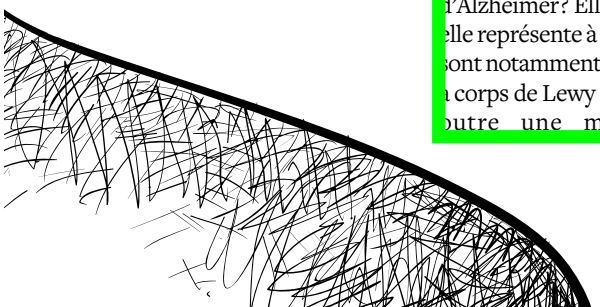


L'ESSENTIEL

- De plus en plus de pistes de traitements sont explorées contre la maladie d'Alzheimer.
- Certaines molécules luttent contre l'inflammation des neurones, d'autres ciblent les plaques amyloïdes qui causent la neurodégénérescence.
- Une partie de ces traitements sont testés dans des essais cliniques, mais il faudra attendre encore plusieurs années pour espérer des résultats.

L'AUTEURE

LAURA POUPON est postdoctorante à l'UCL School of pharmacy de Londres.



En 2017, d'après l'Organisation mondiale de la santé, 47,5 millions de personnes étaient atteintes par la maladie d'Alzheimer. C'est plus que la population de l'Espagne! Et [illegible] concernées. Ces chiffres donnent d'autant plus le vertige que la maladie d'Alzheimer ne semble pas avoir trouvé de traitement prometteur. Est-ce une simple question de temps? Pourra-t-on un jour traiter cette pathologie?

À l'heure actuelle, la maladie reste incurable. Les traitements disponibles traitent tout au plus certains de ses symptômes, comme le déclin cognitif ou les altérations du comportement. Cependant, ces dernières années, de nombreux travaux ont considérablement amélioré les connaissances sur les mécanismes cérébraux de la maladie. Parmi eux, plusieurs ouvrent de nouvelles pistes thérapeutiques pour espérer un jour venir à bout de ce fléau...

Mais, d'abord, qu'est-ce que la maladie d'Alzheimer? Elle fait partie des démences, dont elle représente à elle seule 9 cas sur 10. Les autres sont notamment les démences frontotemporales, à corps de Lewy ou vasculaires. Alzheimer est en outre une maladie neurodégénérative, c'est-à-dire qu'elle se caractérise par une perte progressive des neurones. Evolutive et – à ce jour – irréversible, elle s'accompagne d'un déclin des capacités cognitives et intellectuelles, d'une détérioration de la mémoire, de troubles du langage et de perturbations des fonctions exécutives comme la capacité de planification ou d'élaboration de stratégies pour résoudre différents types de problèmes. À mesure que progresse la maladie, il devient de plus en plus difficile pour les patients de mener une vie normale. Faire des courses, cuisiner ou s'habiller deviennent impossibles sans aide. Ils ont des difficultés à suivre une conversation, car ils ne retiennent pas ce qu'on leur dit, ou bien se perdent à cause de problèmes d'orientation. Ils oublient la date et l'heure, ce qu'ils sont en train de faire et, pour les stades les plus avancés, ne reconnaissent plus leurs proches.

DEUX TYPES DE LÉSIONS

Ces nombreux symptômes résultent d'un processus pathologique qui se traduit par deux types de lésions dans le système nerveux central: d'une part la présence de plaques amyloïdes qui touchent l'extérieur des neurones, et d'autre part des dégénérescences neurofibrillaires à l'intérieur des neurones.

Les lésions du premier type sont les plaques amyloïdes, conséquence de l'accumulation d'une molécule, le peptide Aβ, en dehors des neurones. Ce peptide est produit à partir de son précurseur, la protéine APP, elle-même découpée en plusieurs morceaux grâce à différentes enzymes: les sécrétases. De ce fractionnement sont issus des peptides de diverses tailles, dont la version la plus longue est aussi la plus toxique. Ce mécanisme se produit aussi chez les personnes saines, mais les différents fragments sont éliminés par l'organisme, ce qui ne leur laisse pas le temps de >

former des plaques amyloïdes; chez les malades, les peptides les plus longs ne sont plus éliminés, et s'accumulent sous forme de plaques.

Ces dépôts apparaissent en général quinze ans avant la manifestation des premiers symptômes de la maladie, ce qui fait d'eux un outil de diagnostic précoce, que ce soit en les visualisant par imagerie cérébrale ou en détectant leur présence dans le fluide cérébrospinal des patients.

La probabilité que s'accumulent de telles plaques amyloïdes est également liée à la présence d'un facteur de risque, une variante particulière du gène *ApoE*, qui code l'apolipoprotéine E. Cette protéine est cruciale dans le transport du cholestérol et dans la réparation des lésions cérébrales. Problème: le gène existe sous plusieurs formes, ou variantes. Si la plupart sont inoffensives, le variant de type 4, le gène *ApoE4*, présent dans 15% de la population, entraîne un risque 3 à 10 fois plus élevé de développer la maladie d'Alzheimer que pour les autres versions du gène. La maladie se déclare alors plus tôt.

Le deuxième type de lésion du cerveau observée chez les malades d'Alzheimer est la dégénérescence neurofibrillaire, encore nommée «tauopathie». Il s'agit de l'apparition, au cœur des neurones, d'anomalies d'une protéine, la protéine tau. Une de ses principales fonctions est d'organiser, de stabiliser et réguler la dynamique des microtubules, les rails moléculaires le long desquels sont transportés les neurotransmetteurs (les molécules messagères qui véhiculent l'information nerveuse d'un neurone à l'autre).

Chez les malades, les protéines tau sont anormales et détruisent ce système de transport par microtubules, entraînant la mort des neurones. Cette dégénérescence est d'autant plus grave qu'elle se propage d'un neurone à ceux qui lui sont connectés. Et, tout comme la formation des plaques amyloïdes, cette destruction s'amorce bien avant l'apparition des premiers symptômes, généralement autour de l'âge de 40 ans. À ce moment, lorsqu'on observe par neuro-imagerie l'étendue des lésions de tauopathie dans différentes régions du cerveau, on constate qu'elles sont corrélées au déclin cognitif du patient. Par exemple, lorsque l'hippocampe (une structure cérébrale indispensable au bon fonctionnement de la mémoire) est touché, le patient rencontre des difficultés pour se repérer dans son environnement et commence à perdre la mémoire.

De ce que l'on sait, les deux processus décrits vont de pair et sont systématiquement observés chez les malades. Chez certains patients, la maladie progresse de manière fulgurante, les symptômes surgissant et s'aggravant en quelques mois; chez d'autres, la dégénérescence des neurones peut rester confinée à certaines parties du cerveau pendant plus de dix ans. Les tableaux cliniques sont donc variables, mais la véritable question est: connaissant ces mécanismes neurodégénératifs, est-on désormais en mesure d'identifier de nouvelles cibles thérapeutiques et les méthodes de diagnostic précoce?

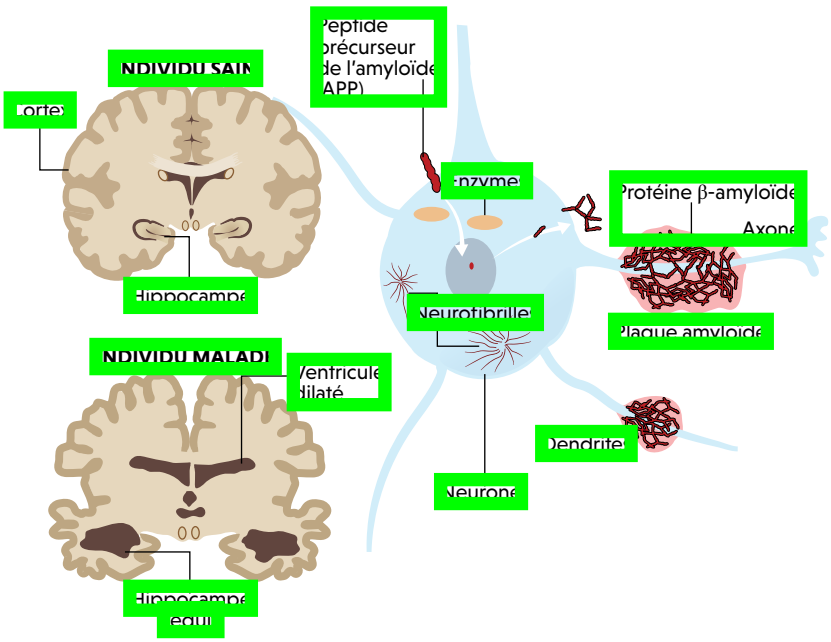
DES TRAITEMENTS ENCORE «SYMPTOMATIQUES»

Aujourd'hui, les traitements disponibles ne sont que symptomatiques. Dans le meilleur des cas, ils entraînent une amélioration durable, en augmentant les capacités d'attention et d'autonomie avec un ralentissement de l'évolution de la maladie et une diminution de certains troubles du comportement. Pour la plupart, ces composés ciblent l'action de certains neurotransmetteurs dans le cerveau des patients.

L'un d'eux, l'acétylcholine, est présent à des concentrations anormalement basses chez les malades. Il est essentiel à la transmission des messages vers les centres de la mémoire, du raisonnement et d'autres processus de la pensée. Ses taux cérébraux sont contrôlés, en temps normal, par une enzyme acétylcholinestérase dont la fonction est de détruire cette acétylcholine une fois qu'elle a délivré son message. C'est pourquoi certains médicaments bloquent l'action de cette enzyme, de sorte qu'ils empêchent la destruction de l'acétylcholine et maintiennent cette dernière à un taux artificiellement élevé. Différents essais cliniques ont mis en évidence un effet modéré mais bien réel de ces inhibiteurs de l'acétylcholinestérase sur les fonctions cognitives et sur l'état global des patients.

Ces médicaments sont au nombre de quatre et s'administrent par voie orale ou transdermique pour les formes légères à modérées de la maladie. Le tacrine (Cognex) est le premier à avoir été approuvé en 1993 et n'est plus commercialisé depuis 2004 en raison des effets secondaires

Comparé à un cerveau sain, celui d'un malade d'Alzheimer a un cortex rétréci, surtout au niveau de l'hippocampe. La faute, en grande partie, aux plaques amyloïdes, des accumulations de protéines β-amyloïdes produites en excès à partir du peptide précurseur APP. Celles-ci perturbent le fonctionnement des axones et des dendrites. Parallèlement, les lésions internes (les neurofibrilles) détruisent les systèmes internes de transport des neurotransmetteurs dans les neurones, contribuant à la mort de ces cellules.



associés, notamment sur le foie. Les trois autres molécules sont le donépézil (Aricept), approuvé en 1996, la rivastigmine (Exelon), en 2000, et la galantamine (Reminyl) en 2001.

Outre l'acétylcholine, un autre neurotransmetteur est ciblé par les médicaments usuels: le glutamate. Ce neurotransmetteur excitateur, présent en excès chez les patients, hyperstimule les neurones et finit par provoquer dans ces cellules des réactions d'oxydation toxiques. Certains médicaments comme la mémantine (Ebixa) neutralisent l'action du glutamate en bloquant ses récepteurs localisés à la surface des neurones. Ils sont destinés aux formes modérément sévères à sévères de la maladie.

Malheureusement, ces médicaments n'empêchent pas la maladie d'évoluer. Leur principal inconvénient tient à leurs effets modestes et à la mauvaise tolérance par les patients, au point qu'ils sont remis en cause par la Haute Autorité de la santé. Celle-ci juge en effet que l'intérêt médical de quatre médicaments (Ebixa, Aricept, Exelon et Reminyl) est insuffisant pour justifier leur prise en charge. Ajoutons une variété d'effets indésirables comme des troubles gastro-intestinaux (nausées, vomissements et diarrhées), des crampes musculaires, de la bradycardie (ralentissement cardiaque), ainsi que certaines contre-indications. En fin de compte, les bénéfices des traitements sont limités au regard des conséquences négatives possibles.

En parallèle de ces traitements, les patients se voient parfois prescrire des somnifères pour atténuer leurs fréquents troubles du sommeil, liés au fait qu'ils confondent le jour et la nuit. Là encore, des effets indésirables ne sont pas rares... À cela s'ajoute la prescription de neuroleptiques pour traiter les problèmes de comportement et calmer les patients, ainsi que d'antidépresseurs utiles pour traiter la dépression fréquente en début de maladie. La maladie d'Alzheimer étant une maladie « d'oublis à répétition », il est également nécessaire d'encadrer le patient dans sa prise médicamenteuse pour être certain qu'il observe bien son traitement.

QUELLES STRATÉGIES DE PRISE EN CHARGE ?

Étant donné les effets souvent insatisfaisants des traitements [illegible], des stratégies parallèles se sont mises en place et font maintenant partie intégrante de la prise en charge des patients. La prise en charge non médicamenteuse peut avoir lieu en ambulatoire ou en institution, l'objectif étant d'améliorer la qualité de vie du patient, mais aussi de soulager son entourage, de maintenir et d'adapter ses fonctions de communication et de le stimuler sur le plan cognitif pour ralentir la perte d'autonomie dans la vie quotidienne.
À cela s'ajoute une prise en charge psychologique et psychiatrique du patient et de son entourage ainsi que la promotion de l'exercice physique. Pour être efficaces, ces stratégies sont aujourd'hui indissociables et complémentaires des traitements spécifiques. Ces stratégies sont à envisager en fonction de l'évolution de la maladie, des besoins différents de chaque malade et font appel à de nombreuses disciplines portant sur l'amélioration de la vie quotidienne, de la cognition, du comportement et de l'activité motrice.
Par exemple, des exercices d'orientation peuvent être proposés afin d'améliorer le quotidien des patients qui perdent leurs repères spatiotemporels. Des ateliers de mémoire pour améliorer la cognition, de l'activité physique ou de l'ergothérapie pour favoriser l'activité motrice ou encore diverses thérapies musicales, par les animaux familiers, ou l'aromathérapie ont fait leurs preuves pour l'amélioration du comportement. Cette liste n'est pas exhaustive et de nombreuses autres stratégies sont actuellement utilisées. L'efficacité de ces interventions semble reconnue malgré un manque de données d'évaluation, du fait notamment qu'une majorité de ces études sont financées par les laboratoires pharmaceutiques. Elles ne sont donc pas à négliger même si le mieux serait de découvrir un traitement capable d'enrayer cette maladie.

MESURER LES TAUX DE PLAQUES AMYLOÏDES PAR PONCTION LOMBAIRE AIDE À DÉPISTER LA MALADIE AVANT L'APPARITION DES PREMIERS SYMPTÔMES

DES SOURIS HUMANISÉES

Les traitements actuels sont assurément insuffisants. De nouvelles pistes de recherche consistent à diminuer la production des protéines toxiques ou à résorber les lésions qu'elles provoquent. La principale difficulté est la suivante: comment tester des molécules candidates sur des animaux qui, à la différence de l'être humain, ne développent pas vraiment une maladie d'Alzheimer? Sur ce plan, des progrès importants ont été récemment réalisés, notamment par l'équipe de Bart De Strooper, à l'Institut de recherche sur la démence, au Royaume-Uni. En transplantant des cellules >

neuronales humaines dans des cerveaux de souris contenant des plaques amyloïdes, les chercheurs ont observé que, contrairement aux neurones de souris, les neurones humains qui grandissent dans cet environnement sont très sensibles à la maladie d'Alzheimer. Les souris humanisées permettent ainsi d'observer le développement complet de la maladie, ce qui était impossible auparavant. On espère ainsi comprendre les processus qui se déroulent réellement dans le cerveau des humains, et peut-être la nature du lien entre les deux types de lésions.

Du coup, de nouvelles molécules sont passées au banc d'essai. À commencer par deux composés prometteurs: l'interleukine-2 et la neuréguline-1. Ces deux molécules pourraient stabiliser la quantité de plaques amyloïdes dans les cerveaux malades, voire la faire diminuer...

DEUX COMPOSES PROMETTEURS

L'interleukine-2 est une molécule de signalisation du système immunitaire. Elle contrôle l'inflammation des neurones observée chez les patients, un phénomène qui contribue à la dégénérescence. Pourquoi serait-elle intéressante contre Alzheimer? Premier indice: chez des souris modifiées génétiquement qui ne produisent plus cette interleukine-2, l'hippocampe est atrophié. Deuxième indice: les souris présentent des troubles de l'apprentissage et de la mémoire similaires à ceux observés dans la maladie d'Alzheimer... Et lorsqu'on analyse des biopsies de patients, on découvre une diminution des taux d'interleukine-2 par rapport à des sujets sains!

De quoi donner l'idée à Nathalie Cartier et ses collègues de l'Inserm et de l'université Paris-Sud de tester les effets de l'interleukine-2 chez un modèle de souris Alzheimer. Et de livrer une observation cruciale: l'administration d'interleukine-2 fait chuter l'inflammation neuronale et restaure les capacités de mémoire des rongeurs. Cette molécule pourrait prochainement faire l'objet d'une étude clinique pour la maladie d'Alzheimer.

Autre médicament candidat, la neuréguline-1 est déjà connue comme agent protecteur dans le cadre de la maladie de Parkinson et de la sclérose latérale amyotrophique (une maladie qui détruit les neurones moteurs et conduit à une paralysie progressive), et sa production insuffisante pourrait être une des causes de la schizophrénie. Mais cette neuréguline-1 pourrait aussi se révéler précieuse pour combattre la maladie d'Alzheimer.

En 2016, une étude menée par l'équipe de Kuo-Fen Lee, à l'institut Salk, en Californie, a établi qu'augmenter la production de cette protéine dans l'organisme de rongeurs atténue leurs troubles cognitifs liés à la maladie et fait baisser la concentration de plaques amyloïdes. Cette fois, la neuréguline réduit la quantité de peptide APP, le matériau de base des plaques amyloïdes. Le tout en déclenchant la production d'enzymes qui dégradent ces agrégats de peptide. La neuréguline a donc un large potentiel thérapeutique, mais son mécanisme d'action n'est pas encore élucidé et il faudra encore la tester sur d'autres modèles animaux avant de l'envisager comme traitement.

LA PISTE DES ONDES GAMMA

Aujourd'hui, les travaux foisonnent. La piste des molécules thérapeutiques n'est qu'une option parmi d'autres: une approche récente consiste à stimuler le cerveau afin de l'amener à produire plus d'ondes gamma, des oscillations de l'activité neuronale à la fréquence de 40 pulsations par seconde. Pourquoi?

Tout part du constat, établi par plusieurs équipes, que le cerveau des patients atteints de la maladie d'Alzheimer produit moins d'ondes gamma que celui de personnes saines. Or ces ondes contribuent à des fonctions cérébrales aussi essentielles que l'attention, la perception et la mémoire, qui sont justement altérées chez les malades. D'où l'idée, simple dans son principe, de les renforcer. Des chercheurs de l'institut technologique du Massachusetts l'ont tenté chez des souris humanisées atteintes de la maladie. Après une heure de stimulation à la fréquence gamma, ils ont observé chez les rongeurs une réduction de 57% des protéines amyloïdes Aβ dans l'hippocampe, région clé de la mémoire. Mais hélas, le taux de protéines Aβ a retrouvé son niveau initial après 24 heures. Qu'à cela ne tienne, les chercheurs ont rallongé le traitement et au bout d'une semaine de stimulation quotidienne, la quantité de protéines Aβ mais aussi de protéines tau anormales a cette fois baissé durablement.

La cause? Un effet stimulant des ondes gamma sur une classe de cellules cérébrales distinctes des neurones, la microglie. En présence d'ondes gamma, les cellules de microglie grossissent et se mettent à avaler puis à digérer les plaques amyloïdes.

DES SOURIS ATTEINTES DE LA MALADIE D'ALZHEIMER RETROUVENT LEUR MÉMOIRE APRÈS AVOIR REÇU DE L'INTERLEUKINE-2, UNE MOLÉCULE ANTI-INFLAMMATOIRE

EN CHIFFRES

- En 2017, 47 millions de personnes dans le monde dont 950 000 en France touchées par la maladie d'Alzheimer.
- 225 000 nouveaux cas par an en France
- 1 malade sur 3 ignore qu'il est atteint
- 4e cause de mortalité.
- 15% de la population de plus de 85 ans atteinte
- Après un an de traitement, seulement 40% des patients voient leur état s'améliorer.
- 0 traitement curatif

ALZHEIMER EN QUELQUES MOTS

FORME SPORADIQUE DE LA MALADIE

C'est la forme la plus commune de la maladie, qui touche jusqu'à 98% des patients. Elle frappe de façon indifférenciée dans la population, avec des symptômes apparaissant en général après l'âge de 65 ans et qui peuvent être influencés par des facteurs de risques physiologiques (obésité, diabète, hypertension, sédentarité, manque d'activité physique), cognitifs (faible niveau d'éducation ou d'activité intellectuelle) ou environnementaux (tabagisme, isolement social).

FORME GENETIQUE DE LA MALADIE

Elle concerne 2% des cas. Il s'agit d'une forme précoce, souvent agressive, survenant avant 65 ans. On connaît à l'heure actuelle 3 gènes différents responsables de ces formes héréditaires: la préséniline 1 (*PSEN1*) et 2 (*PSEN2*) ainsi que le gène précurseur de l'amyloïde (*APP*).

STADES DE LA MALADIE

La maladie d'Alzheimer évolue par stades. Différentes classifications, allant du stade 1 à 7, ou encore un classement par gravité de la démence allant de légère à très sévère, permettent de situer l'évolution de la maladie. Ces classifications ont été bouleversées ces dernières années avec notamment la proposition de Bruno Dubois, de l'hôpital de la Salpêtrière, de considérer la maladie d'Alzheimer dans sa globalité et non en se focalisant seulement sur les stades déjà avancés des patients présentant des formes de démence.

PHASE DE LATENCE

Aujourd'hui, on peut déceler la maladie d'Alzheimer alors que le patient ne présente pas de symptômes, il est alors question de phase dite de latence clinique, la maladie se prépare mais ne s'exprime pas encore. Le diagnostic de la maladie peut être posé de façon fiable et précoce grâce à l'existence de biomarqueurs connus observables dans le liquide céphalorachidien prélevé par ponction lombaire ou encore par imagerie cérébrale. Les premières lésions cérébrales peuvent ainsi se manifester jusqu'à vingt ans avant les premiers symptômes

PHASE PRODROMALE

C'est le moment où les premiers symptômes avant-coureurs de la maladie apparaissent, généralement bénins ou n'altérant pas les activités de la vie quotidienne. À ce stade, il est possible de déceler la pathologie par un test de mémoire.

PHASE DEMENTIELLE

C'est la phase principale de cette maladie, qui est aussi la plus connue car directement observable. Elle se manifeste par des pertes de mémoire plus ou moins profondes, des difficultés à s'orienter, à s'exprimer, à raisonner, mais aussi par des accès d'irritabilité ou d'agressivité. Globalement, les patients évoluent vers une perte progressive d'autonomie qui varie selon la gravité de la démence, et qui peut aller d'un stade léger à très sévère.

Alors, peut-on espérer que ces recherches débouchent sur des traitements dans un avenir proche? En tout état de cause, leur concrétisation sous forme de traitement pour l'homme prendra des années. Aussi encourageantes que soient les études précliniques, la prudence s'impose quant à leur application en médecine car on ne compte plus les traitements qui, efficaces chez la souris, ont échoué chez l'homme. Avant de recevoir une autorisation de mise sur le marché, une molécule thérapeutique doit passer par des études cliniques de différentes phases, toujours plus poussées, allant de I à III, un résultat positif en phase III, permettant ainsi l'avènement d'un nouveau traitement.

Au cours de la dernière décennie, plus de 50 médicaments candidats ont passé avec succès les essais cliniques de phase II, études pilotes menées sur environ 500 volontaires, dans le but de déterminer la dose optimale du médicament et ses éventuels effets indésirables. Mais aucun de ces médicaments potentiels n'a franchi la phase III, où il s'agit de comparer l'effet de la substance active à celle d'un placebo, cette fois sur des milliers de personnes. En clair, aucun nouveau médicament significatif pour la maladie d'Alzheimer n'a été approuvé au cours des 14 dernières années.

Les chercheurs ne s'avouent pas vaincus, et développent notamment d'autres stratégies ciblant la protéine tau. Un vaccin actif nommé AADvac1, dirigé contre les protéines pathologiques tau est actuellement en étude. Sa tolérance et ses possibles effets secondaires sont testés sur des groupes de 20 à 80 volontaires. À ce stade, on constate des effets indésirables mineurs comme des réactions au site d'injection après administration. Le vaccin AADvac1 semble entraîner une réponse immunitaire sûre, forte et ciblée exactement sur la protéine tau. Mais il restera à établir l'innocuité du traitement et son efficacité contre la maladie. Les premiers résultats sont encourageants, mais doivent être confirmés. L'AADvac1 pourrait ralentir l'atrophie cérébrale causée par la maladie d'Alzheimer: chez les patients testés, le déclin cognitif est moins important.

En ce qui concerne des études plus avancées de stade III, deux molécules, l'idalopirdine et >

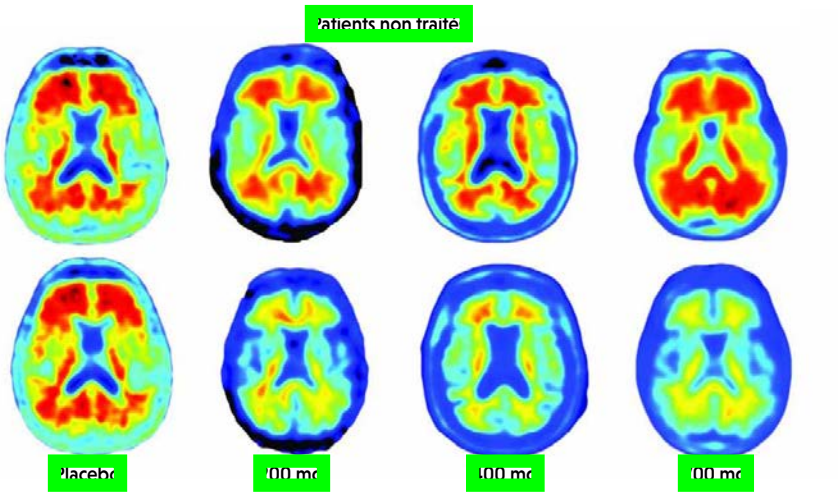
l'intepirdine, ont été testées. Ce sont des antagonistes des récepteurs à la sérotonine de type 6 (5-HT6) : autrement dit, elles activent des récepteurs présents dans les neurones, qui modulent l'activité de ces derniers tout particulièrement dans l'hippocampe. Hélas, au terme de trois études cliniques, l'idalopirdine n'a pas apporté d'amélioration notable de la cognition chez les patients testés. La plupart des molécules évoquées visent les symptômes, ne ferait-on pas mieux de cibler les causes de la maladie?

S'ATTAQUER AUX CAUSES

Les premières molécules qui seraient capables d'une telle prouesse sont elles aussi au stade de l'étude de phase III et se répartissent en deux catégories: d'une part, les anticorps monoclonaux humains et, d'autre part, les inhibiteurs d'enzyme BACE. Les anticorps monoclonaux, dont fait partie la molécule prometteuse aducanumab, sont capables de réduire le déclin cognitif en nettoyant le cerveau des plaques amyloïdes (*voir la figure ci-contre*). En phase préclinique, cette molécule a réduit de 70% les plaques amyloïdes chez la souris et ferait semble-t-il de même chez l'homme à en croire des études de phase II, avec une bonne tolérance. Les essais de phase III sont en cours pour confirmer cette action.

D'autres anticorps monoclonaux, comme le gantenerumab et le solanezumab, n'ont pas eu le même impact positif. Les anticorps ne sont donc pas tous aussi efficaces pour reconnaître les plaques amyloïdes. Cependant, ces deux dernières molécules ont probablement été testées à des stades trop avancés de la maladie, ce qui pourrait expliquer qu'elles soient inopérantes. Le solanezumab est d'ailleurs en cours d'essai chez des patients à risque de développer la maladie, c'est-à-dire possédant les biomarqueurs de la maladie, mais encore sans symptôme.

Quant aux inhibiteurs d'enzyme BACE, ils bloquent l'activité des enzymes qui fabriquent le peptide Aβ toxique dont sont faites les plaques toxiques. Ainsi, contrairement aux anticorps, leur effet est clairement d'empêcher la formation de lésions nouvelles et non de détruire celles qui sont déjà présentes. Le principal candidat de cette classe de molécules est le verubecestat pour lequel les résultats sont encourageants: une réduction de 84% de la quantité d'amyloïde dans le liquide cérébrospinal est observée pour la plus forte dose utilisée dans l'étude clinique de phase I. Avec un bémol, toutefois: pour les stades avancés de la maladie, là encore, l'essai de phase III a été abandonné en raison d'effets trop ténus: la molécule n'a pas réduit le déclin cognitif ou fonctionnel chez les patients atteints de la maladie d'Alzheimer légère à modérée et était associée à des effets indésirables liés au traitement. On se cantonnera donc aux stades les plus précoces de la maladie.



L'anticorps aducanumab a été testé chez des malades d'Alzheimer. Sur la ligne inférieure, les cerveaux de patients traités pendant un an avec des doses croissantes d'anticorps montrent une disparition progressive des plaques amyloïdes *(en rouge)*, comparée à celles de patients non traités sur la ligne supérieure.

Le caractère innovant de ces deux catégories de traitements vient du fait qu'ils s'attaquent à l'une des causes du mal et non plus seulement à ses symptômes: les plaques amyloïdes. Il est vrai que plusieurs études cliniques de phase III se sont soldées par des échecs, mais cela pourrait s'expliquer par les lésions trop profondes des patients ayant reçu ces traitements. En effet, une molécule, même si elle est capable de résorber des lésions ou de les prévenir, ne sera pas apte à enrayer le processus si celui-ci est trop avancé, quelle que soit la pathologie considérée. Il est donc important de développer les techniques de diagnostic précoce afin que les patients soient traités au plus tôt.

Les résultats des recherches restent donc en demi-teinte. Mais les connaissances progressent, tout comme les outils de diagnostic. Notamment la ponction lombaire, qui permet de diagnostiquer une maladie d'Alzheimer avant l'apparition des premiers symptômes, une clé du succès des traitements actuels et futurs. Les personnes à risque gagneraient souvent à passer cet examen, notamment en cas d'antécédents familiaux (formes génétiques de la maladie) ou de signes de dégénérescence neuronale observée à l'occasion d'un scanner.

En outre, une étude publiée dans le *New England Journal of Medicine* a laissé paraître une éclaircie dans cet horizon couvert: on y découvre que le nombre de nouveaux cas annuels de démence (dont la maladie d'Alzheimer) tend à reculer depuis une trentaine d'années. Parmi les explications possibles, une meilleure hygiène de vie au sein de la population et une diminution de certains facteurs de risque comme le contrôle de l'hypertension artérielle ou encore la baisse des risques d'accidents cérébraux. Le niveau culturel peut avoir un impact, notamment pour les personnes ayant fait des études supérieures, qui ont développé un réseau synaptique plus important leur permettant d'amortir les effets de lésions futures. Lisez, visitez des musées et entretenez des relations sociales riches et diverses, cela pourrait vous protéger plus que vous ne le pensez. ■

BIBLIOGRAPHIE

P. NOVAK *ET AL.*, FUNDAMANT: an interventional 72-week phase 1 follow-up study of AADvac1, an active immunotherapy against tau protein pathology in Alzheimer's disease, *Alzheimers Res. Ther.*, vol. 10(1), 108, 2018.

M. EGAN *ET AL.*, Randomized Trial of Verubecestat for Mild-to-Moderate Alzheimer's Disease, *N. Engl. J. Med.*, vol. 378(18), pp. 1691-1703, 2018.

S.O. BACHURIN *ET AL.*, Drugs in clinical trials for Alzheimer's disease: the major trends, *Med. Res. Rev.*, vol. 37, pp. 1186-1225, 2017.

S. ALVES *ET AL.*, Interleukin-2 improves amyloid pathology, synaptic failure and memory in Alzheimer's disease mice, *Brain*, vol. 140, pp. 826-842, 2017.

OFFRE D'ABONNEMENT 1 AN

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

3 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE DÉCOUVERTE	FORMULE PAPIER + HORS SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier (12 numéros par an	✓	✓	✓
Le hors-série papier (4 numéros par an		✓	✓
L'accès en ligne illimité à pourlascience.fr			✓
L'édition numérique du magazine (12 numéros par an			✓
L'édition numérique du hors-série (4 numéros par an			✓
L'accès aux archives numériques depuis 1996			✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	59 € Au lieu de 82,80 € 29 % de réduction	79 € Au lieu de 114,40 € 31 % de réduction	99 € Au lieu de 174,40 € 43 % de réduction

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service abonnements – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email : pourlascience@abopress.fr

☑ OUI, je m'abonne pour 1 an à POUR LA SCIENCE

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

☐ FORMULE DÉCOUVERTE
12 n° du magazine papier
59€ ~~82,80€~~

☐ FORMULE PAPIER + HORS SÉRIE
12 n° du magazine papier
4 Hors-série papier
79€ ~~114,40€~~

☐ FORMULE INTÉGRALE
12 n° du magazine papier
4 Hors-série papier
Accès illimité aux contenus en ligne
99€ ~~174,40€~~

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....

Téléphone |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

Email : (indispensable pour la formule intégrale)

..... @.....

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / Je choisis mon mode de règlement

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

☐ **Carte bancaire**

N° |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_|

Date d'expiration |_|_| |_|_| Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB) |_|_|_|

Signature obligatoire :

Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/12/2019 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site https://boutique.pourlascience.fr. Photos non contractuelles.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société *Pour la Science*. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. *Pour la Science* ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à *Pour la Science*. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : https://rebrand.ly/charte-donnees-pls. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

Groupe Pour la Science - Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris CEDEX 14 - Sarl au capital de 32 000€ - RCS Paris B 311 797 393 - Siret : 311 797 393 000 23 - APE 5814 Z

L'ESSENTIEL

- Grâce à l'optogénétique, on peut allumer ou éteindre les neurones avec un simple faisceau de lumière.
- On peut alors manipuler la mémoire de souris: substituer un souvenir à un autre, créer de faux souvenirs aussi bien inscrits dans les neurones que les «vrais»...
- Ces techniques s'ajoutent au pouvoir de la suggestion et de l'imagination qui, mal employées, peuvent elles aussi servir à créer de faux souvenirs.
- Doit-on voir dans ces progrès un espoir ou une menace? Nous limiterons-nous à réparer le cerveau ou accepterons-nous de l'augmenter?

L'AUTEUR

PIERRE-MARIE LLEDO est directeur du département des neurosciences et chef de l'unité Perception et mémoire de l'institut Pasteur et du CNRS.

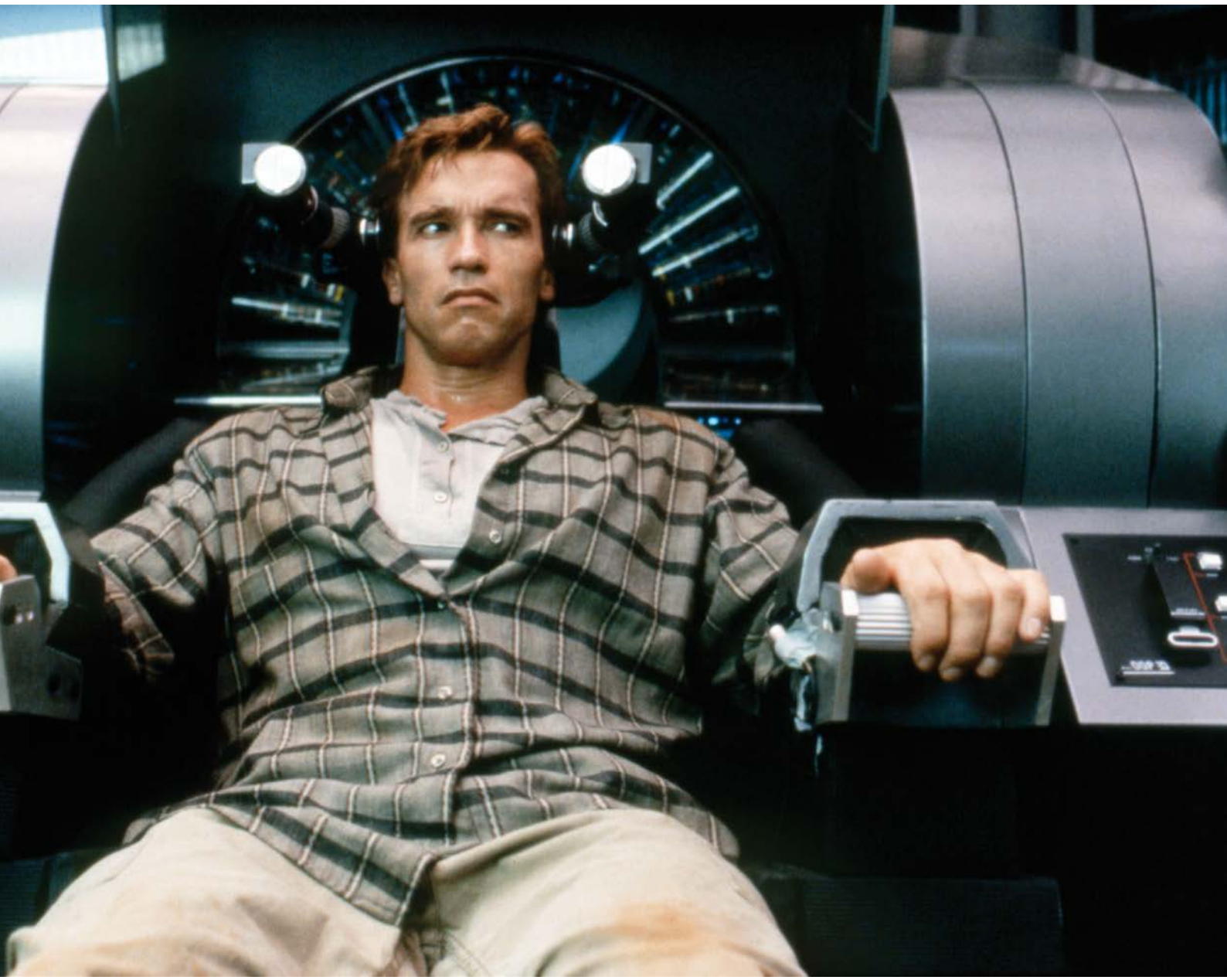
Le zapping de la mémoire

Gommer le souvenir d'une rupture amoureuse, se créer rétrospectivement une enfance heureuse: tout cela devient possible aujourd'hui. Sur des souris... pour l'instant.

Souvenez-vous, c'était il y a presque trente ans. En 1990, le film *Total Recall*, de Paul Verhoeven, sortait sur les écrans. Ce fut un succès commercial et critique. Dans cette adaptation cinématographique de la nouvelle *Souvenirs à vendre*, de Philip K. Dick, Arnold Schwarzenegger joue le rôle d'un homme croyant avoir épousé une belle blonde incarnée par Sharon Stone, et qui s'aperçoit un jour que tout cela est complètement faux: ces souvenirs lui ont été implantés dans le cerveau. Science-fiction? Voire...

Est-ce vrai, ce qu'on dit à propos des expériences sur des souris dont on manipule les souvenirs? Il paraît que l'on peut aujourd'hui allumer ou éteindre les neurones comme avec une télécommande... Le film *Total Recall* n'était-il qu'une sorte d'avant-goût de ce qui nous attend?

La réalité est que nous sommes à l'aboutissement d'un processus entamé il y a deux cent



e film *Total Recall* imaginait un monde où des faux souvenirs pouvaient être implantés dans les cerveaux. Les neuroscientifiques ont rendu cette idée possible.

cinquante ans, lorsque, pour la première fois, on découvrit que le fonctionnement de notre cerveau repose sur les lois de l'électricité. Désormais, à l'électricité s'ajoute le pouvoir extraordinaire de la lumière, toutes deux réunies pouvant alors interférer avec le fonctionnement de l'esprit. Lumière, électricité et neurones, comment tout cela s'assemble-t-il? Rafraîchissons-nous la mémoire...

L'EPOPEE DU NEURONE

En 1781, Mozart vient de composer son opéra *Idoménée, roi de Crète*, qui sera créé à l'opéra de Munich. À peu près au même moment, à l'université de Bologne, Luigi Galvani observe, par hasard, qu'une étincelle peut provoquer, à distance, la contraction d'une cuisse de grenouille sur le nerf de laquelle est placé un scalpel. Il vient de découvrir la notion «d'électricité animale», élément clé d'une révolution scientifique: la compréhension des phénomènes électriques qui parcourent les membranes excitables du monde animal. Dès lors, l'électricité apparaît comme le lien unique qui relie l'esprit au cerveau. On entrevoit dorénavant les phénomènes électrophysiologiques (la façon dont les cellules vivantes produisent de l'électricité) comme

des vecteurs qui permettent d'animer le corps.

Un siècle plus tard, l'Allemand Hermann Ludwig von Helmholtz montrera que ce vecteur «électricité» se propage à l'intérieur de notre corps sous la forme de signaux électriques, à une vitesse variant entre 50 à 100 mètres par seconde. Aussi, en 1816, lorsque l'écrivaine Mary Shelley prépare son *Frankenstein ou le Prométhée moderne*, ouvrage relatant l'histoire d'un démiurge qui utilise la science pour ramener un mort à la vie, c'est tout naturellement à l'électricité que l'auteure attribuera le pouvoir vital de ranimer un corps.

Cinquante ans après la parution de l'ouvrage de Mary Shelley, le neurologue Guillaume-Benjamin Duchenne (surnommé Duchenne de Boulogne) reprend le mythe de l'électricité vitale pour le rendre réel. Il fonde à l'hôpital de la Salpêtrière une discipline neurologique basée sur l'électrothérapie. L'utilisation de courants électriques dans le cadre thérapeutique se répand: on traite ainsi par des stimulations électriques la douleur, les symptômes de la maladie de Parkinson ou encore certains troubles mentaux comme la dépression, l'addiction ou les troubles obsessionnels compulsifs (TOC).

Aujourd'hui, nous avons parcouru bien du chemin. Nous connaissons l'origine de la production électrique par les cellules nerveuses. Nous savons que les neurones sont des cellules excitables dont la membrane est traversée par des ions comme le sodium, le calcium, le chlorure..., et que c'est ce mouvement d'atomes chargés électriquement qui suscite des courants... électriques.

Et pourtant, délivrer du courant dans le cerveau pour atteindre précisément un amas de neurones n'est pas chose facile. C'est pour cette raison que l'électrothérapie s'accompagne parfois d'effets secondaires indésirables. Les neuroscientifiques ont alors cherché un moyen d'être beaucoup plus précis et sélectifs pour activer localement les neurones d'un territoire choisi et non leurs voisins.

FIAT LUX

Ce rêve est aujourd'hui possible en stimulant des neurones, non plus par l'électricité, mais par une source lumineuse. Pour être réceptives à la lumière, les cellules nerveuses doivent avoir été au préalable génétiquement modifiées pour exprimer une protéine, la channelrhodopsine, qui fait office de récepteur à photons (*voir la figure page ci-contre*). Née il y a douze ans, cette technique d'optogénétique est en passe de révolutionner les neurosciences. En alliant la biologie moléculaire (pour modifier spécifiquement le patrimoine génétique de certains neurones) aux méthodes optiques nécessaires pour modifier l'activité des neurones par la lumière, on peut allumer ou éteindre rapidement, comme à l'aide d'un interrupteur, un ensemble de neurones, et par là même contrôler à distance le comportement d'un ver de terre, d'une mouche, d'une souris ou d'un singe. Grâce à l'optogénétique, la lumière permet de maîtriser les fonctions cérébrales des mammifères avec une précision jusque-là inégalée. *Fiat lux*!

SOUVENIRS SUR COMMANDE

Dès lors, la réalité est sur de bons rails pour dépasser la fiction. Ainsi, l'équipe de Susumu Tonegawa (Prix Nobel de médecine en 1987) a montré que certains souvenirs pouvaient être modulés à loisir chez des animaux de laboratoire. En cherchant à comprendre les processus mnésiques et leurs défaillances, ces chercheurs de l'institut technologique du Massachusetts ont montré, en 2012, qu'il était possible de réactiver chez un animal la mémoire d'un événement désagréable, et ce dans un contexte bien différent de celui où ce souvenir s'était formé. Pour cela, il suffit de stimuler par des impulsions lumineuses (délivrées par une fibre optique pénétrant le cerveau) les neurones associés à la mémorisation de l'environnement désagréable, alors que les souris se déplacent dans un environnement... agréable.

Un an plus tard, la même équipe va plus loin: cette fois, il est possible de substituer un souvenir à un autre (et non plus seulement de réactiver le souvenir d'une situation passée), voire d'introduire de faux souvenirs dans la mémoire d'une souris. Pour cela, il a fallu dans un premier temps modifier génétiquement certains neurones des rongeurs situés dans une zone clé du cerveau où se forment les traces mnésiques: l'hippocampe.

Les neurones de cette structure ont été modifiés de manière à les rendre sensibles à des stimuli lumineux sitôt qu'ils sont activés par un nouvel environnement. Concrètement, lorsque ces souris sont placées dans un contexte nouveau, ce contexte active une population bien particulière de neurones dans les circuits de l'hippocampe, y créant une trace mnésique. L'activation de ces neurones entraîne l'expression de la channelrhodopsine quelques heures plus tard. En somme, par la magie de la génétique moderne, les neurones qui ont réagi à un contexte particulier sont devenus sensibles à la lumière, et activables à volonté par ce moyen!

Changeons à présent les souris d'environnement et plaçons-les dans une boîte munie d'une grille électrifiée qui leur envoie des impulsions électriques désagréables (d'intensité modérée) dans les pattes. Au moment où la souris sursaute, activons ses neurones photosensibles avec de la lumière: la mémoire du contexte initial est ainsi activée. La souris associe-t-elle la décharge électrique avec le contexte précédent, où elle ne se trouvait pas

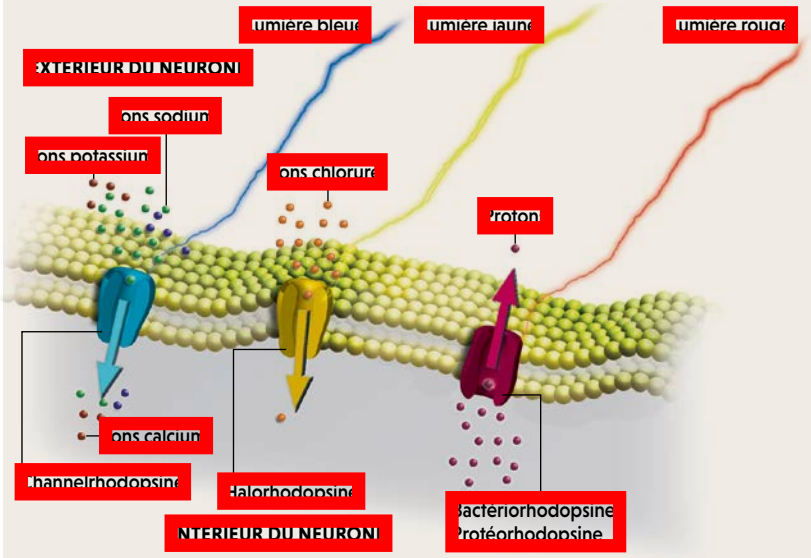
INSOLITE

6000

kilomètres qui séparait les cerveaux de deux rats connectés. L'un a profité de ce que l'autre a appris par l'expérience grâce aux signaux transmis.

CONTRÔLER LES NEURONES PAR LA LUMIÈRE

Des neurones sont rendus sensibles à la lumière grâce à une molécule qu'on y introduit : la channelrhodopsine *(en bleu)*. Cette protéine a la capacité de s'ouvrir et de laisser pénétrer dans les neurones des charges électriques positives (ions calcium, potassium et sodium) lorsqu'elle est illuminée par une lumière bleue. Ce flux de charges positives initie un influx nerveux. D'autres variantes de la channelrhodopsine, comme la halorhodopsine *(en jaune)* ou la bactériorhodopsine/protéorhodopsine *(en rouge)* réagissent à des lumières jaunes ou rouges, et laissent filtrer des charges négatives (ions chlorure) ou des protons (positifs). C'est autant d'outils pour allumer ou éteindre des neurones.



au moment de la décharge ? Oui. Replacée dans son contexte initial, la souris se fige de crainte comme si elle se rappelait avoir reçu un courant électrique dans ce premier lieu, alors que cela s'est passé dans le second.

Extraordinaire manipulation psychique, qui consiste à créer un faux souvenir douloureux dans un lieu où rien de tel ne s'est jamais produit, et dans le même temps un vrai souvenir de douleur dans un lieu où cela s'est effectivement produit (les souris se figent aussi de peur si on les place dans la boîte électrifiée où les courants ont été envoyés pour de bon). Il est ainsi possible d'observer la coexistence dans le cerveau de deux souvenirs désagréables : l'un vrai et l'autre faux – un souvenir artificiel pouvant alors rivaliser avec un souvenir authentique.

Mais il y a plus surprenant encore. Lorsque les chercheurs étudient les structures nerveuses vers lesquelles l'hippocampe envoie des signaux pour déclencher des réactions comportementales, ils s'aperçoivent que la mémoire fictive est tout aussi efficace pour les activer que la mémoire réelle. En somme, les faux souvenirs sont bien des souvenirs, et non une vue de l'esprit. La frontière entre le réel et l'imaginaire est plus ténue que jamais. Ce qui incite à la prudence notamment à l'égard de condamnations prononcées sur la base de témoignages oculaires livrés bien après les faits. En effet, de nombreuses expériences ont montré que les témoins d'une scène d'accident se trompent facilement (et peuvent être induits en erreur, involontairement, par des psychothérapeutes qui cherchent à les faire parler) en croyant avoir aperçu des détails qui n'existaient pas, et dont ils sont pourtant persuadés de se souvenir. Cette découverte scientifique ébranle aussi le fondement des thérapies psychanalytiques basées sur l'évocation de souvenirs intimes, qui peuvent sécréter de faux souvenirs parfois ravageurs.

LES LED DU BONHEUR

À supposer que ces techniques soient un jour adaptées à l'homme, pourrions-nous alors façonner nos souvenirs de manière à les rendre plus idylliques ? Là encore, la réponse pourrait être positive. Des chercheurs de l'université d'Urbana, aux États-Unis, et de Suwon, en Corée, ont implanté une Led dans le cerveau de souris pour activer une région cérébrale importante qui détecte l'obtention d'une récompense. Cette région s'active dès que nous ressentons un plaisir, qu'il s'agisse d'un carré de chocolat, d'un rapport sexuel ou d'une dose de drogue. Lorsque des impulsions lumineuses stimulent cette partie de leur cerveau quand elles se rendent dans une région particulière d'un labyrinthe, les souris, croyant être récompensées, apprennent très vite à revenir et à séjourner dans la zone où elles reçoivent cette gratification virtuelle. Les rongeurs ont été trompés.

Aujourd'hui, les outils issus de l'optogénétique sont si puissants qu'ils permettent de préciser dans quelles conditions un souvenir est gravé dans notre cerveau, et dans lesquelles il est effacé.

On distingue schématiquement plusieurs sortes de mémoire, à court ou à long terme. La mémoire à court terme possède une durée de quelques secondes à quelques minutes, à la manière d'une simple résonance du temps présent dans nos circuits nerveux. Cette mémoire à court terme nous permet de retenir un code pour ouvrir une porte, pendant qu'on nous le dicte au téléphone sans que nous puissions l'inscrire sur une feuille de papier. La mémoire à long terme, quant à elle, se consolide tous les jours durant plusieurs semaines, notamment grâce au sommeil, et peut persister durant toute une vie. Lorsqu'elle est consciente, cette >

forme de mémoire se nomme alors mémoire «déclarative» ou «explicite». Elle correspond à tous les souvenirs que nous pouvons évoquer et décrire à notre entourage. L'autre forme de mémoire à long terme, inconsciente, est qualifiée d'«implicite» ou de «procédurale».

LE CODE DE LA MÉMOIRE

Les théories modernes stipulent que toutes ces formes de mémoire reposent sur des modifications de l'efficacité de la transmission d'information effectuée grâce aux synapses, les connexions entre les neurones. Selon ces mêmes théories, la mémoire se forme au sein de réseaux de neurones qui, après avoir été activés de manière intense ou répétée, gardent une trace de cette activation en renforçant leurs contacts. Ce renforcement des synapses permet ultérieurement à l'information électrique de circuler plus aisément au sein des mêmes neurones, favorisant le rappel du souvenir.

Le mécanisme cellulaire de renforcement des synapses a été découvert par le neurobiologiste Eric Kandel, Prix Nobel de médecine en 2000, et porte le nom de potentiation à long terme. Ce qui est une façon de dire que les contacts entre neurones engagés dans un souvenir sont «potentiés» (rendus plus puissants) durablement lorsqu'une trace mnésique est formée dans le cerveau. À l'inverse, lorsque des souvenirs sont oubliés, un mécanisme opposé, la dépression à long terme, interviendrait – un phénomène indispensable pour pouvoir continuer d'apprendre tout au long de la vie.

Or, si ce concept a été fécond en permettant la découverte de multiples mécanismes moléculaires et cellulaires de l'apprentissage et de la mémoire, sa démonstration expérimentale n'a été délivrée que récemment. Et là encore, grâce à l'optogénétique… L'équipe de Roberto Malinow, à l'université de Californie à San Diego, a ainsi envoyé des stimulations lumineuses dans une partie du cerveau de souris, l'amygdale, pendant que les rongeurs recevaient des chocs électriques modérés aux pattes. Peu à peu, les souris ont associé les stimulations lumineuses de l'amygdale avec la douleur ressentie.

Les conséquences de cet apprentissage au plan comportemental sont notables, puisque les rongeurs ont des réactions de peur violente lorsque leur cerveau est illuminé par des impulsions rapides de lumière produisant une potentiation à long terme, et ce, même si l'animal ne reçoit aucun choc électrique (*voir l'encadré page ci-contre*). En revanche, si les photostimulations sont délivrées à un rythme plus lent, ce qui produit au contraire une dépression à long terme dans les synapses de l'amygdale, le souvenir du choc électrique s'évanouit et les animaux restent paisibles.

Un peu plus tard, lorsque le cerveau des rongeurs se trouve de nouveau illuminé par des fréquences rapides de stimulation, les souvenirs préalablement oubliés resurgissent et les animaux montrent alors un comportement craintif même si les chocs électriques n'étaient plus délivrés!

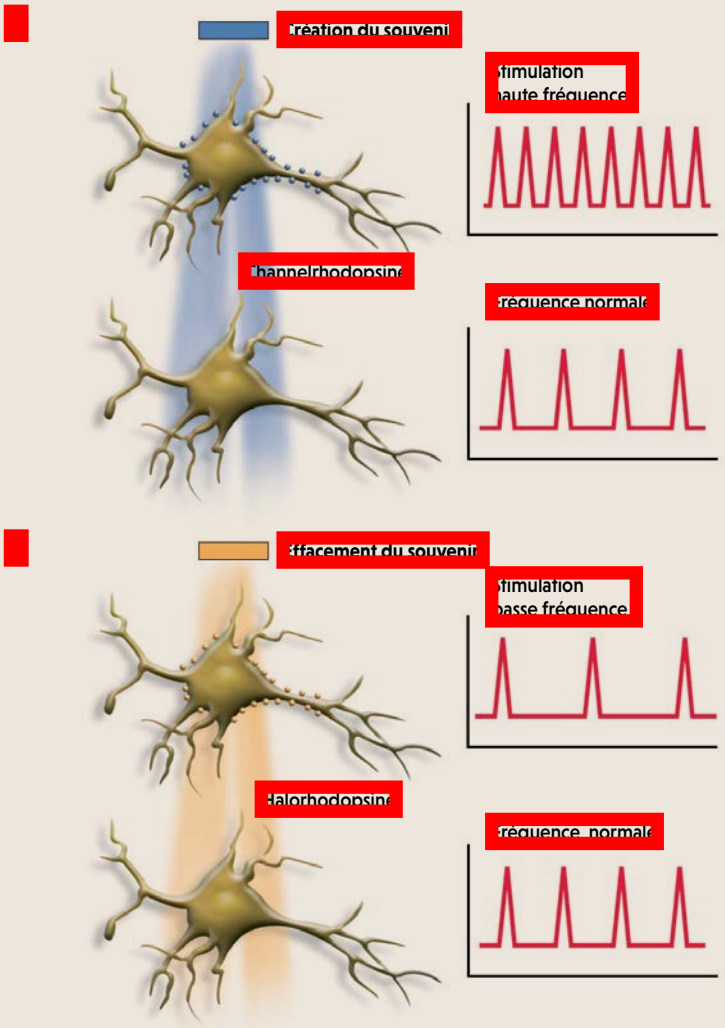
Cette découverte démontre que le simple fait d'enclencher un mécanisme cellulaire de potentiation ou de dépression à long terme dans les neurones suffit pour respectivement effacer ou réactiver une mémoire associative dans le cerveau. Elle montre aussi que la trace biologique de la mémoire (l'engramme) n'est pas immuable, mais relève plutôt d'un processus dynamique qui permet d'encoder de l'information dans nos circuits nerveux, de stocker cette même information puis de restituer, ou non, ultérieurement nos souvenirs. Au travers de cette découverte neurobiologique se dessine ici la preuve expérimentale qui manquait pour interpréter les succès acquis par la psychothérapie cognitivo-comportementale, laquelle propose de modifier les comportements et les pensées en utilisant la plasticité du cerveau.

Sommes-nous aujourd'hui en mesure d'améliorer la condition humaine par un contrôle de son activité mentale? La question est pertinente, car ce qui fait l'humain n'est ni dans son sang, ni dans ses muscles, mais

LES NEUROSCIENTIFIQUES PROVOQUENT LA COEXISTENCE DANS LE CERVEAU DE DEUX SOUVENIRS, L'UN VRAI ET L'AUTRE FAUX. LE SOUVENIR ARTIFICIEL RIVALISE ALORS AVEC LE SOUVENIR AUTHENTIQUE

INSCRIRE UN SOUVENIR OU BIEN L'EFFACER

Pour inscrire un souvenir dans le cerveau, les chercheurs éclairent les neurones avec des impulsions lumineuses à haute fréquence qui stimulent une molécule photosensible, la channelrhodopsine. Les neurones réagissent par des signaux électriques à haute fréquence (*a*), ce qui consolide les synapses et ancre le souvenir. Pour effacer le souvenir, des impulsions lumineuses à basse fréquence stimulent une autre protéine, la halorhodopsine (*b*), provoquant des décharges électriques espacées qui fragilisent les synapses et effacent le souvenir.



surtout dans son cerveau. Dès lors qu'on intervient sur son fonctionnement, les questions fondamentales liées à l'humanité ressurgissent et nous devons plutôt poser la question des conséquences futures qu'entraînerait l'application de ce savoir récent à l'être humain.

La question cruciale est de savoir si nous désirons nous limiter à réparer le cerveau ou si nous acceptons de l'augmenter. Par exemple, si l'on parvient un jour à utiliser de la lumière infrarouge, qui pénètre beaucoup plus en profondeur dans le cerveau, nous pourrions rêver d'applications thérapeutiques exemptes d'effets secondaires en neurologie ou en psychiatrie. Ces « luminothérapies » seraient bien plus efficaces que l'électrostimulation ou les agents pharmacologiques actuels. Mais serons-nous capables de nous limiter à la réparation du cerveau? Il est possible d'envisager de détourner ces méthodes pour augmenter nos capacités cognitives. On imagine sans peine cette technique utilisée un jour pour inhiber l'anxiété ou la peur des soldats partant au front, ou pour maintenir éveillés des automobilistes au volant de leurs véhicules.

Depuis peu, la question des limites de l'application des technosciences à l'humain se pose de façon urgente et répétitive. Rappelons que c'est grâce à l'avènement des technologies convergentes représentées par les nanotechnologies, les biotechnologies, les technologies de l'information et celles des sciences cognitives (NBIC), que les progrès en médecine sont en passe de connaître un élan nouveau.

LA MÉMOIRE AUGMENTÉE

Bien sûr, notre combat contre la mort, la maladie, la douleur, ou la vieillesse n'est pas exclusivement moderne. Il remonte peu ou prou à deux cent cinquante ans et s'est traduit par une augmentation constante de l'espérance de vie qui, en 1750, n'était que de vingt-cinq ans (d'après les estimations de l'Ined), pour atteindre aujourd'hui environ quatre-vingts ans. Ce combat pour la vie s'est nourri progressivement de l'hygiénisme, des progrès de la médecine et de l'invention constante de nouvelles molécules appartenant à la pharmacopée, mais il semble être passé à la vitesse supérieure grâce à l'usage d'outils transgressifs que les NBIC produisent, tels les implants cochléaires, rétines artificielles ou électrodes implantées dans le cerveau pour traiter des malades atteints de Parkinson ou des personnes souffrant de troubles psychiatriques.

Ces « technologies de la convergence » qui se généralisent nous font entrer de plain-pied dans l'ère du transhumanisme, c'est-à-dire une époque où l'humain modifié par la technologie pourrait échapper aux diktats des lois de la nature. Mais est-il souhaitable de réaliser tout ce qui est techniquement possible?

A titre d'exemple, on citera l'appel d'offres lancé en 2014 aux États-Unis par l'Agence de projets de recherche avancée en défense (Darpa), auprès des neuroscientifiques pour les inciter à développer un dispositif implantable qui pourrait pallier les pertes de mémoire des vétérans atteints de lésions traumatiques cérébrales. Deux laboratoires particulièrement

performants dans le domaine de l'épilepsie ont décidé de relever ce nouveau défi.

Rappelons que des patients atteints d'épilepsie résistante à tout traitement médicamenteux ne peuvent être soignés autrement que par voie chirurgicale. Pour préparer l'ablation des zones du cerveau où les crises d'épilepsie prennent naissance, les neurochirurgiens recouvrent préalablement le cerveau de centaines d'électrodes puis enregistrent l'activité électrique cérébrale durant des semaines afin de définir précisément le foyer épileptique. Cette opération permet dans le même temps aux chercheurs de dresser une carte précise du lieu de stockage de la mémoire et de la restitution des souvenirs.

En cherchant à définir des « biomarqueurs » électriques de formation et de récupération des souvenirs, tant normaux que détériorés, chez les patients épileptiques, le neuroscientifique Michael Kahana, directeur d'une équipe de recherche à l'université de Pennsylvanie, a détecté les signatures électriques associées au codage approprié d'un souvenir ou au stockage d'un nouveau souvenir. Il a construit des algorithmes capables de détecter la formation de souvenirs ou leur détérioration – le tout afin de réparer un jour ces défaillances. De telles recherches demeurent dans le cadre d'un cerveau réparé, mais non augmenté.

COMMUNIQUER AU SENS NOBLE !

L'autre laboratoire capable de relever le défi lancé par la Darpa est conduit par le neurologue Itzhak Fried, à l'université de Californie, à Los Angeles. Chez ses patients épileptiques, il montre qu'une stimulation d'une région cérébrale, le cortex entorhinal, améliore les performances de patients participant à un jeu électronique qui exige d'apprendre rapidement, puis de se rappeler à quel endroit déposer des passagers d'un taxi dans une ville virtuelle. Opérant sur des sujets sains, l'équipe d'Itzhak Fried montre que la frontière entre le cerveau réparé et le cerveau augmenté peut être franchie.

Le monde de la recherche sur la mémoire est donc en pleine effervescence. Qui sait de quoi demain sera fait ? Les tenants du transhumanisme voient dans ces avancées l'occasion unique de rêver à un homme débarrassé de ses défauts. Mais encore faudrait-il savoir ce qu'on appelle défaut et qualité. Le progrès doit-il être cherché du côté de soldats du futur ou des prêtres de la diplomatie en temps de crise ?

De même, les prouesses réalisées dans le transfert d'information de cerveau à cerveau sont-elles les garantes d'un monde meilleur ? Je fais référence ici aux expériences menées en 2013 par des chercheurs de Durham et de l'institut des neurosciences Edmond et Lily Safra, au Brésil, qui sont parvenus à connecter les cerveaux de deux rats distants de plus de 5 000 kilomètres, au moyen d'un peigne de microélectrodes implantées dans leur cerveau. L'un des rats est un « apprenant » qui travaille dans une cage pour apprendre comment obtenir une ration d'eau. L'autre rongeur, dit « receveur », reçoit cette même consigne traduite par l'activité mentale de l'apprenant qui lui est délivrée sous la forme d'impulsions électriques dans son cerveau. Le receveur trouve le moyen d'obtenir de l'eau de la même manière, sans effort d'apprentissage.

Les prouesses réalisées dans le transfert d'informations de cerveau à cerveau sont-elles les garantes d'un monde meilleur ?

Grâce à ce dispositif électronique placé à l'interface des deux cerveaux, ces derniers sont non seulement capables de communiquer entre eux mais ils peuvent aussi coopérer. Ces faits spectaculaires montrent que nous ne sommes plus loin des dispositifs permettant de véritablement « lire » les pensées d'autres individus ou d'en prendre le contrôle comme illustré dans le film *Avatar*.

Malheureusement, le perfectionnement des techniques de communication neuronale ne semble pas aller de pair avec nos capacités de communication humaine. Alors que l'humanité n'a jamais été autant connectée et informée à l'échelle de la planète, nous semblons bien incapables de communiquer au sens noble, c'est-à-dire de nous faire comprendre du voisin, de l'autre, de celui qui habite un autre pays ou croit en d'autres dieux ou d'autres pratiques. Les techniques de modulation neuronale peuvent-elles pallier une telle carence ? Il serait présomptueux de l'avancer. Mais elles nous apprennent que notre cerveau est un bien inestimable où résident nos pensées, désirs, souvenirs et rancœurs. C'est en soi un changement de regard qui peut – qui sait ? – nous faire réfléchir dans le bon sens. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. NABAVI *ET AL.*, Engineering a memory with LTD and LTP, *Nature*, vol. 511, pp. 348-352, 2014.

K. TAE-IL *ET AL.*, Injectable, cellular-scale optoelectronics with applications for wireless optogenetics, *Science*, vol. 340, pp. 211-216, 2013.

X. LIU *ET AL.*, Optogenetic stimulation of a hippocampal engram activates fear memory recall, *Nature*, vol. 484, pp. 381-385, 2012.

B. ZEMELMAN, Selective photostimulation of genetically charged neurons, *Neuron*, vol. 33(1), pp. 15-22, 2002.

UN

NE MEURT JAMAIS.

EN TRIANT VOS JOURNAUX, MAGAZINES, CARNETS, ENVELOPPES, PROSPECTUS ET TOUS VOS AUTRES PAPIERS, VOUS AGISSEZ POUR UN MONDE PLUS DURABLE. DONNONS ENSEMBLE UNE NOUVELLE VIE À NOS PRODUITS.

CONSIGNESDETRI.FR

CITEO

Le nouveau nom d'Eco-Emballages et Ecofolio

L'ESSENTIEL

- De nombreuses personnes en souffrance psychique imaginent avoir été victimes d'un viol ou d'un traumatisme.
- Le pouvoir suggestif du battage médiatique et de certains thérapeutes peu vigilants, conduit certaines de ces personnes à construire de faux souvenirs d'agressions hypothétiques.
- Les psychiatres doivent être formés pour distinguer les plaintes imaginaires des véritables situations d'agression.
- Sans quoi la cause des vraies victimes court le risque d'être décrédibilisée.

L'AUTEUR

GÉRARD LOPEZ est psychiatre, président-fondateur de l'institut de victimologie de Paris, vice-président du Conseil national professionnel de médecine légale-expertise médicale.

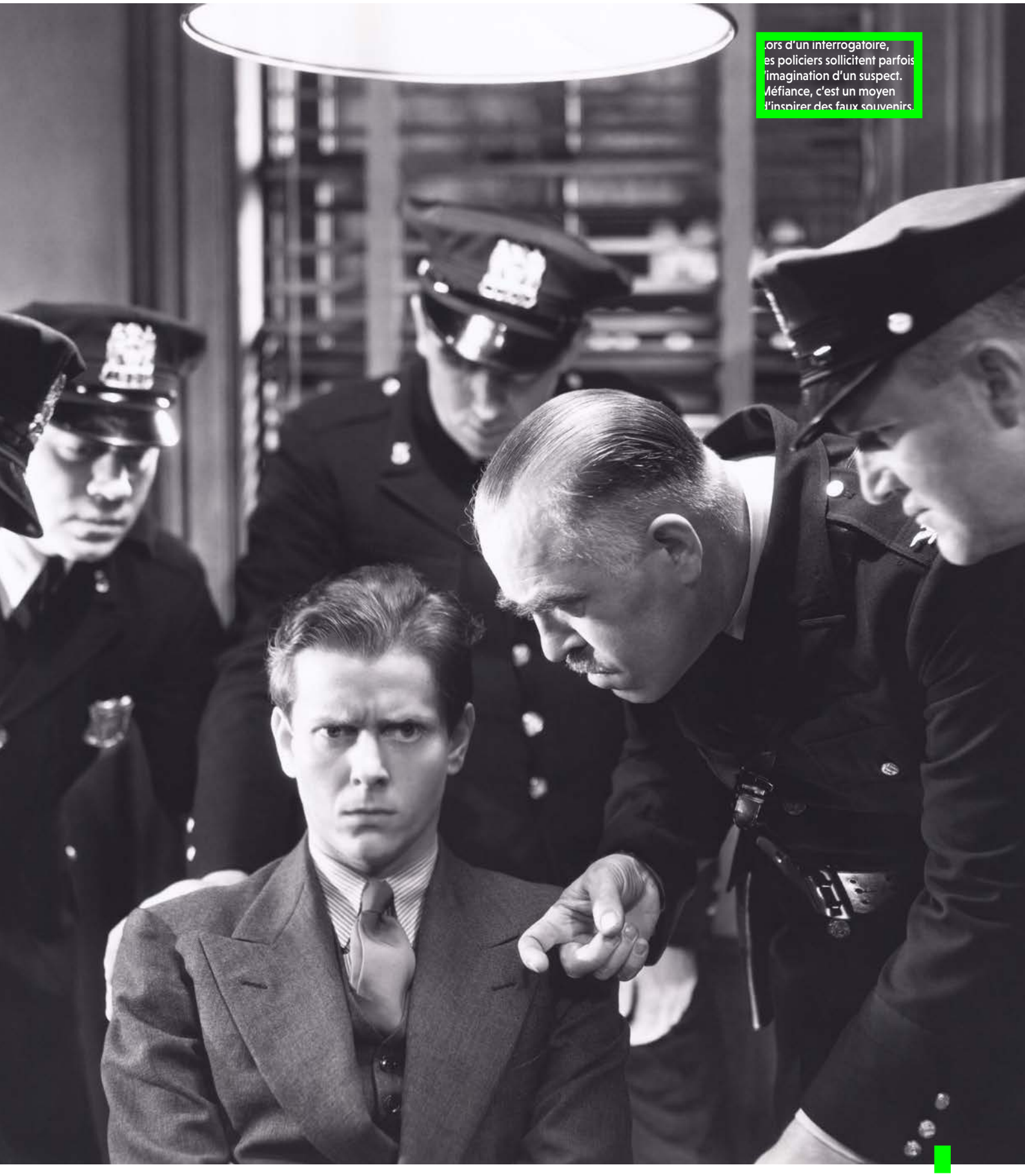
Attention aux faux souvenirs

La mémoire est un processus biologique si fragile et si malléable, que dans des conditions particulières, certaines personnes s'inventent des souvenirs fictifs. Comment démêler le vrai du faux ?

Depuis la chute du producteur Harvey Weinstein, les plaintes pour viol, agression ou harcèlement sexuel se sont multipliées. Des sites internet ont vu le jour, proposant aux femmes de dénoncer les agressions dont elles ont été victimes. Cette libération de la parole a été saluée, mais elle engendre un nouveau risque : celui de susciter des souvenirs d'agression fictifs, ressentis comme réels, mais entièrement produits par le psychisme.

Un fort écho médiatique comme celui reçu par l'affaire Weinstein et le mouvement #MeToo (ou #BalanceTonPorc) qui a suivi, n'est pas le seul exemple de conditions dans lesquelles peuvent naître de faux souvenirs. De fait, lors d'une séance d'hypnose chez un thérapeute, ou pendant un interrogatoire par des policiers (*voir l'encadré page 64*), nos souvenirs peuvent être manipulés au point d'en inscrire de complètement fictifs. En un mot, la mémoire est un processus biologique fragile et influençable. Peut-on la protéger de ces intrusions néfastes ?

Dans les années 1980, de nombreux thérapeutes américains ont soutenu qu'il était possible de faire resurgir des souvenirs de violences



Lors d'un interrogatoire, les policiers sollicitent parfois l'imagination d'un suspect. Méfiance, c'est un moyen d'inspirer des faux souvenirs.

sexuelles réprimés au cours d'une thérapie, notamment l'hypnose et autres techniques, comme celle de la régression en âge (lors de ces séances, le patient revisite sa vie en sens inverse, en état d'hypnose). Le mouvement des Souvenirs retrouvés a même publié un guide décrivant les nombreux symptômes possiblement consécutifs à des violences sexuelles. Des Américains des deux sexes, confortés par des thérapeutes, se sont identifiés à des victimes de violences sexuelles oubliées. Ils ont accusé à tort des proches de les avoir violés. Les conséquences ont été dévastatrices autant pour les accusés parfois condamnés, que pour les plaignants déboutés, les familles, les professionnels de la justice et de la santé impliqués.

UNE EPIDEMIE DE « SOUVENIRS RETROUVÉS »

La Fondation du syndrome des faux souvenirs a lutté contre cette dérive largement idéologique. La chercheuse Elizabeth Loftus est connue pour avoir mis en évidence le risque de récupérer, lors de thérapies suggestives, des « faux » souvenirs (confabulations et fantaisies) dont le sujet est convaincu au-delà de toute critique possible (*voir l'encadré page 64*). La force de conviction de certains praticiens serait en cause, et non une hypnothérapie bien menée. Les études sur ce phénomène ont aussi montré que le degré de soumission (librement consentie) de la part du patient vis-à-vis d'un thérapeute convaincu joue un rôle déterminant dans la formation de ces faux souvenirs.

Ce phénomène a causé une onde de choc dans le monde anglo-saxon. Des familles ont volé en éclats après qu'un de leurs membres s'est fermement convaincu d'avoir été abusé par un père, une mère, un oncle… Il a fallu des procès spectaculaires pour que l'on reconnaisse les dégâts profonds causés par ces méthodes sur le psychisme des patients et sur leur entourage. Au point que le Royal College of Psychiatry a désormais interdit les thérapies suggestives en cas de révélations tardives de violences sexuelles. Le phénomène des « souvenirs retrouvés » a largement régressé outre-Atlantique, mais il pourrait aujourd'hui flamber en Europe si nous n'étions pas suffisamment vigilants. En 2007, déjà, la Mission interministérielle de vigilance et de lutte contre les dérives sectaires mettait en garde contre les faux souvenirs induits par des méthodes psychothérapeutiques, qui seraient en progression en France.

Aujourd'hui, le matraquage des réseaux sociaux, Facebook en particulier et plus généralement la surinformation concernant la fréquence des amnésies dissociatives (qu'aucune étude épidémiologique ne confirme), renforcée par la campagne « Balance ton porc », me semble de nature à induire, par militantisme parfois dogmatique, une nouvelle épidémie de faux souvenirs. Et, par voie de conséquence, une augmentation vertigineuse de plaintes pour viols en abus de faiblesse. En raison de la fascination suggestive de cette campagne médiatique, de plus en plus de sujets fragiles ou en difficulté, après avoir surfé sur des sites internet ou avoir vu ou lu une émission ou un article consacrés au sujet, acquièrent le sentiment – voire la certitude – d'avoir été violés dans leur enfance. Ils consultent des professionnels de santé parfois imprudents qui valident leurs allégations. Ils citent des sites internet qui expliquent à profusion, en les simplifiant et en leur accordant parfois un rôle exagéré, voire unique, les bases neurobiologiques de la dissociation entre le cerveau émotionnel et le cortex préfrontal, même s'il est incontestablement prouvé que le risque de résurgence d'un souvenir traumatique peut entraîner un trouble dissociatif.

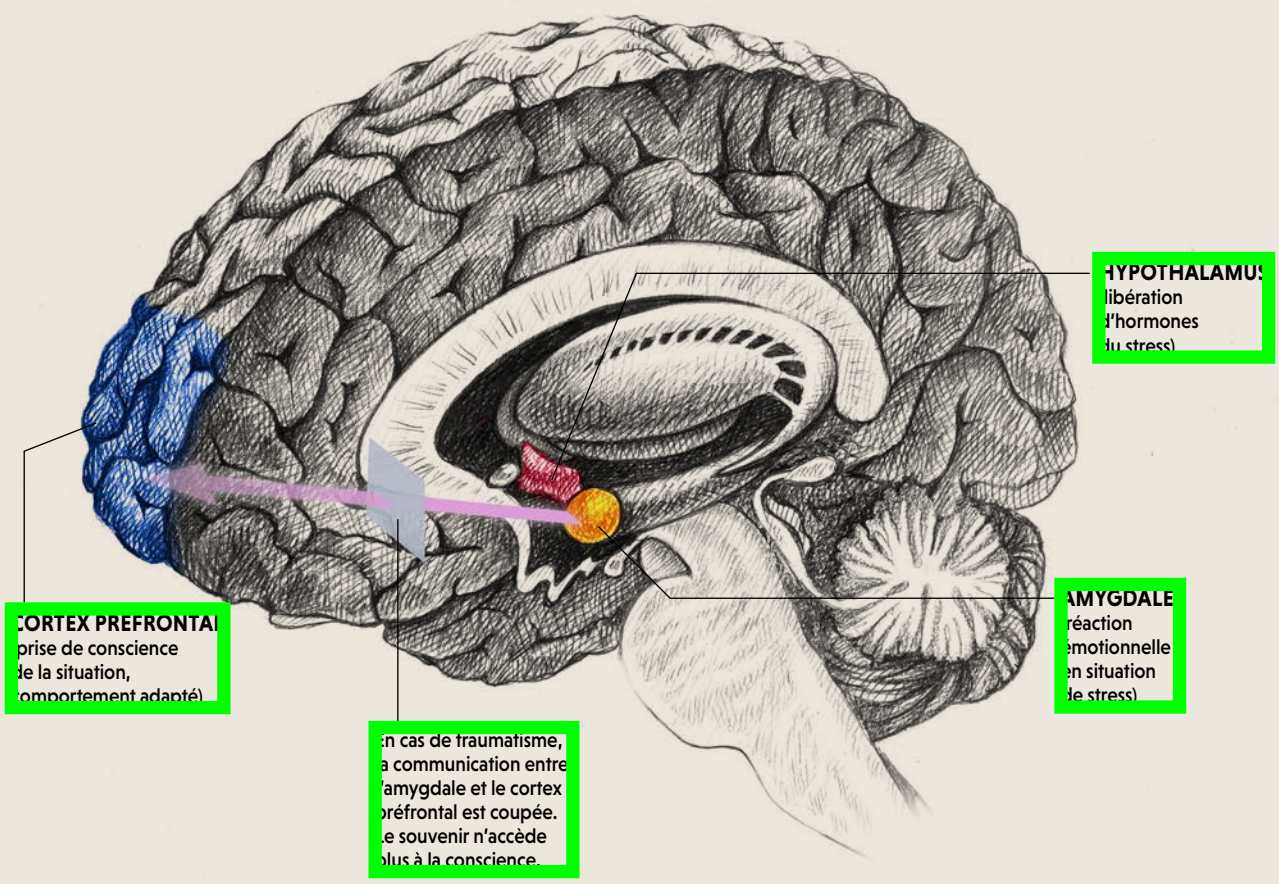
Aujourd'hui, au Centre du psychotrauma, un centre médicosocial qui suit 1000 traumatisés et réalise plus de 13000 actes de soins par an, nos équipes de praticiens constatent une recrudescence de patients qui consultent en pensant, voire en étant convaincus d'être « dissociés », c'est-à-dire victimes d'un processus de répression du souvenir traumatique qui serait entré en dormance, inaccessible à la conscience (*voir l'encadré page ci-contre*). Ces patients sont souvent confortés en cela par des praticiens non expérimentés qui nous les adressent.

Ce phénomène a atteint une telle ampleur, que ces derniers temps, des patients réclament désormais des scanners fonctionnels pour se conforter ou convaincre leurs proches, et plus souvent encore depuis la diffusion du documentaire de Flavie Flament *Viol sur mineurs: mon combat contre l'oubli*, où celle-ci exhibe un scanner de son propre cerveau, à l'appui de ses déclarations. Dans cette affaire, rappelons qu'à l'âge de 35 ans, au cours d'une psychothérapie, l'animatrice s'est rappelé avoir été violée à l'âge de 13 ans, viol dont elle n'avait aucun souvenir, en raison, selon elle, d'une amnésie traumatique. Désignée experte par Laurence Rossignol, alors ministre des Familles, de l'Enfance et des Droits des femmes, elle s'est vu attribuer une mission de consensus ministériel sur un éventuel allongement du délai de prescription des viols commis sur mineurs.

Du fait que l'attention se porte sur le harcèlement, le viol et ses effets délétères (ce qui,

QUELLE QUE SOIT LA VÉRACITÉ DES ALLÉGATIONS D'UN(E) PLAIGNANT(E), UNE PRISE EN CHARGE THÉRAPEUTIQUE EST NÉCESSAIRE

QU'EST-CE QUE LA DISSOCIATION TRAUMATIQUE ?



Certaines victimes d'agressions ou de viol ont vécu un traumatisme si puissant que le souvenir de l'événement est enfoui dans [illegible] et devient inaccessible à la conscience. Il faut alors un événement déclencheur, qui peut survenir des années plus tard, pour faire remonter l'événement à la mémoire. Aujourd'hui, cette réaction neurobiologique est connue et même visible en imagerie fonctionnelle. Lorsqu'un sujet est confronté à un stimulus stressant mais non traumatique, les amygdales cérébrales provoquent une réaction émotionnelle qui active l'hypothalamus, lequel déclenche la sécrétion d'adrénaline (ce qui provoque une réaction d'alarme) et de cortisol ayant une fonction d'adaptation à la situation). L'énergie du sujet est mobilisée pour faire face au danger ou fuir, mais dans les millisecondes qui suivent, l'hippocampe informe les cortex préfrontal et cingulaire, qui remettent la situation dans son contexte et annulent la réaction de stress.

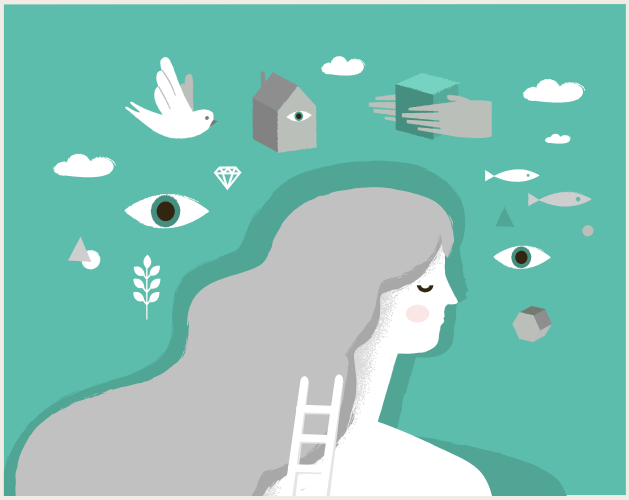
En revanche, lorsqu'il s'agit d'un événement traumatique, l'hyperstimulation des amygdales enclenche une réaction neurobiologique intense qui coupe les afférences du cerveau émotionnel vers le cortex cérébral. Le vécu du sujet reste piégé dans le cerveau émotionnel, ce qui peut déclencher une amnésie émotionnelle dissociative : le souvenir du traumatisme devient inaccessible à la conscience. Ce mécanisme permet à la victime de ne pas revivre les événements traumatiques subis.

À un stade moins aigu, les victimes recourent de manière préventive à des comportements paradoxaux pour se mettre en état d'anesthésie émotionnelle, afin de ne pas revivre les émotions négatives vécues par le passé : il peut s'agir de conduites addictives, de mises en danger de soi, de conduites autoagressives comme la scarification, ou les tentatives de suicide, de conduites sexuelles dangereuses (rapports sexuels non protégés, sexualité violente, multiplication des partenaires, rapports avec des inconnus, prostitution, pornographie), ou encore de conduites délinquantes récidivantes avec vols, destructions de biens ou comportements violents.

GARE AUX MANIPULATIONS

En 1986, Nadean Cool, aide-soignante dans le Wisconsin, consulte un psychiatre **pour un traumatisme vécu par sa fille.** Le thérapeute utilise alors l'hypnose et d'autres techniques de suggestion pour savoir si Nadean n'aurait pas elle-même été maltraitée et si elle n'en aurait pas refoulé le souvenir. Après quelques séances, elle est convaincue qu'elle a effectivement été utilisée par une secte satanique qui lui aurait fait manger des bébés, l'aurait violée, lui aurait fait avoir des rapports sexuels avec des animaux et l'aurait forcée à regarder le meurtre de son ami âgé de 8 ans.

Le psychiatre finit par lui faire croire qu'elle a plus de cent vingt personnalités (enfants, adultes, anges, canard...). Le psychiatre pratique plusieurs séances d'exorcisme destinées à faire sortir Satan de son corps. Lorsque Nadean Cool comprend qu'on lui instille de faux souvenirs, elle poursuit le psychiatre en justice. En mars 1997, l'affaire se règle à l'amiable par une indemnité de 2,4 millions de dollars versés par le psychiatre. La suggestion et l'imagination suffisent donc à ancrer de faux souvenirs. Nadean Cool n'est pas un cas isolé. Comment établir l'authenticité de souvenirs? Sans corroboration, la différence entre les vrais et les faux souvenirs est difficile. Aujourd'hui, la fausseté n'est établie que lorsque les faits contredisent les souvenirs. Pourrait-on trouver d'autres moyens de distinguer les vrais souvenirs des faux? Et pourquoi des personnes en viennent-elles à imaginer de faux souvenirs aussi élaborés? Plusieurs équipes explorent ces phénomènes.



L'hypnose, lorsqu'elle est pratiquée par un thérapeute peu scrupuleux, est un moyen efficace d'ancrer des faux souvenirs.

Après plus de vingt ans de recherche sur la puissance de la désinformation, nous connaissons mieux les conditions qui rendent les personnes sensibles à la suggestion. Nous avons notamment montré que les souvenirs les plus anciens sont le plus facilement manipulables. Ensuite, les pressions sociales exercées sur un individu, comme un chercheur sur un participant, favorisent l'apparition du faux souvenir. Enfin, on peut les encourager à ne pas s'interroger sur la réalité de leurs constructions. Les faux souvenirs se créent facilement lorsque ces facteurs externes sont présents, dans une situation expérimentale, dans un contexte thérapeutique ou dans les activités quotidiennes.

Les faux souvenirs s'élaborent par combinaison de vrais souvenirs et de suggestions provenant d'autres personnes. Au cours du processus, les sujets sont susceptibles d'oublier la source de l'information. C'est un exemple de confusion de source, où le contenu et la source sont dissociés. Quelles leçons la justice ou la psychiatrie, par exemple, doivent-elles tirer de ces études? Bien que les policiers, qui mènent les interrogatoires de suspects et de témoins, ou les psychothérapeutes aient rarement recours aux techniques de suggestion, ils proposent souvent des exercices d'imagination. Ainsi, les policiers demandent parfois aux suspects d'imaginer avoir participé à un crime, et certains psychothérapeutes encouragent leurs patients à imaginer des événements de leur enfance afin de retrouver des souvenirs enfouis. Or l'imagination peut également stimuler la construction du souvenir. Pour étudier ce phénomène, nous avons conçu une procédure en trois étapes. Nous avons d'abord demandé à des sujets d'indiquer la probabilité que quarante événements se soient produits au cours de leur enfance. Deux semaines plus tard, nous avons demandé aux participants d'imaginer qu'ils avaient vécu huit de ces événements, dont ils avaient dit qu'ils ne s'étaient pas produits. Puis nous avons de nouveau demandé aux sujets d'évaluer la probabilité qu'ils aient vraiment vécu les quarante événements. Résultat? Le sentiment d'avoir réellement vécu un événement augmente notablement chez les participants qui ont eu à l'imaginer. Cet effet d'«inflation de l'imagination» s'explique: le fait d'imaginer un événement le rend plus familier, et la familiarité serait alors faussement associée aux souvenirs. Une telle confusion (oublier la source d'une information) peut être particulièrement aiguë pour les expériences enfantines. Ces travaux obligent à mettre en garde les professionnels: ils doivent savoir qu'ils risquent d'influencer leurs interlocuteurs.

Elizabeth Loftus est professeure émérite à l'université de Californie, à Irvine

pourlascience.com/apnave

une fois de plus, est salutaire autant pour les victimes que pour la société dans son ensemble), certaines personnes croient pouvoir rattacher à de tels épisodes de l'enfance une souffrance psychique dont les origines sont totalement différentes.

Parfois, ce sont tout simplement des schizophrènes non repérés, en errance thérapeutique, en quête d'explication à leur souffrance, qui s'identifient au discours sur la « mémoire traumatique » porté par les médias, des psychiatres, des associations et des politiques. Comme cette fois où un psychotique s'est présenté au Centre, attribuant ses hallucinations à des traumas sexuels dont il n'avait aucun souvenir, en livrant un discours plaqué sur des éléments qu'il avait glanés sur les réseaux sociaux. Or, on ne rappellera jamais assez qu'il n'existe aucun test psychologique, aucun « sérum de vérité », aucun examen paraclinique, aucune mesure de la taille de l'hippocampe ou des amygdales cérébrales qui, à eux seuls, permettraient de distinguer le vrai du faux. Des éléments complémentaires, indices ou témoignages de tiers notamment, sont indispensables pour valider ce type d'accusations.

IL N'Y A PAS DE « SÉRUM DE VÉRITÉ »

Confronté à ces plaintes, le psychiatre ou psychothérapeute doit prêter une attention particulière aux circonstances du rappel des souvenirs traumatiques, et de la parole des personnes qui entourent la victime. Certain(e)s patient(e)s vivent réellement la résurgence d'un souvenir traumatique jusque-là « dissocié » : c'est le cas de Madeleine, infirmière, qui présente des troubles somatiques sévères à chaque fois qu'elle entame une nouvelle relation amoureuse.

Elle vient de se mettre en ménage avec un homme bienveillant. Dans les mois qui suivent, elle présente un cancer du col de l'utérus et une parodontolyse aiguë (une destruction de l'os de la mâchoire où s'enracinent les dents). Après deux interventions chirurgicales, elle entame une nouvelle psychothérapie. Quelques mois plus tard, sa thérapeute lui propose un séminaire de « développement personnel ».

Le soir du premier jour, pendant une séance de relaxation avant le dîner, elle est prise de mouvements du bassin à connotation sexuelle qui inquiètent les stagiaires. Le lendemain, avant de prendre sa voiture pour rentrer chez elle, lors d'une nouvelle séance de relaxation, elle s'entend dire à claire et intelligible voix : « Ton père te viole ! Ton père te viole ! » Les stagiaires, stupéfiés, lui parlent de ses comportements sexualisés de la veille.

Elle ne prendra pas cette phrase au sérieux avant que ses deux sœurs plus âgées lui aient dit qu'elles pensaient l'une et l'autre avoir été les seules victimes de leur père, ce dont elles se souvenaient parfaitement, mais qu'elles avaient gardé secret.

Dans le cas de Madeleine, il s'agit véritablement d'une levée d'amnésie dissociative, suite à un état de relaxation qui a permis au souvenir traumatique de franchir le barrage du système émotionnel pour atteindre le cortex et devenir conscient, mais sans aucune suggestion de la part de sa thérapeute et surtout avec une validation par les dires de ses sœurs. Unies, elles obtiendront la condamnation pénale de leur père.

Peut-on en dire autant de Marine ? A 40 ans, elle consulte un ostéopathe, également président d'une association de victimes. Celui-ci lui affirme, au cours d'une manipulation osseuse, qu'elle a été victime d'une agression sexuelle. Devant ses dénégations virulentes, il est catégorique. Elle a désormais la conviction inébranlable qu'elle a été violée par son père dans son enfance. Toute la famille est liguée contre lui. La résurgence est accompagnée d'une forte suggestion de la part d'un thérapeute, et sans confirmation par un élément de l'entourage.

Comment distinguer la vérité du fantasme ? Le psychiatre néerlandais Bessel van der Kolk, fondateur du centre du trauma de Brookline, dans le Massachusetts, a été de ceux qui postulaient que le corps ne ment pas, et que l'apparition soudaine d'un flash-back associé à une réaction de peur représente un signe fiable. Mais pour deux autres psychiatres, Robert Sadoff et L. L. Dubin, il faut impérativement prévenir le patient que toute récupération d'un souvenir réprimé nécessite une confirmation par des éléments matériels, témoignages, photos, écrits, cadeaux, mais aussi de certificats médicaux, surtout si le sujet envisage des suites judiciaires. C'est précisément le cas de Madeleine, mais qui pourrait sérieusement affirmer que Marine a réellement été victime d'inceste, ou déclarer avec certitude que cela n'a pas été le cas ?

Il n'est pas question d'alimenter le déni dont sont souvent frappées les violences sexuelles, ce qui pourrait être malheureusement le cas si de nombreuses plaintes se révélaient abusives, quelle que soit la sincérité des plaignant(e)s et les imperfections de la justice. Dans tous les cas, quelle que soit la véracité de ces allégations, une prise en charge thérapeutique est nécessaire. Il faut certes œuvrer pour libérer la parole des survivants, mais sans « fabriquer » autant de faux coupables que de « fausses victimes », accablés par un sentiment d'injustice conforté par des thérapeutes imprudents ou des idéologies sectaires. Cela souligne l'absolue nécessité d'une formation en psychotraumatologie, validée par des comités pédagogiques qui se fondent sur la recherche et non pas sur des opinions, fussent-elles assourdissantes, pour éviter la catastrophe qui semble se profiler. ■

BIBLIOGRAPHIE

G. GORMAN, The recovered memory controversy – A new perspective, *European Journal of Clinical Hypnosis*, vol. 8(1), p. 22, 2008.

E. LOFTUS & K. KETCHAM, *Le Syndrome de faux souvenirs*, Exergue, 1997.

B. VAN DER KOLK, The body keeps the score: Memory and the evolving psychobiology of post-traumatic stress, *Havard Review of psychiatry*, vol. 1, 1994.

R. SADOFF ET L. DUBIN, The use of hypnosis as a pretrial discovery tool in civil and criminal lawsuits, *in* C. H. Wecht, *Legal Medicine*, Butterworth Legal Publishers, 1990.

L'ESSENTIEL

- Chaque événement extrême semble sans précédent. Pourtant, ce n'est qu'un effet d'une «perte de mémoire».
- Ce phénomène nuit à toute préparation à la gestion de crise et à la culture du risque, pourtant nécessaires dans nos sociétés toujours plus vulnérables à l'aléa climatique.
- Pour y remédier, l'histoire des risques et du climat doit être réhabilitée, car elle constitue un outil privilégié de prévention.
- Les spécialistes en tirent les leçons et des mesures applicables dont les institutions politiques devraient s'emparer.

L'AUTEUR

EMMANUEL GARNIER, membre du laboratoire Chrono-environnement, à l'université de Besançon

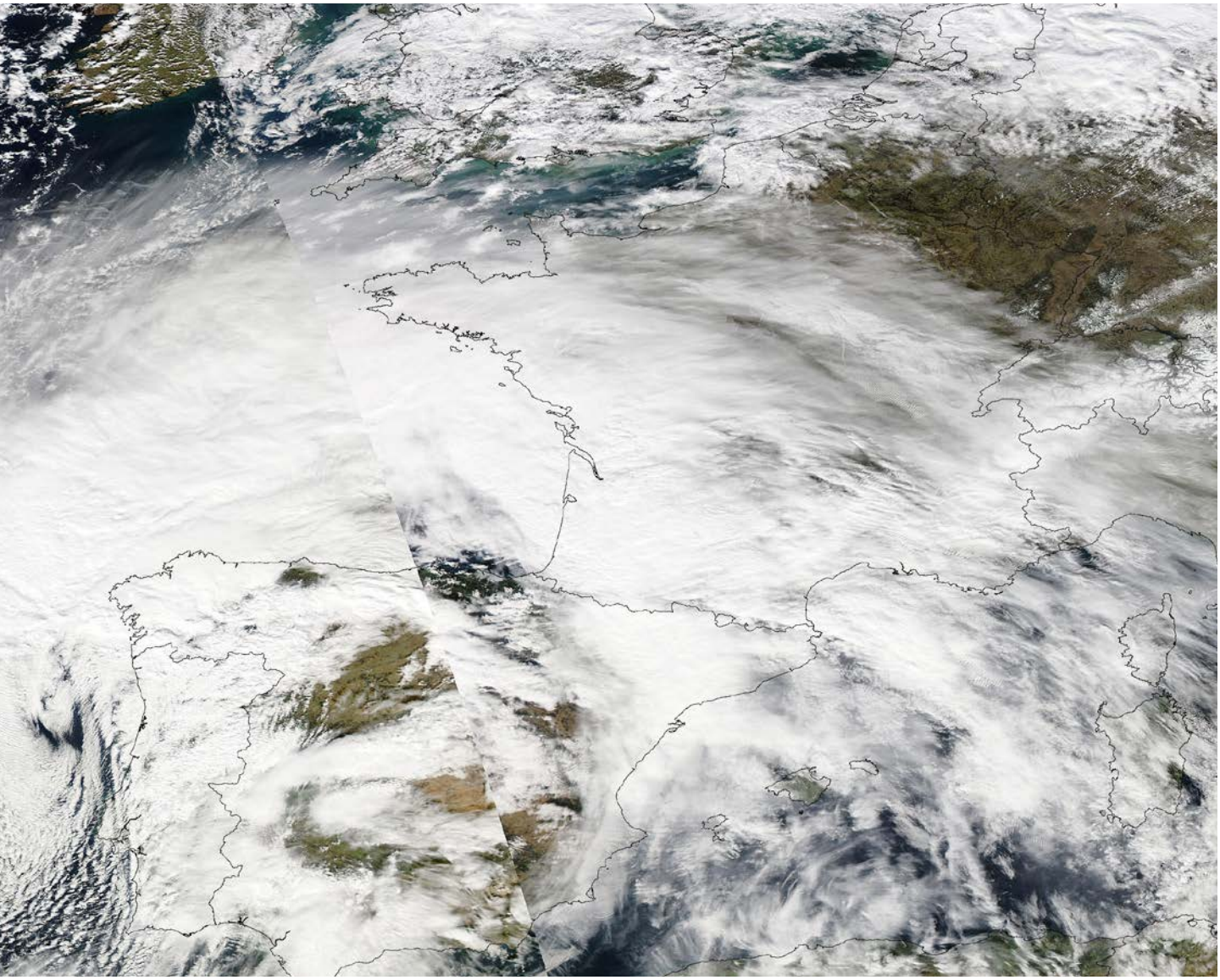
Une meilleure résilience face aux catastrophes

Le souvenir d'événements extrêmes, comme la tempête Xynthia en 2010, s'efface rapidement. Comment se rafraîchir la mémoire et mieux se préparer ? Grâce aux historiens !

«Un véritable raz de marée qui déferle sur les côtes atlantiques!» C'est en ces termes apocalyptiques que le quotidien *Ouest-France* évoque la tempête qui submerge le littoral atlantique entre le sud de la Bretagne et la frontière espagnole. Sur le site de La Faute-sur-Mer, la digue est coupée en plusieurs endroits et des militaires interviennent pour épauler les habitants de l'Aiguillon. S'agit-il de la tempête Xynthia du 26 février 2010? Non, d'un autre événement de même nature, mais qui a eu lieu soixante-dix ans plus tôt, en mars 1937... alors que la commune de La Faute-sur-Mer n'était même pas encore sortie de terre. Pourtant, il y a neuf ans, élus, ministres et médias n'ont eu de cesse d'affirmer que la tempête Xynthia relevait «d'un phénomène jamais vu depuis des siècles»!

LE DOGME DE L'INÉDIT

De telles affirmations sont assez systématiques au lendemain de tout désastre naturel, alors même que le rapport SREX du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) du 28 mars 2012 sur l'adaptation de la gestion des risques d'événements extrêmes au changement climatique déplore que la plupart des données «historiques» se rapportant à ces



La tempête Xynthia, en février 2010, a submergé les côtes européennes, du Portugal à la Scandinavie, faisant plusieurs dizaines de victimes. Combien de temps le souvenir de cette catastrophe restera-t-il gravé dans nos mémoires ?

événements se limitent à une période récente. Malheureusement, ce dogme de «l'inédit» se révèle néfaste sur le long terme: bien que la proposition de loi adoptée au Sénat le 3 mai 2011 à la suite de Xynthia revendique une «préparation à la gestion de crise et à la culture du risque», ses modalités pratiques, parce qu'elles s'appuient sur le caractère inédit, et donc imprévisible, des événements extrêmes, occultent la vulnérabilité croissante de nos sociétés.

Dans cette perspective, cependant, les sciences sociales apportent une contribution originale. Depuis plusieurs années, plusieurs enquêtes conduites par des historiens français dans le cadre de programmes transdisciplinaires nationaux et internationaux (Union européenne, Royaume-Uni), visent à étudier, d'une part, l'évolution de la fréquence des événements extrêmes au cours des cinq cents dernières années et, d'autre part, la gestion des risques au fil de l'histoire. Les résultats obtenus à propos des tempêtes, des submersions ou des sécheresses montrent que ces événements sont récurrents, mais de fréquence aléatoire, sans recrudescence particulière.

En Europe, le XVIII[e] siècle fait figure de période à risques en raison de températures plutôt élevées, associées à des tempêtes et à des sécheresses récurrentes. Hormis le rude hiver 1709, les années 1705-1740 sont marquées par des étés très chauds à Paris, observés et mesurés à l'époque par les scientifiques de l'Académie des sciences. L'expérience historique donne donc tout son sens à la notion souvent négligée de variabilité, géographique ou historique. Ainsi, alors que les Français percevaient

Xynthia comme inédite, les Britanniques, les Hollandais et les Allemands savaient que ce risque littoral demeurait, eux qui avaient affronté de telles catastrophes en 1953 et en 1962. *A contrario*, l'approche historique consacrée aux cyclones dans l'océan Indien depuis le XVII[e] siècle souligne une recrudescence de ces aléas depuis les années 1960, sans que ceux-ci soient plus forts pour autant.

L'ATTENTE DU RISQUE

L'histoire de la gestion du risque est aussi riche d'enseignements. Contre toute attente, le risque n'était pas vu jadis comme une fatalité, mais plutôt comme une attente : le souvenir d'une catastrophe passée créait une conscience collective d'une menace maritime permanente. Par peur que l'événement ne se reproduise, les populations percevaient le danger et se tenaient prêtes à agir. Pour maintenir cet état d'attente, la communauté veillait à entretenir le souvenir de ces événements sous des formes diverses et originales, par exemple des *ex-voto* marins pour les tempêtes ou les repères de crues pour les submersions.

À Toulouse, au XVIII[e] siècle, les habitants des quartiers exposés aux inondations savaient qu'ils devaient atteindre la rue des Couteliers pour se mettre à l'abri. À Paris, des repères sur l'échelle du pont de la Tournelle indiquaient le degré de gravité des crues de la Seine. Au cours de la grande inondation de 1784, en fonction du niveau constaté, le libraire Hardy surélevait ses meubles et s'installait au premier étage de sa maison située sur l'île de la Cité. Les enquêtes orales dans les Cyclades, en Grèce, ont mis en lumière un exemple d'adaptation agricole original à la sécheresse, puisque les habitants avaient sélectionné des légumes capables de pousser sans eau. Connues localement sous le nom de plantes « anhydro », leurs semences sont aujourd'hui en passe de disparaître, car moins productives que les cultures intensives sous serres, alors que la sécheresse augmente dans cette région.

Plus proche de nous encore, la grande submersion atlantique de 1937 n'avait provoqué aucun décès dans le secteur de La Faute-sur-Mer. La ville n'existait pas encore, à peine s'y trouvaient quelques cabanes de pêcheurs. Quant à L'Aiguillon-sur-Mer, elle se développait derrière la protection naturelle des deux cordons dunaires. Depuis, trois mille maisons ont été construites sur d'anciennes zones marécageuses situées sous le niveau de la mer. En occultant les risques encourus, les aménageurs ont rendu ces secteurs plus vulnérables aux aléas marins. La multiplication des intérêts économiques et politiques depuis la création de la commune, en 1953, combinée à une perte de mémoire locale, expliquent le lourd bilan humain de Xynthia (cinquante-trois décès).

nstallé en juillet 2016, un panneau indique a hauteur atteinte par es eaux en février 2010, La Faute-sur-Mer, lors de la tempête Xynthia. De tels supports de mémoire peuvent-ils ider à mieux se préparer u pire ?

JADIS, LE SOUVENIR D'UNE CATASTROPHE PASSÉE CRÉAIT UNE CONSCIENCE COLLECTIVE D'UNE MENACE PERMANENTE

Les groupes, observatoires ou comités dédiés à l'indispensable prévention des risques se sont multipliés depuis 2010, sous la pression des instances européennes notamment. Ils sont constitués majoritairement de représentants de l'État et d'ingénieurs. Leur composante scientifique rassemble essentiellement des spécialistes tels que des climatologues, des météorologues ou des hydrologues. Dans ces conditions, les remèdes préconisés ne sont pas forcément adaptés aux attentes des populations. Pourquoi ?

Les ingénieurs et les scientifiques des sciences exactes ont souvent l'habitude de vouloir maîtriser le risque en le modélisant et en édifiant des systèmes de défense en dur (digues, barrages…) plutôt que de recréer des espaces durables plus résilients face aux catastrophes. Le plus souvent, ces constructions coûteuses pour le contribuable débouchent sur un sentiment de sécurité illusoire qui autorise la poursuite de l'urbanisation dans les zones vulnérables. Cette réalité s'est vérifiée en septembre dernier lors de l'inondation du nouvel hôpital de Carcassonne, construit dans une zone inondable et « protégé » par des ouvrages réputés « insubmersibles ».

La modélisation livre des scénarios contradictoires et complexes sur le plan mathématique pour le citoyen. Par ailleurs, les systèmes de défense onéreux et leur entretien ont été hypothéqués par la crise économique. On voit alors mal comment l'objectif ministériel et sénatorial visant à promouvoir une « culture du risque » parmi nos concitoyens pourrait être atteint si l'histoire des risques et du climat est occultée, alors même qu'elle constitue un outil privilégié de prévention. L'apport des sciences sociales n'a de sens que si elles produisent des résultats « appliqués » et si les instances scientifiques soutiennent cette recherche transdisciplinaire. Aujourd'hui, ce n'est pas le cas en France. ■

BIBLIOGRAPHIE

É. GARNIER, La mer, cet ennemi de plusieurs siècles, Trajectoires de vulnérabilités et défense contre la mer de l'Antiquité au XX[e] siècle, *PUCA-ministère de la Transition écologique et solidaire*, 2018. http://bit.ly/2zMMIzC

É. GARNIER *ET AL.*, Historical analysis of storms events: case studies in France, England, Portugal and Italy, *Coastal Engineering*, vol. 134, pp. 10-23, 2017

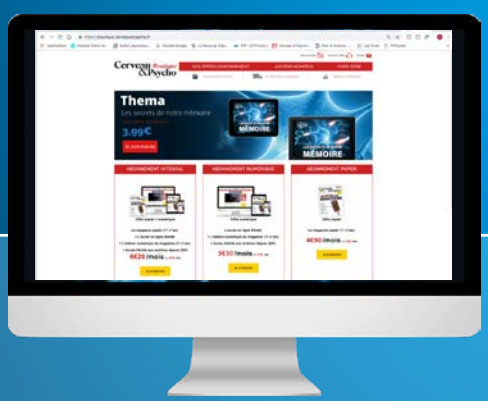
Cerveau & Psycho
THEMA

Découvrez notre hors-série numérique

LES SECRETS DE NOTRE MÉMOIRE

80 pages pour comprendre comment fonctionne votre mémoire

3,99 €



Les *Thema* sont une nouvelle collection de hors-séries numériques. Chaque *Thema* rassemble une dizaine d'articles de référence sur un sujet.

1. Commandez le *Thema* sur **boutique.cerveauetpsycho.fr**
2. Rendez-vous sur votre compte client, dans la rubrique **Ma bibliothèque numérique**
3. **Téléchargez le PDF** directement depuis votre tablette
4. Bonne lecture !

Rendez-vous sur

boutique.cerveauetpsycho.fr

ATTENTION, DANGER

L'ESSENTIEL

- L'apprentissage par cœur, parfois décrié, revient au goût du jour, car on découvre qu'il développe la mémoire lexicale.
- L'acquisition d'un vocabulaire plus étendu et de notions plus nombreuses dépend aussi de la mémoire sémantique, ou mémoire du sens.
- L'important est de ne pas « saturer » l'élève de connaissances.
- Des études récentes livrent quelques méthodes simples pour ne pas transformer l'apprentissage en torture inutile.

L'AUTEUR

ALAIN LIEURY
était professeur émérite de psychologie cognitive de l'Université Rennes 2.

Apprendre par cœur ou comprendre ?

Les deux sont indissociables ! Les recherches montrent qu'il faut valoriser l'apprentissage par cœur, mais que l'acquisition des connaissances fait nécessairement appel à la compréhension et à une mémoire du sens nommée mémoire sémantique. L'Éducation nationale doit s'emparer de ces enseignements.

À quel mode doit-on conjuguer le verbe qui suit l'expression « après que » ? Comment nomme-t-on la tige d'une feuille ? Que s'est-il passé le 16 novembre 1532 ? De quel pays la ville de Banjul est-elle la capitale ? Lorsqu'un élève doit assimiler des connaissances, il a l'impression d'apprendre par cœur. Il faut bien en passer par-là, même si cela peut sembler inutile. Après tout, les smartphones donnent aujourd'hui accès à Internet et toutes les réponses à la moindre question sont à portée de main ! Mais ce serait une grave erreur que d'abandonner le « par cœur », car il a son rôle à jouer dans l'apprentissage au sens large. Qui plus est, la mémoire étant multiple, d'autres méthodes sont également nécessaires.

L'attitude des philosophes, psychologues et neuroscientifiques sur la mémorisation a connu de multiples rebondissements. De l'Antiquité à la Renaissance, la mémoire était la faculté la plus précieuse ; le mot mémoire vient de la déesse Mnémosyne, mère des muses qui présidaient aux grands domaines de la connaissance.

Où est né Charles VII ? Qu'est-ce qu'un vilebrequin ? L'apprentissage est indispensable à la formation des connaissances… mais attention à toujours associer par cœur et compréhension !

Histoire, Poésie, Littérature, Sciences… Mais Descartes, contestant un charlatan de son époque, pensait que le raisonnement suffisait, reléguant la mémoire au second plan. C'est sans doute pour cette raison qu'au sens populaire, y compris à l'école, la mémoire est souvent réduite au sens d'apprentissage «par cœur».

Qu'en est-il réellement? Dans quelle mesure la mémorisation favorise-t-elle la compréhension et le raisonnement, ou les entrave-t-elle? La conception cartésienne donna quelques signes de faiblesse lorsqu'au XIXe siècle, le neurologue Charcot rendit la notion de mémoire plus complexe. C'est lui qui démontra notamment, en observant des cas cliniques, l'existence de «plusieurs mémoires». Avec les connaissances de son temps, il associa ces mémoires aux sens et à la motricité: dès lors, on envisagea la possibilité de mémoires visuelle, auditive, motrice, olfactive… Et l'idée que les échecs scolaires puissent être imputés à une mauvaise utilisation de la mémoire devint séduisante: le philosophe et pédagogue français Antoine de La Garanderie (1920-2010) soutint par exemple que les élèves ont principalement deux modes d'évocation (visuel ou auditif), et que l'échec scolaire surviendrait lorsque l'enseignement est surtout visuel pour un élève auditif, ou inversement. Cette conception est trop simpliste.

LA FUSION DES MÉMOIRES

Dans les années 1960, la mémoire acquiert ses lettres de noblesse. Tout se joue d'abord dans le cadre des études «homme-machine» (télécommunications, ordinateur…) où certains chercheurs allaient jusqu'à penser que l'intelligence repose sur la mémoire. On mettait en avant une hiérarchie de mémoires spécialisées, des mémoires sensorielles aux mémoires abstraites… Qu'entendre par-là? La mémoire sensorielle visuelle (ou iconique) est la capacité à «photographier» par exemple une ligne de chiffres sur un écran, et à les citer de mémoire lorsque l'écran s'éteint. Diverses expériences ont montré que le nombre de chiffres rappelés diminue rapidement si l'instruction d'énoncer ces chiffres intervient plus de 250 millisecondes après l'extinction de l'écran. Cette mémoire iconique est donc éphémère.

L'équivalent dans le domaine sonore, la mémoire auditive, aurait une durée légèrement supérieure, de 2,5 secondes: si l'on fait entendre à quelqu'un une suite de sons, puis qu'on lui demande de réaliser une rapide tâche de calcul mental (tâche de distraction), la capacité à citer de mémoire un des sons de la série devient très faible si la tâche de distraction se prolonge au-delà de 2,5 secondes.

Ainsi, à court terme (moins de cinq secondes), une présentation visuelle (sur écran) de lettres ou mots est moins efficace qu'une présentation auditive (mots entendus). Mais

paradoxalement, le rappel des données visuelles ou auditives au bout de plusieurs secondes (environ dix secondes et plus) est équivalent. L'explication en a été donnée par John Morton, du University College, à Londres: selon lui, les informations visuelles ou auditives ne font que transiter dans des mémoires sensorielles, et se retrouvent fusionnées dans une mémoire commune, la mémoire lexicale ou mémoire des mots. La mémoire peut ainsi être représentée comme une sorte d'ordinateur avec différents modules spécialisés, tout comme un ordinateur est équipé d'une carte graphique, d'une carte son...

LA MEMOIRE EST INTELLIGENTE

Evidemment, il faut procéder à des exercices de mémorisation pour nourrir sa mémoire lexicale. C'est ce que font d'abord les parents en répétant sans fin le mot «fleur» à leur enfant lorsque celui-ci désigne l'objet en question. Et l'on comprend que sans ce «par cœur» élémentaire, aucune forme d'intelligence ne pourrait se développer chez l'enfant. Plus tard, l'enseignement de nombreuses matières se doit de poursuivre au moins en partie en ce sens, qu'il s'agisse d'apprendre des noms de lieux, d'objets, de techniques ou même de concepts. Mais la mémoire lexicale a-t-elle un lien avec la compréhension au sens large?

La découverte d'une nouvelle mémoire, nommée mémoire sémantique ou mémoire du sens, a révolutionné la façon dont on envisage cette question. Tout a commencé par les recherches d'un informaticien Ross Quillian et d'un psychologue, Allan Collins. En 1969, ils travaillaient à la mise au point d'un logiciel de traduction de langues étrangères. Leur idée première était de relier, par un programme informatique, un mot d'une langue étrangère à son homologue natif.

Par exemple, chaque fois que l'ordinateur rencontrait dans le texte, le mot «pêche», il traduisait par «fishing». Évidemment, les problèmes ne tardèrent pas à surgir: la phrase «Pour le dessert, je voudrais une pêche Melba», était traduite de façon cocasse... C'est d'ailleurs ainsi que procèdent beaucoup de logiciels qui vous livrent des traductions hilarantes comme le vu récemment *believed ham* pour «jambon cru»!

L'idée géniale de Allan Collins et de Ross Quillian fut de tenir compte du fait que la plupart des mots sont polysémiques (affectés de plusieurs sens, tels «disque», «feuille» ou «pêche»), et qu'il faut une interface entre le lexique étranger et le lexique natif, un «interpréteur de sens». Cet interpréteur de sens se sert des mots du contexte (dessert, Melba...) pour choisir le meilleur sens, qui guide alors vers la bonne unité lexicale dans notre mémoire lexicale. Supposant que notre mémoire est naturellement conçue ainsi, Allan Collins et Ross Quillian découvrent la mémoire du sens, qu'ils nomment mémoire sémantique (du grec *semios*, «signification»). Mais comment imaginer le stockage de quelque chose d'aussi abstrait que le sens? Leur théorie repose sur deux principes.

L'ARBRE DE LA MEMOIRE

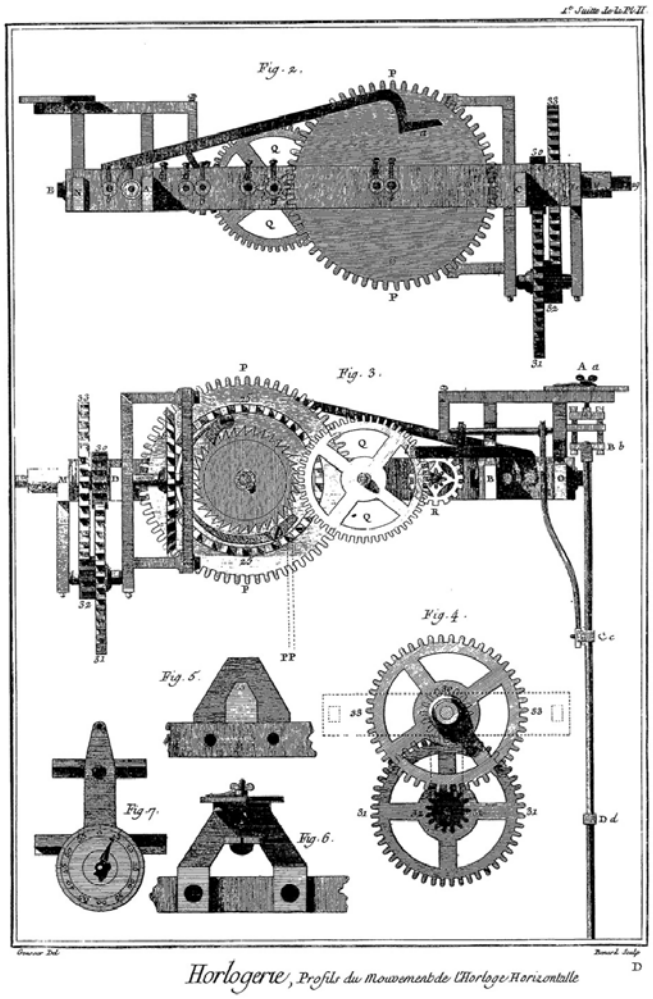
Le premier principe est celui de hiérarchie catégorielle. Il stipule que les concepts de la mémoire sémantique sont classés de façon hiérarchique, les catégories étant emboîtées dans des catégories allant des plus particulières aux plus générales, à la façon d'une arborescence: la catégorie «canari» appartient à la catégorie «oiseau», «oiseau» à celle de «vertébré», «vertébré» à celle d'«animal», etc. Le second principe, dit d'économie cognitive, veut que seules les propriétés (ou traits sémantiques) spécifiques soient classées avec les concepts associés. Par exemple la propriété «jaune» est classée avec le concept «canari», mais des propriétés plus générales comme «bec» ou «ailes» sont classées avec le concept «oiseau».

Dans ce modèle, la mémoire sémantique est organisée sous forme d'une arborescence économique (*voir la figure pag 75*). La compréhension

Dans la mémoire sémantique, les concepts sont classés de façon hiérarchique, emboîtée, arborescente

par un élève des connaissances qu'on lui propose a lieu de deux façons. Soit par un accès direct à l'information qui fournit le sens: par exemple, on sait que le canari est jaune, car l'information «jaune» est déjà stockée en mémoire. Soit par inférence: c'est ce qui se passe si l'on demande à un enfant si un canari a un estomac. Dans ce cas, le réseau sémantique sera activé pour trouver qu'un canari est un oiseau, donc un animal, qui par conséquent, doit avoir un estomac...

Dans ce dernier cas, l'information est reconstituée – «inférée» est le terme technique – à partir d'informations contenues dans d'autres parties de l'arborescence. Qu'est-ce que l'inférence? Comme le montre cet exemple, c'est un raisonnement qui relève, non de la logique



Horlogerie, Profils du Mouvement de l'Horloge Horizontale

Lorsqu'un enfant se plonge dans la lecture d'une encyclopédie (ici, celle de Diderot et D'Alembert), il ne se contente pas de retenir des informations brutes. Il s'interroge sur le fonctionnement des objets, par exemple les horloges, sur leur évolution et pose des questions. La connaissance stimule la curiosité.

formelle, mais d'un réseau de connaissances. Voilà pourquoi certains chercheurs pensent que l'intelligence se nourrit de la mémoire: plus la mémoire stocke de connaissances, plus les inférences sont variées et correctes.

Evidemment, l'enfant ne naît pas avec une mémoire sémantique tout imprimée, comme si le cerveau pouvait télécharger un logiciel prêt à l'emploi. Comment se construit donc sa mémoire sémantique? Les souvenirs font partie de ce que le professeur émérite de l'université de Toronto, au Canada, Endel Tulving, a nommé la mémoire épisodique, somme des événements que nous avons mémorisés. Selon lui, chaque fois que nous lisons un mot déjà connu (par exemple le mot «bateau») ou que nous voyons un bateau dans un port, ou dans un documentaire, le concept associé fait l'objet d'un nouvel «épisode» stocké dans la mémoire épisodique.

M'intéressant aux apprentissages scolaires (alors qu'Endel Tulving travaillait plutôt sur la pathologie de la mémoire), j'ai fait l'hypothèse que la mémoire sémantique chez l'enfant est fabriquée à partir de l'abstraction de tels épisodes. Si le premier épisode «canari» pour un enfant est souvent Titi, il va aussi enregistrer d'autres épisodes ultérieurement, un canari vu dans un livre, dans une animalerie, dans un documentaire (*voir la figure page 75*).

Finalement, des mécanismes cérébraux d'abstraction vont extraire les points communs de tous ces épisodes pour constituer le concept générique de canari. Certains auront peut-être remarqué que les définitions des adultes et des enfants diffèrent... Un adulte tend à évoquer un canari de façon générique en déclinant des propriétés générales: «C'est un oiseau, petit et jaune» tandis qu'un enfant répond plus souvent en décrivant un épisode: «Tu sais, c'est Titi !» Ainsi, non seulement la mémorisation est nécessaire aux raisonnements par inférence, mais elle participe à la création du sens, au sein de la mémoire sémantique. Comment appliquer cette hypothèse à la pédagogie?

LA MULTIPLICATION DES ÉPISODES

En insistant sur le fait que, pour apprendre des concepts, il faut multiplier les épisodes. En 1997, j'ai d'ailleurs intitulé cette nouvelle méthode «apprentissage multiépisodique». Ici, on quitte le terrain le plus strict de l'apprentissage par cœur, pour aborder celui de la multiplication des expériences et des épisodes. L'apprentissage par cœur est plutôt du domaine de la mémoire lexicale; en revanche, pour apprendre le sens des choses et construire sa mémoire sémantique, il faut – répétons-le – multiplier les épisodes.

Accompagnés de nombreux enseignants, à différents niveaux d'étude du primaire au lycée, nous avons testé avec succès cette méthode. Certes, ce type d'enseignement est plus long: exposer un cours ne constitue qu'un (gros) épisode, alors qu'ajouter un documentaire, une recherche sur Internet ou dans un centre de documentation, réaliser des travaux pratiques ou des exercices, prend beaucoup de temps. Mais ne vaudrait-il pas mieux réduire les programmes pour mieux assurer la mémorisation des connaissances?

En tout cas, n'opposons surtout pas l'apprentissage par cœur à la compréhension. L'un et l'autre sont indispensables et complémentaires: l'apprentissage par cœur est le moteur de la mémoire lexicale, tandis que les expériences sont le moteur de la mémoire sémantique.

Lorsqu'on mémorise un grand nombre de concepts, de mots, de noms propres de personnages historiques, de dates ou de lieux, on accède à ce qu'on pourrait appeler la connaissance encyclopédique, dont l'étendue varie selon les individus. Corroborant ce que nous venons d'expliquer sur les liens entre apprentissage des connaissances et raisonnement, nous avons découvert au fil d'études réalisées auprès d'élèves de la sixième à la troisième que la connaissance encyclopédique est un excellent prédicteur de la réussite scolaire, davantage que les résultats obtenus aux tests de raisonnement pur.

Le meilleur score de connaissance encyclopédique en sixième (4000 termes identifiés, tels que tangente, Vercingétorix, gerboise) correspond au meilleur élève (crédité d'une note de 17/20 de moyenne scolaire générale), tandis que les élèves obtenant les moins bons scores en connaissance encyclopédique ont une moyenne scolaire très basse (4,5/20). Les différences entre les élèves sont parfois énormes et sont très liées aux performances scolaires. Ainsi, les élèves qui ont acquis moins de 1500 mots en fin d'année de sixième redoublent et ceux qui ont acquis moins de 9000 mots en quatrième ont une moyenne annuelle insuffisante. La mémoire des connaissances (lexicale et sémantique) est donc cruciale pour la réussite à l'école.

Dès lors, comment mémoriser les informations de façon intelligente, sans «saturer», ni se trouver dans une situation d'épuisement ou de profonde lassitude? La principale limite du cerveau à cet égard est constituée par la mémoire à court terme, ou mémoire de travail. C'est le père de la cybernétique, Norbert Wiener, qui inaugura ce concept en 1948. Il fallut dix ans de plus pour en démontrer l'existence chez l'être humain.

La mémoire de travail présente deux caractéristiques fondamentales: sa capacité limitée (environ six à sept unités familières, mots, images, chiffres, symboles...) et une faible autonomie (moins de 20 secondes) qui lui vaut parfois le nom de mémoire à court terme. La mémoire de travail permet ainsi de garder présent à l'esprit un numéro de téléphone le temps de le composer. Si l'on ne s'efforce pas de le mémoriser par des tentatives répétées, on ne le retiendra jamais. La mémoire de travail est la première porte d'entrée de la connaissance dans le cerveau: c'est elle qui organise les informations, et c'est par la répétition que ces connaissances peuvent être consolidées en mémoire à long terme.

MÉMOIRE ET RÉUSSITE SCOLAIRE

Comment optimiser les apprentissages sachant que cette mémoire de travail ne peut stocker simultanément plus de six ou sept éléments? Le psychologue George Miller a montré en 1956 qu'un moyen de dépasser cette limite était de grouper les informations par paquets. Par exemple, plutôt que d'apprendre les noms de seize fleuves russes, on gagnera à apprendre les noms de quatre provinces, et de quatre fleuves par province.

Dès 1969, Gordon Bower et ses collègues de l'université de Berkeley, à Los Angeles ont montré l'efficacité de cette méthode de subdivision des tâches. Ils ont fait apprendre à des étudiants une liste d'environ cent vingt mots organisés en familles sémantiques – animaux, plantes... –, elles-mêmes subdivisées en sous-familles (plantes comestibles, d'ornement, sauvages...), puis en catégories encore inférieures (fleurs, herbes aromatiques...). Pour ne pas saturer la mémoire à court terme, le nombre de mots à chaque niveau n'excède pas quatre. Les performances ont été impressionnantes, soixante-dix mots étant rappelés au premier essai contre une vingtaine seulement dans un groupe d'étudiants devant apprendre les mots sur une liste unique. Dans le groupe «subdivisé», la totalité de la liste est acquise dès le troisième essai d'apprentissage. Voilà pourquoi il est très efficace d'apprendre le cours en parties et sous-parties bien organisées, selon un plan «sémantique» (on dit souvent «logique»); l'idéal pour éviter la surcharge est d'établir des parties de trois ou quatre éléments.

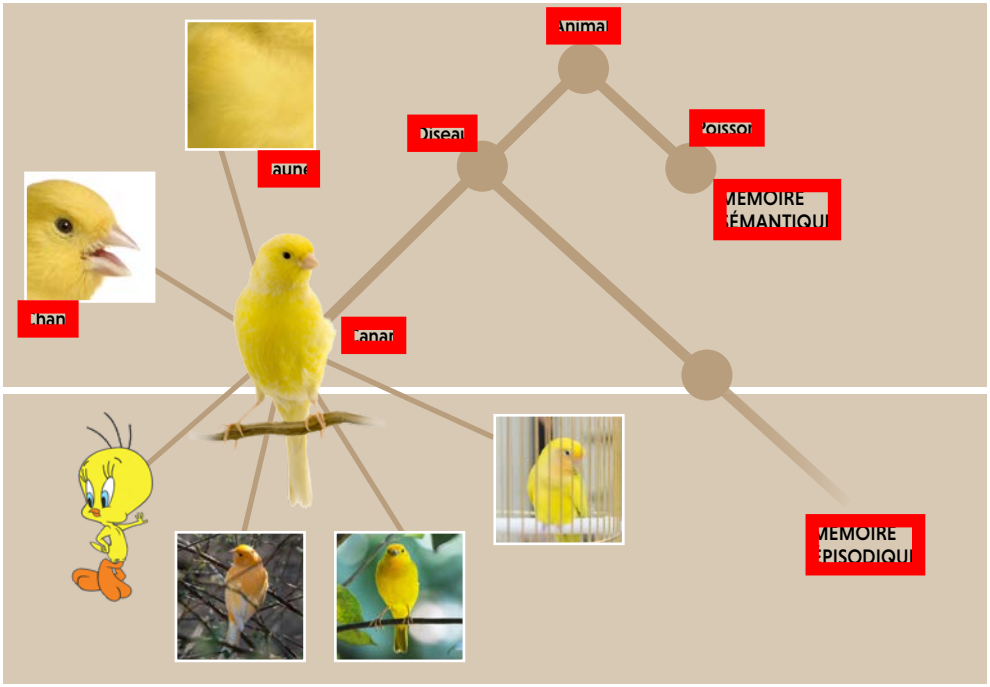
LA SURCHARGE COGNITIVE GUETTE LES ÉLÈVES

Apprendre et comprendre un cours ou un document [illegible] que, du point de vue de la mémoire, des processus variés qui peuvent entraîner de nombreuses difficultés chez les élèves et les étudiants. On sait par exemple depuis longtemps que les capacités de traitement de la mémoire de travail, véritable sas d'entrée dans la mémoire à long terme, sont extrêmement limitées. On sait aussi que, si certains processus peuvent voir leur coût en mémoire de travail réduit de manière importante par la pratique et l'expertise (rappelez-vous votre première leçon de conduite...), la plupart des processus conduisant à un apprentissage profond sont très coûteux d'un point de vue mental. Il est ainsi fréquent que des élèves puissent être en situation de surcharge cognitive pendant leurs apprentissages. Cette surcharge peut être provoquée par la complexité du matériel pédagogique à traiter, mais aussi par des éléments de l'environnement d'apprentissage. Ainsi, de nombreuses études montrent que la manière dont l'information est présentée dans les documents pédagogiques est susceptible de contribuer à cette surcharge. De nombreuses études menées par notre équipe démontrent que les apprentissages peuvent être de meilleure qualité si l'on optimise la conception de diaporamas, de cours en ligne ou de manuels scolaires.

La surcharge cognitive peut aussi être provoquée par les comportements des apprenants. On entend ainsi souvent dire que les enfants du numérique ayant grandi avec les technologies seraient plus aptes à les utiliser simultanément. Ces pratiques de *multitasking* (de multitâches), par exemple envoyer des SMS pendant un cours, se sont incontestablement multipliées. Cependant, l'idée que nous pourrions, d'un point de vue de la mémoire, réaliser plusieurs tâches complexes simultanément sans conséquence délétère est clairement un mythe. Les études internationales montrent ainsi que les étudiants qui font beaucoup de *multitasking* à l'université pendant les cours ou pendant leurs travaux personnels sont aussi ceux qui réussissent le moins bien aux examens!

ÉRIC JAMET, PROFESSEUR DE PSYCHOLOGIE COGNITIVE ET ERGONOMIQUE À L'UNIVERSITÉ RENNES II.

Un enfant à qui on demande si un canari a un estomac se souvient qu'un canari est un oiseau, qu'un oiseau est un animal et que les animaux ont un estomac, ce qui mobilise sa mémoire sémantique. En outre, il a acquis le concept de canari en mémorisant plusieurs événements où apparaissait un canari, par exemple dans un dessin animé, dans une cage, en liberté : ces événements nourrissent sa mémoire épisodique.



Plusieurs remarques s'imposent à la lumière de ces notions sur la mémoire. Tout d'abord, l'apprentissage par cœur est une composante non négligeable de l'accès à la connaissance, mais aussi au raisonnement. Par ailleurs, on gagnerait à proposer des programmes moins «lourds», mais à passer plus de temps à enseigner les concepts les plus importants, par la méthode de la multiplication des épisodes, que nous avons mentionnée. Enfin, il faut une vraie réflexion sur la surcharge des connaissances et des programmes : nous l'avons évoqué, il est important de hiérarchiser sa méthode d'apprentissage selon le principe de la subdivision des informations pour tenir compte des limites du fonctionnement du cerveau. Pourtant, les enseignants semblent ne pas avoir intégré ces notions. J'en ai entendu déclarer en substance : «Comme les élèves oublient vite, si on leur enseigne beaucoup de choses, il en restera toujours un peu.»

LA MALÉDICTION DES PROGRAMMES

Il y a quelques années, j'ai eu la curiosité de comptabiliser le nombre de mots d'une leçon d'histoire dans un manuel de cinquième, et j'avais recensé 300 noms, en plus du vocabulaire courant. Et combien de mots dans la totalité des manuels ? Ce fut le début d'une longue recherche menée sur 4 ans avec une cinquantaine de professeurs de collèges et plusieurs dizaines d'étudiants, et dont la finalité était de dresser l'inventaire du vocabulaire des grandes matières : histoire, biologie, chimie, mathématiques, littérature, langues vivantes. C'est ce vocabulaire «encyclopédique» («Ramsès» en histoire, «diagonale» en mathématiques, «notonecte» en sciences de la vie et de la Terre, ou «diaprure» en français), qui a été inventorié dans le cadre d'un suivi de huit classes de collège, de la sixième jusqu'à la troisième. L'inventaire dans les manuels d'anglais de sixième de collège aboutit ainsi à un total impressionnant de 6317 mots en sixième, 9500 mots en cinquième, 18000 en quatrième et enfin, près de 24000 en troisième, tous ces mots en plus des 9000 que compte le vocabulaire courant.

Comparé à ces «mots du programme» combien de termes un élève de sixième, c'est-à-dire un enfant de 12 ans, peut-il retenir en une année ? Au moyen de questionnaires à choix multiples, nous avons évalué ce total à 2500 mots et concepts acquis en moyenne à la fin de l'année, soit une surcharge de 60%. Cette étude porte sur des manuels des années 1990 à 1995, mais je n'ai pas eu connaissance de changements en faveur d'une simplification des programmes.

À mon avis, il ne faudrait pas supprimer la diversité des matières, mais réduire les programmes dans chacune d'entre elles. Car il est important de ne pas se sentir écrasé par la masse des informations, si l'on veut espérer leur donner une forme, une logique, construire des arborescences mentales et adjoindre le raisonnement au savoir brut.

Si vos enseignants avaient suivi cette méthode, peut-être vous souviendriez-vous des réponses aux questions posées en introduction : indicatif, pétiole, la capture d'Atahualpa, le dernier empereur Inca, par le conquistador espagnol Francisco Pizarro et enfin la Gambie. ■

BIBLIOGRAPHIE

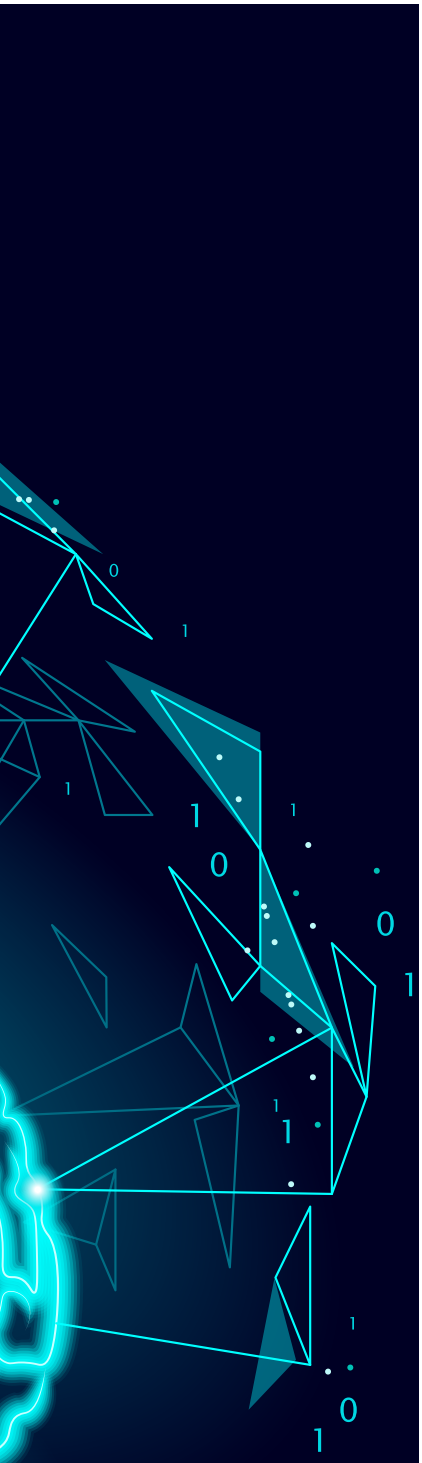
A. LIEURY, *Le Livre de la mémoire*, Dunod, 2013.

A. LIEURY *ET AL.*, *Psychologie pour l'enseignant*, coll. «Manuels visuels», Dunod, 2010.

A. LIEURY, *La Réussite scolaire expliquée aux parents*, Dunod, 2010.

A. FLORIN, *Le Développement du langage*, Dunod, 1999.

Reproduction interdite



La mémoire nous projette dans l'avenir. Mais à quoi ressemble celui de la mémoire ?

DEMAIN, VOUS VOUS SOUVENEZ ?

Vous pensez la mémoire orientée vers le passé ? Vous avez tort. Elle est en fait tournée vers le futur et les anticipations qu'elle permet. D'où une foule de questions. Qu'attendre de l'externalisation croissante de notre mémoire dans des dispositifs externes ? Que croire des promesses des « prophètes » de la mémoire qui imaginent, par exemple, la fusion entre neurones et silicium ? Comment vont évoluer la politique, l'économie, l'éducation, la science… ? Comment se construit notre mémoire collective, support de notre identité et donc de notre avenir ? Le futur se construit aujourd'hui !

Interdit à la commercialisation

Le passé, le présent et le futur s'entremêlent dans notre mémoire pour une meilleure efficacité.

L'ESSENTIEL

- Depuis 2007, les neurobiologistes étudient avec attention la mémoire du futur, celle qui nous aide à nous projeter vers l'avenir.
- Ils suivent des amnésiques et usent de la neuro-imagerie pour comprendre les rouages de cette mémoire du futur.
- Premier constat, elle partage beaucoup de points communs avec la mémoire du passé.
- Cette mémoire du futur, essentielle à une mémoire collective qui permet les échanges harmonieux avec autrui, est aujourd'hui menacée par l'essor du numérique.

L'AUTEUR

FRANCIS EUSTACHE, directeur d'études à l'EPHE, dirige l'unité Inserm dédiée à l'étude de la mémoire humaine, à l'université de Caen-Normandie.

La mémoire à tous les temps

On pense la mémoire uniquement tournée vers le passé, mais elle est aussi orientée vers le futur. Cette mémoire du futur est indispensable sur le plan tant individuel que collectif. Il est impératif d'en prendre soin.

© Pour la Science - Reproduction interdite

«U

ne obscure clarté», «Hâte-toi lentement», «Un silence assourdissant»... la littérature regorge d'oxymores, des expressions qui associent deux termes *a priori* opposés. Un autre a récemment fait son apparition, en sciences cette fois: il s'agit de la «mémoire du futur». La mémoire n'est-elle pas, par essence, uniquement tournée vers le passé, c'est-à-dire dévolue à la récupération des informations passées? Non, elle est aussi, intrinsèquement et délibérément, orientée vers le futur. Une telle conception avait été entrevue de longue date, mais la mémoire du futur n'est devenue une thématique de recherche à part entière que depuis 2007, année où ont paru de nombreux articles fondateurs qui ont donné les grandes orientations pour les années suivantes.

Elles conduisent à diverses questions, d'abord d'ordre épistémologique. Par exemple, comment ces conceptions nouvelles se déclinent-elles dans différentes disciplines scientifiques? Comment modifient-elles certaines thématiques majeures dans l'étude de la mémoire? Ensuite, des questions plus spécifiques concernant cette composante singulière de la mémoire: comment s'articulent mémoire du passé et mémoire du futur? Quelles sont les grandes fonctions de cette mémoire du futur? Sur quels processus cognitifs repose-t-elle? Quels en sont les substrats cérébraux par rapport à d'autres mécanismes de la mémoire? Quelles sont les pathologies qui la mettent à mal? Comment évolue aujourd'hui notre mémoire du futur aux prises avec les nouveaux moyens d'information et de communication, l'intelligence artificielle et la robotique? Cette «extension» essentielle de notre mémoire qu'est notre mémoire du futur est-elle menacée face à des mémoires externes de plus en plus puissantes et invasives?

Pour cerner ce qu'est la mémoire du futur, commençons par une définition en creux, en décrivant d'abord ce qu'elle n'est pas. La mémoire du futur ne se résume pas à la mémoire prospective, qui consiste à se rappeler des tâches à accomplir dans un futur proche.

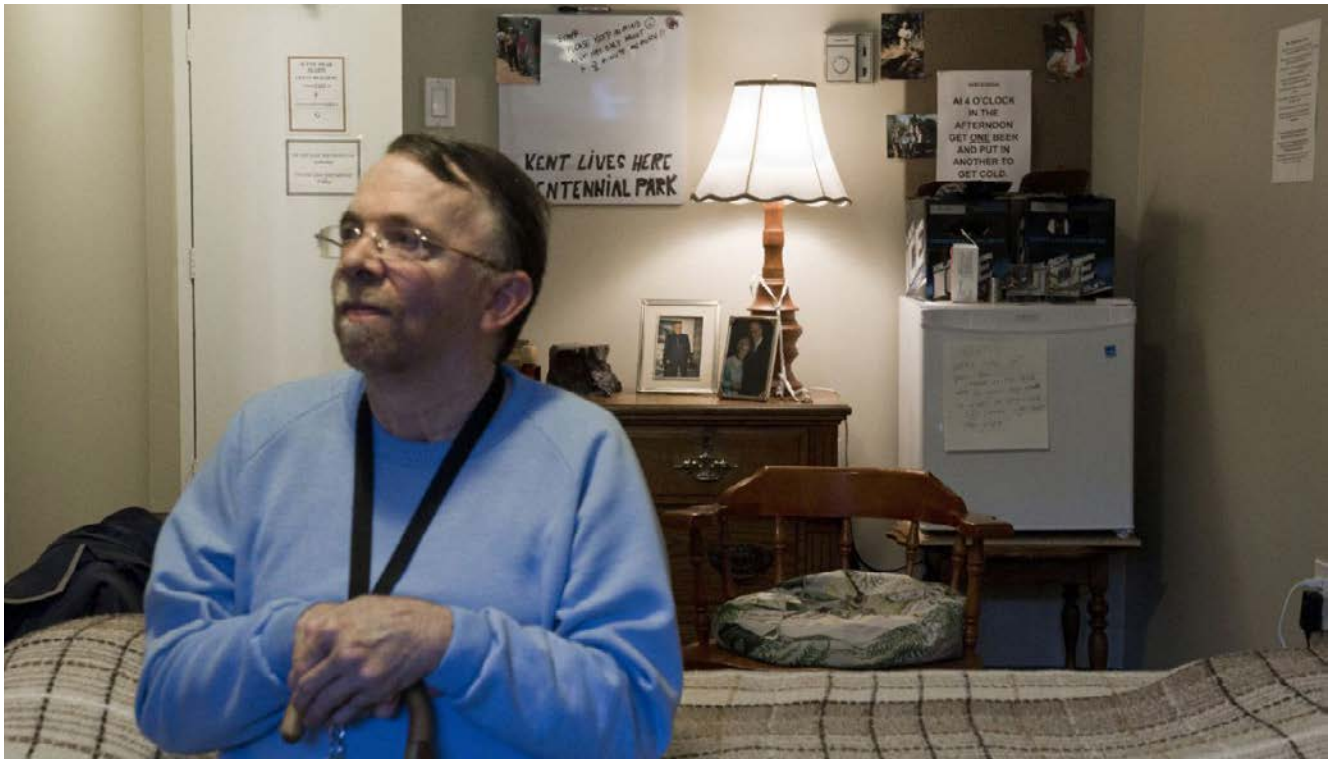
La mémoire du futur ne constitue pas un «système de mémoire» à part entière, à la différence par exemple de la mémoire procédurale, qui régit nos habitudes et automatismes, de la mémoire de nos souvenirs dite épisodique... C'est une fonction plus composite, qui emprunte à certains systèmes de mémoire, et notamment à la mémoire épisodique et à nos représentations sémantiques, mais aussi à des mécanismes de contrôle que l'on nomme fonctions exécutives. Au-delà, la mémoire du futur permet de simuler des situations plus ou moins plausibles et de manipuler différents types d'informations, en fonction de nos buts et de nos aspirations. Le contexte ambiant peut susciter aussi cette projection personnelle vers le futur.

UN SCENARIO REALISTE

Que recouvre alors précisément le terme de «mémoire du futur»? Selon Daniel Schacter, de l'université Harvard, l'un des auteurs qui a le plus publié sur cette question, c'est la «capacité que nous avons à envisager une expérience en créant mentalement un scénario réaliste associant images, pensées et actions». La mémoire du futur est composée de nos capacités de projection et de simulation du futur. Elle est alimentée par des souvenirs épisodiques et des représentations sémantiques et elle est guidée par nos objectifs et par le contexte autobiographique. Elle contribue aussi grandement à nos prises de décision.

En neuropsychologie, la naissance de la notion de mémoire du futur vient de l'étude de patients amnésiques, tels que Kent Cochrane (*voir la photo page ci-contre*), désigné dans les premières publications par ses initiales «K. C.», pour respecter son anonymat de son vivant (il est mort en 2014). Ce patient ne se rappelait pas les événements de sa vie survenus après son accident (mémoire épisodique), mais sa mémoire des faits et des concepts (sémantique) était intacte. Cette dissociation a permis à Endel Tulving, neuropsychologue à l'université de Toronto, au Canada, d'établir que ces deux systèmes de mémoire étaient

Pour se projeter soi-même dans le futur, la notion de référence à soi est essentielle



Le Canadien Kent Cochrane fut victime d'amnésie après un accident de moto en 1981. Par ce handicap, il est devenu l'un des patients les plus étudiés au monde.

distincts. K. C. était capable d'acquérir de nouvelles connaissances, mais pas de se forger de nouveaux souvenirs.

UN PRÉSENT PERMANENT

Dans une publication pionnière de 1985, Endel Tulving interroge K. C. avec des questions portant sur le passé ou sur le futur. Le patient n'arrive à se projeter ni dans un sens ni dans l'autre. Ainsi, certains patients amnésiques vivent dans un présent permanent.

En dépit de leurs difficultés à se projeter dans le futur, les personnes amnésiques peuvent-elles malgré tout se représenter le futur ? Carl Craver et son équipe de l'université Washington, à Saint Louis, aux États-Unis, ont publié, en 2014, des entretiens avec K. C. d'où il ressort que le patient maîtrise bien les concepts du temps. Pourtant, s'il possède une compréhension théorique du futur, il éprouve des difficultés à se projeter lui-même. Pour comprendre ces difficultés, examinons ce qui permet la projection dans le futur et fait défaut aux patients comme K. C.

Daniel Schacter, de l'université Harvard, aux États-Unis, et Donna Rose Addis, de l'université d'Auckland, en Nouvelle-Zélande, ont émis l'hypothèse selon laquelle, pour se projeter soi-même dans le futur, la dimension épisodique incluant la notion de référence à soi, est essentielle. Selon eux, la « pensée future épisodique », formule qu'ils vont développer par la suite, est une expression de la mémoire épisodique. Elle est fondée sur les mêmes représentations (épisodiques) et les mêmes mécanismes (référence à soi, imagerie mentale), d'où le concept de « simulation épisodique constructive ».

En 2007, Randy Buckner et Daniel Carroll, de Harvard, montrent que quand nous pensons au futur, de la même manière que lorsque nous imaginons les actions à venir d'une autre personne, nous nous projetons mentalement dans une nouvelle situation. La prospection vers le futur est donc une forme de projection de soi qui implique un détachement de la réalité présente pour adopter un point de vue différent.

Les données de neuro-imagerie montrent que des zones cérébrales en partie similaires s'activent lors de la remémoration de souvenirs et de l'anticipation du futur (prospection), mais aussi lors de tâches de « théorie de l'esprit » (la capacité à se mettre dans la tête d'autrui) et même de repérage dans l'espace et de planification de nos actions. Les expériences du passé seraient ainsi réutilisées en les adaptant pour imaginer des perspectives autres que celles de l'environnement immédiat.

Pour prévoir un pique-nique, nous faisons appel à nos souvenirs d'expériences similaires déjà vécues, mais aussi à ce que nous imaginons qui conviendrait aux personnes invitées (la « théorie de l'esprit »), aux ingrédients et objets nécessaires (prospection) et à la planification dans le temps des actions à entreprendre. Toutes ces fonctions mises en jeu dans la

mémoire du futur ont en commun de se détacher de la réalité immédiate pour adopter un point de vue autre et voyager mentalement vers un ailleurs. Cette capacité de projection dans le futur serait donc essentielle dans nos prises de décision au quotidien.

LE FUTUR DES AMNÉSIQUES

Compte tenu de l'importance du passé pour se projeter dans le futur, on peut se demander si un futur est possible pour les amnésiques. Pour répondre, Eleanor Maguire, du University College, à Londres, et ses collègues ont étudié les mécanismes de construction de scènes complexes mis en jeu lors de l'imagination d'événements qui pourraient se produire dans un futur personnel. Ils ont proposé à cinq patients amnésiques dix scénarios à compléter le plus précisément possible. En comparaison avec des sujets sains, les représentations des patients étaient moins riches en détail. De plus, elles manquaient de cohérence spatiale, conduisant à des images fragmentées et disparates plutôt qu'à une vision globale.

D'autres auteurs ont modulé ces conclusions, en estimant que l'impact de l'amnésie est moindre sur la mémoire du futur. C'est le cas de Larry Squire et de son équipe de l'université de Californie à San Diego, qui ont examiné des projections guidées chez des patients porteurs de lésions de l'hippocampe. Dans leur étude, les descriptions faites par les sujets amnésiques diffèrent assez peu de celles des sujets contrôles.

Toutefois, la réponse à la question d'un futur possible pour les amnésiques peut différer entre les études, selon la nature et l'intensité du syndrome amnésique et selon la méthodologie employée. Enfin, il existe des mécanismes compensatoires liés à la chronicité de l'amnésie, c'est-à-dire des phénomènes d'adaptation par réorganisation cognitive et neurobiologique.

Afin de faire la part des phénomènes de compensation, nous nous sommes intéressés à l'amnésie transitoire, également appelée ictus amnésique idiopathique. En effet, cette amnésie n'étant pas chronique, elle ne conduit pas à des mécanismes d'adaptation du cerveau. Dans cette pathologie assez surprenante qui résulte d'une atteinte fonctionnelle de l'hippocampe, le patient devient soudainement et transitoirement amnésique. Les troubles sont massifs et ne concernent pratiquement que la mémoire épisodique ; ils disparaissent spontanément en quelques heures. La personne atteinte ne souffre pas de perte d'identité, mais elle ne peut pas se souvenir des événements qui se déroulent pendant l'ictus et pose des questions itératives pour tenter de comprendre la situation ambiante.

Nous avons mis en place une consultation pour évaluer la phase aiguë des ictus amnésiques des patients, les soigner et ensuite les étudier en leur proposant une série de tests de simulation mentale d'événements futurs. Dans certaines conditions expérimentales, la simulation mentale n'est pas guidée par des indices, dans d'autres, le contexte général est fourni.

En production libre, les patients proposent beaucoup moins d'événements que les sujets contrôles et ceux-ci sont nettement moins riches en détail internes et externes, suggérant que la projection dans le futur leur est difficile, voire impossible, quand le contexte n'est pas fourni. Si l'on guide les patients, le nombre d'événements qu'ils imaginent peut être comparable à celui de sujets contrôles, mais ils conservent un déficit épisodique. Leurs réponses sont très « sémantisées », exprimées sous forme de scénarios plausibles, dans lesquels ils éprouvent une difficulté à se projeter eux-mêmes.

Ces caractéristiques des scénarios inventés par les sujets amnésiques peuvent s'expliquer dans le cadre d'une théorie développée par Muireann Irish et Olivier Piguet, de l'université de Sydney, selon laquelle la projection vers le futur comprend deux grandes étapes. Cette théorie souligne l'articulation entre mémoire épisodique et mémoire sémantique dans la mémoire du futur.

Dans la première étape, appelée construction de l'événement, la recherche et l'association d'indices aboutissent à la mise en place du contexte global du scénario futur. Cette étape, guidée par les souvenirs, les projets, l'identité personnelle du sujet, ses buts, ses aspirations, est en partie affectée dans l'ictus amnésique. La deuxième étape, appelée élaboration, permet d'enrichir cette production, de fournir des combinaisons de détails épisodiques permettant de

— Notre aptitude à produire des anticipations imaginaires est essentielle aux prises de décision —

SOIGNER AVEC LE FUTUR

La thérapie orientée vers le futur (notée FDT) a été conçue pour aider les personnes dépressives. Le principe est [illegible] séances hebdomadaires de quatre-vingt-dix minutes pendant dix semaines. Le traitement est organisé en phases progressives.

Les quatre premières semaines visent à sensibiliser les personnes à l'importance des projections mentales dans le futur, à leur expliquer les mécanismes et croyances qui influencent leurs projections et les résistances qu'elles peuvent éprouver à envisager un futur plus positif. La cinquième semaine est consacrée à des activités « de pleine conscience », avec pour objectif d'améliorer la flexibilité de la pensée.

Les semaines suivantes, les patients sont invités à déterminer leurs valeurs dans la vie, à identifier des buts bien définis et les étapes pour y parvenir, et à rendre ces buts tangibles *via* des simulations visuelles. On enseigne aux patients comment aborder un problème et chercher des solutions. Ils apprennent ensuite à se focaliser sur les bénéfices souhaités d'une action et à identifier les obstacles potentiels, tout en adoptant une disposition émotionnelle positive. Enfin, l'objectif de la fin de la prise en charge est de savoir accueillir le futur en considérant chaque moment comme une opportunité plutôt que comme un obstacle.

Une étude a été conduite chez trente-trois sujets atteints de dépression majeure : seize d'entre eux ont suivi une thérapie FDT et dix-sept une thérapie cognitive et comportementale « classique », intervenant sur le comportement et les croyances et représentations du patient de manière générale. Une amélioration des symptômes dépressifs, anxieux et de la qualité de vie a été observée après la FDT dans cette étude et reproduite dans une étude plus importante. Les deux types d'intervention ont réduit les symptômes dépressifs et le sentiment de désespoir, et facilité les anticipations positives, avec un bénéfice plus marqué pour la FDT par rapport à la thérapie cognitive et comportementale (TCC). Seule la FDT a amélioré la qualité de vie. Ce type d'intervention représente un moyen prometteur d'améliorer la qualité de vie des personnes en dépression ou en phase de rémission. Des méthodologies similaires ont également été appliquées dans d'autres pathologies mentales, comme la schizophrénie avec des résultats encourageants.

On peut soigner des dépressifs avec des thérapies invitant à se projeter en confiance dans le futur.

s'imaginer et se projeter soi-même dans le futur. Si cette étape est également altérée dans l'ictus amnésique, elle peut cependant s'échafauder à partir de représentations sémantiques.

Ainsi, selon Arnaud d'Argembeau, de l'université de Liège, la « pensée future épisodique », c'est-à-dire concernant le vécu futur, combine des informations issues de la mémoire épisodique et de la mémoire sémantique, afin de pouvoir simuler mentalement des événements qui n'ont jamais été vécus en tant que tels. Les individus amnésiques dont la mémoire épisodique est affectée et qui conservent des représentations sémantiques intactes peuvent s'appuyer sur celles-ci pour contrebalancer en partie leur déficit. Leur mémoire du futur restera moins efficiente.

À QUOI SERT LE FUTUR ?

Quelles fonctions remplit notre aptitude à voyager dans le futur ? Celles-ci sont manifestement multiples. Selon Pascal Boyer, également à Saint Louis, considérer la question de la mémoire sous l'angle de l'évolution suggère que notre aptitude à posséder des souvenirs vivaces et à produire des anticipations imaginaires est essentielle au processus de prise de décision. Cette aptitude jouerait un rôle fondamental en fournissant des exemples de situations et en nous permettant de les évaluer de façon virtuelle et sans risque. De plus, l'implication émotionnelle dans les événements passés ou à venir peut jouer un autre rôle crucial sur le plan individuel et social : augmenter la motivation et limiter les comportements impulsifs et opportunistes.

La simulation du futur est aussi une activité de tous les instants, dans notre vie de tous les jours, comme l'illustrent les travaux menés par Arnaud d'Argembeau et son équipe, en 2009. Ils ont demandé à des volontaires de noter le nombre de pensées futures évoquées pendant une journée : 59 fois en moyenne, soit une fois toutes les 16 minutes ! Ces pensées concernaient le travail, la vie relationnelle et étaient au service d'une palette de fonctions, comme la planification de l'action ou la prise de décision.

Nous avons vu que les patients amnésiques atteints de lésions de l'hippocampe ont des

Tous droits réservés

PROJECTION DANS LE FUTUR

JPL

Cortex prétrontal dorsolatéra

Cortex latérotempora

L

EP

EG

HYPERACTIVATION COMPENSATOIRE

JPL

Cortex pariéta

L

Cortex latérotemporal

Cortex occipital

Hippocampe

EP

EG

Chez quatre patients *(JPL, EP, LL et EG)* atteints de démence sémantique, les aires impliquées, atrophiées *(-)* ou non *(+)* dans la projection dans le futur sont plus ou moins atteintes. La comparaison *(en haut)* entre une projection réussie *(LL et EG, à droite)* et une autre déficitaire *(à gauche, JPL et EP)* montre l'importance du cortex préfrontal médian supérieur *(en orange)*. L'hyperactivation *(+)* de régions cérébrales pendant la projection dans le futur chez ces quatre patients, par rapport à des sujets sains *(en bas)* compense le défaut d'activité des régions atrophiées.

difficultés à imaginer des événements personnels passés et futurs et que leurs productions sont moins riches en détails et manquent de cohérence spatiale. Quelles régions cérébrales sont recrutées dans l'évocation du passé? En quoi le réseau cérébral lié à la projection vers le futur est-il semblable ou différent par rapport à celui de l'exploration du passé?

En 2007, dans notre laboratoire, Armelle Viard a étudié la mémoire autobiographique chez des personnes âgées de 60 à 70 ans. Rappelons que la mémoire autobiographique est classiquement définie comme une mémoire des événements personnellement vécus, associés à un contexte spatiotemporel particulier. Elle est liée à la conscience de notre existence et de notre identité dans le temps subjectif. Pouvoir visiter mentalement son passé comme son futur est ainsi une aptitude indissociable de notre personnalité.

Notre analyse a spécifiquement porté sur les régions hippocampiques et sur leur implication dans la récupération de souvenirs épisodiques, ces souvenirs correspondant à cinq grandes périodes de vie, donc plus ou moins récents. Contrairement au modèle classique de consolidation de la mémoire, qui attribue un rôle temporaire à l'hippocampe dans la récupération de la mémoire épisodique, nos résultats plaidaient pour un rôle persistant de l'hippocampe indépendamment de l'ancienneté du souvenir.

ALLER ET RETOUR EN COMMUN

En plus du travail strictement dévolu à la mémoire autobiographique de périodes de vie passées, nous avons demandé aux participants de penser à un évènement personnel spécifique survenu dans les douze derniers mois et de penser à un projet personnel prévu dans les douze prochains mois, tandis que leur fonctionnement cérébral était mesuré par IRM fonctionnelle. Les deux types de voyage mental, vers le passé et vers le futur sollicitent des régions communes (le cortex cingulaire postérieur, le précunéus, le cortex préfrontal et l'hippocampe), reflétant l'utilisation de réseaux cérébraux et vraisemblablement des processus cognitifs en partie similaires.

L'analyse comportementale confirme que l'évocation du passé et l'anticipation du futur sont comparables sur plusieurs plans. Elles le sont à la fois quant au point de vue des images mentales (soi-même acteur des scènes revécues ou imaginées), de stratégie mentale (essentiellement visuelle), mais aussi en matière d'émotions (à la fois l'intensité et la valence, positive ou négative).

L'activation du réseau cérébral dépend également de la fréquence de répétition antérieure et de la date de la dernière évocation. Ce dernier point suggère que le fait d'avoir pensé à leurs

projets futurs dans le passé expliquerait pourquoi, chez les sujets, passé et futur activent le même réseau cérébral. En effet, nous avons déjà pensé précédemment à certains de nos projets pour le futur (des projets de vacances par exemple), nous pouvons donc nous en souvenir, c'est-à-dire qu'ils sont stockés dans notre mémoire du passé alors qu'ils concernent nos projets dans le futur. À ce stade, on mesure donc que nos pensées épisodiques, passées et futures, sont foncièrement entremêlées.

De façon intéressante, il a été montré que les régions cérébrales communes au voyage mental vers le passé, le futur et vers l'autre (la théorie de l'esprit) sont également celles qui sous-tendent le «réseau du mode par défaut». Ce réseau est activé lorsque nous ne sommes pas en prise directe avec notre environnement extérieur et que nous nous tournons vers nos pensées internes. Il permet de consulter notre mémoire autobiographique, d'élaborer des scénarios plus ou moins plausibles. En outre, une relation empathique avec autrui y est omniprésente.

Ces connaissances théoriques pourraient-elles être appliquées pour soigner des pathologies qui influent sur notre vision du futur? Par exemple, partant du constat que les personnes dépressives produisent moins d'anticipations d'événements positifs que les autres, Jennice Vilhauer, de l'université Emory, à Atlanta, aux États-Unis, et ses collègues ont exploré une nouvelle forme d'intervention psychologique pour le traitement de la dépression: la «thérapie orientée vers le futur» (*voir l'encadré page 83*).

Ainsi, retenons que les mécanismes cognitifs et neuraux en jeu pour se remémorer le passé ou envisager l'avenir sont en partie communs. Les études d'imagerie cérébrale vont dans le sens de celles portant sur le développement de l'enfant, montrant que vers l'âge de trois ou quatre ans apparaît un niveau de conscience de soi, qui permet à la fois de se rappeler certains souvenirs de sa vie et de se projeter dans le futur.

UNE MERVEILLE DE LA NATURE

De même, les changements liés au vieillissement semblent affecter de la même façon les évocations mentales du passé et du futur, les sujets âgés fournissant moins de détails concernant les événements passés et futurs que les sujets jeunes. Ces résultats expliquent les difficultés rencontrées par les patients amnésiques à se projeter dans l'avenir. Nous avons besoin de notre passé pour anticiper et simuler l'avenir.

Ainsi que l'écrivait Endel Tulving, la fonction adaptative de la mémoire épisodique consisterait en son utilisation pour infléchir nos comportements futurs. Comme le souligne Daniel Schacter, la mémoire du futur a des implications comportementales à la fois sur le plan individuel, en matière de planification et d'atteinte d'objectifs, mais également sur le plan social, en soutenant la coopération et l'altruisme.

En effet, cette pensée future épisodique ne doit pas être conçue dans un cadre strictement individuel. Elle inclut les nécessaires interactions avec les autres et plus largement avec les cadres sociaux. Tout comme la mémoire autobiographique, la projection vers le futur est indissociable d'une mémoire collective qui permet des échanges harmonieux avec autrui.

Les amnésiques, et plus largement les patients souffrant de troubles de la mémoire, révèlent, en soulignant sa disparition singulière du fait de leur amnésie, notre capacité à voyager mentalement dans le temps, à nous «téléporter», à nous extraire du temps présent. Endel Tulving, l'inventeur de la mémoire épisodique, a qualifié celle-ci de merveille de la nature, puisqu'elle permet d'inverser la flèche du temps, de «remonter le temps» comme si elle parvenait à déroger aux lois de la nature.

UNE MÉMOIRE À PROTÉGER

Cette merveille est néanmoins menacée par l'essor des technologies numériques et l'externalisation croissante de nos mémoires. Les conséquences des technologies numériques et de leurs mésusages sont patentes sur le devenir de la mémoire du futur, une composante essentielle de la mémoire indispensable pour orienter notre devenir sur le plan individuel comme sur le plan collectif. Elle est l'essence même de notre élan vital, de notre libre arbitre, de notre capacité à déjouer le déterminisme, pour l'individu comme pour l'humanité.

Progressivement, nos mémoires se sont massivement externalisées, tout particulièrement *via* des outils et des «dispositifs». Leur utilisation fut d'abord purement technique, mais, succès oblige, ces outils ont envahi des fonctions qui ne leur étaient pas dédiées initialement, qui semblaient être le terrain irréductible de l'humain: l'éducation, le soin, la création artistique...

Nous avons de plus en plus conscience que le monde connecté et numérisé nous manipule, nous affaiblit, nous uniformise, nous amoindrit. Certains dispositifs sont construits à cet escient dans une logique ultralibérale de profits, qui n'ont jamais été aussi élevés, et on ne voit pas bien comment cette machine infernale s'arrêterait.

Une réflexion et une action éthiques devront présider aux choix stratégiques, en veillant à ce que ceux-ci ne soient pas confisqués par les grandes sociétés qui en tirent du profit ou leurs ayants droit. Cette réflexion ne devrait pas non plus être restreinte aux techniciens et experts du domaine, aux spécialistes généralement parties prenantes, mais faire l'objet d'un vrai débat visant l'intérêt général, où le citoyen devrait toujours avoir la première place. C'est à ce prix que nous retrouverons nos mémoires du futur. ■

Cet article est adapté d'un chapitre du livre La Mémoire au futur, Le Pommier, 2018.

BIBLIOGRAPHIE

F. EUSTACHE *ET AL.*, The Mnesis model: Memory systems and processes, identity and future thinking, *Neuropsychologia*, vol. 87, pp. 96-109 2016.

A. VIARD *ET AL.*, Episodic future thinking in semantic dementia: A cognitive and FMRI study, *PLoS One*, vol. 9(10), e111046, 2014.

M. IRISH ET O. PIGUET, The pivotal role of semantic memory in remembering the past and imaging the future, *Front. Behav. Neurosci.*, vol. 7, p. 27, 2013.

D. SCHACTER ET D. ADDIS, The cognitive neuroscience of constructive memory: remembering the past and imaging the future, *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.*, vol. 362(1481), pp. 773-786, 2007.

L'ESSENTIEL

- Le développement du numérique est tel que nous avons dans nos poches tout le savoir du monde.
- Il est difficile d'établir scientifiquement les conséquences de ce phénomène sur notre propre mémoire.
- Les dispositifs électroniques tudent à pallier quelques troubles le la mémoire, mais la fusion ntre neurones et silicium n'est pas réaliste.
- L'externalisation de nos némoires pose la question le la pérennité des supports
- Certains annoncent l'avènement supposé l'une religion fondée sur e data. Rien n'est moins sûr

L'AUTEUR

EAN-GABRIEL GANASCIA st professeur à la faculté des ciences de Sorbonne Université, aboratoire d'informatique le Paris VI (LIP6) et président lu comité d'éthique du CNRS.

Les fausses promesses du numérique

Les changements majeurs opérés par le numérique modifient en profondeur notre projection vers le futur. Les conséquences sur notre vie quotidienne sont majeures.

La densité des supports externes de mémoire donne le vertige. Le nombre d'ouvrages inscrits au catalogue des livres et imprimés de la Bibliothèque nationale de France, que l'on estime à 14 millions, a pendant longtemps constitué l'horizon ultime du savoir. À supposer qu'un livre standard comporte moins d'un million de caractères typographiques, cette somme des connaissances tiendrait sur 14 téraoctets, ou To, un To correspondant à 10^{12} octets (*voir L'explosion mémorielle change la donne, par G. Dowek, page 92*), c'est-à-dire sur quelques disques durs dont le coût actuel, de l'ordre de quelques dizaines d'euros, sera amené à décroître encore dans les années qui viennent.

En outre, en miniaturisant plus encore les dispositifs de stockage, ce volume pourra bientôt être stocké sur une montre connectée ou un téléphone portable. Nous aurons donc bientôt tout le savoir du monde au plus proche de nous. Ce constat soulève nombre de questions dont certaines demeurent sans réponse : immédiatement disponible, ce savoir est-il pour autant plus proche de nos têtes ? Dans quelle mesure y a-t-on un véritable accès ? Comment l'interroge-t-on ? Et, si nous sommes en mesure d'y retrouver instantanément tout ce que nous

Le *cloud* et les fermes de serveurs qui l'hébergent sont les dépositaires de notre mémoire. Est-ce vraiment une bonne idée ?

souhaitons, cela ne se fera-t-il pas au détriment de notre propre mémoire qui ne s'entraînera plus à apprendre et qui, du fait de cette déshabituation, en perdra sa capacité ?

REMEDE ET POISON

Cette crainte que notre mémoire interne s'atrophie du fait de la disponibilité de supports externes est ancienne. Dans *Phèdre*, le dialogue de Platon mettant en scène Phèdre et Socrate, l'écriture est vue comme une menace pour la pratique philosophique, en cela que le texte figé trahirait la personne qui l'a écrit, alors que seule sa présence physique, sans médiation, autoriserait le déploiement de la pensée dans son entièreté. Cependant, ce dialogue n'a pu nous être transmis que grâce au texte de Platon, ce qui montre bien l'ambivalence de l'écriture et, corrélativement, des supports externes en général qui conservent une trace de la présence alors que, sans eux, elle aurait disparu à jamais. À cet égard, Jacques Derrida insiste dans *La Pharmacie de Platon* sur ce caractère double de l'écriture qui serait un *pharmakon*, au sens grec, une substance à la fois remède et poison – en l'occurrence ici, remède et poison de la mémoire – selon l'usage qui en est fait.

Aujourd'hui, où des discours comme ceux de Platon dans *Phèdre* ont toujours cours, on s'inquiète parfois des conséquences de la prolifération des mémoires externes sur nos capacités mnésiques. Quelques-uns même sentent confusément, et parfois avec nostalgie, que les véhicules de la culture évoluent. Ainsi, la poésie versifiée n'a-t-elle plus vraiment de lecteurs, elle qui était encore si importante jusqu'au début du XX^{e} siècle. Pourtant, si l'on en croit beaucoup de poètes, elle est à la fois mémoire

par la langue, grâce au mètre et à la rime, et mémoire de la langue.

Parmi ces commentateurs, qui doit-on suivre ? les pessimistes qui craignent que la capacité mnésique s'amenuise, ou les optimistes qui pensent que les modes d'expression se transforment ? Possède-t-on, en tant que scientifiques, des mesures qui permettent d'apprécier l'évolution des capacités mnésiques consécutives à l'emprise du numérique sur nos activités quotidiennes ?

LE QI EN BERNE ?

Certains chercheurs prétendent que le quotient intellectuel (QI) moyen aurait enregistré un recul depuis les quinze dernières années dans les pays occidentaux. Cela correspond à l'inversion de l'effet Flynn, du nom du psychologue James Robert Flynn. Il a montré que durant le XX[e] siècle, les résultats des tests du QI augmentaient au sein d'une même population, sur des cohortes d'âge identique, par exemple au moment du service militaire. Or, depuis le milieu des années 1990, on assisterait à une stagnation, voire à une régression de ces résultats. On invoque de nombreuses raisons, par exemple les perturbateurs endocriniens.

Indépendamment des pseudo-explications à cette baisse du QI, précisons que l'intelligence n'est pas unidimensionnelle : elle est la résultante d'un ensemble de fonctions cognitives disparates (perception, mémoire, apprentissage, raisonnement, communication…). En conséquence, la notion de QI apparaît très discutable au plan scientifique, ce qui relativise ces conclusions. D'ailleurs, des chercheurs, comme Franck Ramus, de l'École normale supérieure, à Paris, les réfutent.

En nous restreignant à la mémoire, nous sommes confrontés aux mêmes difficultés : la mémoire est multiple et ne peut se résumer à un seul indicateur. Ainsi, entre la mémoire consciente et inconsciente, la mémoire déclarative et la mémoire procédurale, la mémoire immédiate et la mémoire à long terme…, nous avons de nombreuses dimensions. Chacune a fait l'objet de bien des travaux scientifiques, mais nous ne disposons pas de suffisamment d'études pour faire des analyses diachroniques. Ajoutons que l'interprétation de telles évolutions paraît d'autant plus difficile que de multiples facteurs interviennent : éducation, habitat, polluants…

Outre les supports externes (cailloux peints, cathédrales, livres…) qui étendent les capacités de notre mémoire, et leur prolifération, à laquelle les technologies de l'information contribuent dans les proportions considérables, il est apparu éventuellement possible, en profitant de l'apport combiné des neurosciences, de l'informatique et des nanotechnologies, de modifier notre mémoire interne, en y greffant des dispositifs technologiques.

Le disque de quartz fondu mis au point par Peter Kazansky, peut contenir jusqu'à 360 To de données, soit plus de 25 BNF.

RÉPARER OU AUGMENTER ?

Dans un premier temps, il s'agit de soigner les troubles mnésiques à l'aide d'implants cérébraux, c'est-à-dire d'appareils électroniques placés dans notre cerveau. Cela s'inscrit dans la continuité des travaux sur les implants cérébraux à visée thérapeutique. L'équipe du neurochirurgien Alim-Louis Benabid, à Grenoble, a été pionnière en proposant avec succès de la stimulation cérébrale profonde à des patients atteints de maladie de Parkinson pour soigner les symptômes les plus gênants, en particulier les tremblements.

Des études sont également menées avec les mêmes techniques chez des patients atteints de maladie d'Alzheimer au CHU de Nice, par Denys Fontaine et son équipe. Un ralentissement ou une stabilisation du déclin cognitif, en particulier des facultés de mémorisation, ont été observés.

De même, à l'université de Californie du Sud, Theodore Berger tente de redonner à des rats et à des singes des fonctions cognitives qu'ils avaient perdues. Pour ce faire, il a associé un enregistrement des signaux cérébraux avec des implants cérébraux, un traitement informatique de ces signaux et une émission de nouveaux signaux toujours avec des implants cérébraux pour permettre avec des « neuroprothèses » de rétablir des connexions neuronales qui auraient été rompues.

Toujours aux États-Unis, d'autres recherches utilisant ce même type de dispositifs et financées par la Darpa (*Defense Advanced Research Projects Agency*) visent à soigner des troubles de stress post-traumatiques ou des addictions, dont on considère qu'ils sont les uns et les autres liés à la mémoire.

Ces quelques succès stimulent des anticipations hyperboliques. Par exemple Theodore Berger et Laurie Pycroft, de l'université d'Oxford, affirment que l'on adjoindra des dispositifs électroniques à nos cerveaux pour étendre nos mémoires. De même, Elon Musk (*voir la figure page 91*), l'entrepreneur médiatique qui promet de transformer les villes avec ses voitures électriques de la société *Tesla* et d'envoyer des hommes sur Mars avec la société *SpaceX*, aborde aussi le secteur des neuroprothèses.

La société *Neuralink*, qu'il a fondée en mars 2017, propose, dans un premier temps, de développer des implants à visée thérapeutique analogues à ceux mentionnés. Elle ambitionne ensuite d'augmenter la mémoire et l'intelligence en greffant des dispositifs électroniques de stockage d'information à notre

cerveau, créant ainsi une sorte d'homme symbiotique dont la mémoire interne serait directement connectée à des mémoires électroniques qui accroîtraient ses capacités. Selon Elon Musk, cette hybridation de l'électronique sur le cérébral se résumerait « simplement [à] une question de bande passante et de rapidité de connexion ». Si c'était vrai, cela signifierait que nous n'aurons bientôt plus besoin de passer des années à apprendre des choses ennuyeuses comme les tables de multiplication, les déclinaisons latines ou l'anatomie pour les médecins : il suffira de charger le bon module…

Cette proposition d'extension de la mémoire individuelle est assez étonnante, car elle relève bien plus de la fiction que de la science. Elle vient d'ailleurs d'un auteur de science-fiction écossais, Iain Banks, qui avait imaginé le concept de « lacet neuronal » (*neural lace*), pour établir la connexion entre notre cerveau et celui des autres.

EXTENSION DU DOMAINE DE LA MÉMOIRE

Elon Musk transpose cette idée à ce qu'il appelle, « l'esprit de ruche » (*hivemind*), la collaboration des esprits qui partageraient entre eux leurs connaissances et leurs opinions. Dans cette perspective, nous nous connecterions chacun à un disque dur et ces disques durs se connecteraient ensuite entre eux, dans un monde fusionnel. Sans doute de telles déclarations d'hommes d'affaires de la Silicon Valley relèvent-elles de stratégies industrielles bien connues où l'on se donne des objectifs à long terme irréalistes qui font rêver, tandis que les objectifs à court terme sont chiffrés et précis. Dans cette éventualité, il importe que des scientifiques démentent de telles annonces qui ne peuvent qu'induire en erreur.

En effet, ce projet d'extension technologique de notre mémoire interne fait fi de la complexité du cerveau qui diffère fondamentalement dans son principe des dispositifs de stockage d'information. Nul ne sait pour l'instant comment les concepts y sont encodés, par exemple comment le concept très concret de *lit* et la notion imaginaire de *sirène* s'y trouvent représentés. Quant au stockage, il est également complexe, puisque la mémoire fait intervenir plusieurs aires cérébrales spécialisées. Enfin, concernant le « rappel » d'une information, différents types de mémoires entrent en jeu, qui sollicitent des aires différentes du cerveau : des mémoires dites inconscientes comme celles qui sont à l'œuvre lorsqu'on reconnaît une personne, des mémoires procédurales qui s'activent quand on marche ou quand on parle, par exemple, des mémoires déclaratives… Bref, il est mensonger de prétendre aujourd'hui être en mesure d'étendre nos capacités cognitives en leur adjoignant des dispositifs électroniques.

Qu'en est-il aujourd'hui de nos mémoires externes collectivement partagées, à savoir des bibliothèques et des médiathèques qui abritent maintenant le patrimoine culturel commun que nous léguerons à nos descendants ? D'un côté, ces mémoires se sont considérablement accrues. Ainsi, on estime que la somme d'information contenue sur la toile en 2020 sera de l'ordre de 40 zettaoctets, un zettaoctet correspondant à 10^{21} caractères. Pour donner une idée de ce à quoi cela correspond, reprenons l'exemple du catalogue de la Bibliothèque nationale de France : la somme d'informations qu'elle contient équivaut à 14 To. En prenant ce volume comme unité de mesure, la « BnF », le web, en 2020 comprendra environ 2,8 milliards de BNF ! Et, ce volume s'accroît considérablement avec le temps, puisque rien que *Twitter* génère quotidiennement 7 To de données, soit 0,5 BNF…

> **Il est mensonger de prétendre aujourd'hui étendre nos capacités cognitives avec des dispositifs électroniques**

LA PÉRENNITÉ DES DONNÉES

Face à cette pléthore de données, se pose la question de la persistance dans le temps des supports externes sur lesquels elles sont stockées. Les tablettes d'argile datant de 2400 ans avant notre ère peuvent encore être déchiffrées. Écrits entre trois siècles avant notre ère et un siècle après, les manuscrits de la mer Morte sont en moins bon état de conservation, mais il est encore possible d'y lire les caractères inscrits. Au XX^{e} siècle, les CD-Rom n'avaient qu'une durée de trois ans seulement en utilisation intensive !

Aujourd'hui, pour la sauvegarde de nos données, le *cloud* serait la solution. En réalité, cela ne résout aucunement le problème de la pérennité des données. Le *cloud* stocke un plus grand volume de données que nos mémoires locales, mais il n'en repose pas moins sur des

supports matériels, dont la durabilité reste très limitée… La persistance garantie des données sur le *cloud* serait de 100 ans. Cette durée reste à vérifier, mais cela signifie *a fortiori* que nous n'avons aucun support permettant un stockage au-delà du siècle. Cela contraint les responsables des archives à faire migrer régulièrement les données sur de nouveaux supports afin de prolonger leur durée de vie. Ainsi, l'hypermnésie qui caractérise notre époque tend simultanément, et corrélativement, à l'amnésie…

LUTTER CONTRE L'AMNESIE

La question de la pérennité des documents n'est pas souvent évoquée par les médias. Elle est pourtant cruciale dans de nombreux domaines. La recherche de supports inaltérables fait l'objet du Groupement d'intérêt scientifique (GIS) SPADON. Associant l'Institut national de l'audiovisuel (INA) à différents laboratoires français, il a pour mission de préserver et de numériser les archives audiovisuelles menacées de dégradation par le temps avec des solutions d'archivage plus satisfaisantes que celles qui existent. Les travaux de ces laboratoires portent sur de nouveaux types de disques optiques, sur l'analyse du vieillissement des archives sonores, sur l'évaluation des matériels et logiciels utilisés pour sauvegarder les données et sur l'étude des conditions de conservation des supports.

Peter Kazansky et son équipe de l'université de Southampton, en Angleterre, ont mis au point un disque de verre, qui pourrait contenir 3 000 fois plus de données qu'un Blu-ray de même dimension (un Blu-ray contient de 50 à 200 Go) et résister pendant 14 milliards d'années. Cette prouesse technologique repose sur une technologie de stockage en cinq dimensions. Les données sont inscrites dans du quartz fondu, un matériau extrêmement stable (il résiste aux rayons cosmiques et à des températures jusqu'à 1 000 °C), à l'aide d'un laser femtoseconde. Les cinq dimensions renvoient à la taille, l'orientation et les trois dimensions spatiales des informations stockées. Elles sont lues avec un microscope optique et un polariseur.

Cette technologie n'est pas encore sortie des laboratoires, mais elle montre qu'il existe des solutions en perspective. Elle est déjà utilisée depuis 2018 par l'Arch Mission Foundation, un organisme qui s'est donné pour mission de créer de nombreuses bibliothèques conservant l'ensemble des connaissances humaines pour les générations futures, sur Terre et… ailleurs. Un disque a d'ores et déjà été envoyé dans l'espace par… Elon Musk!

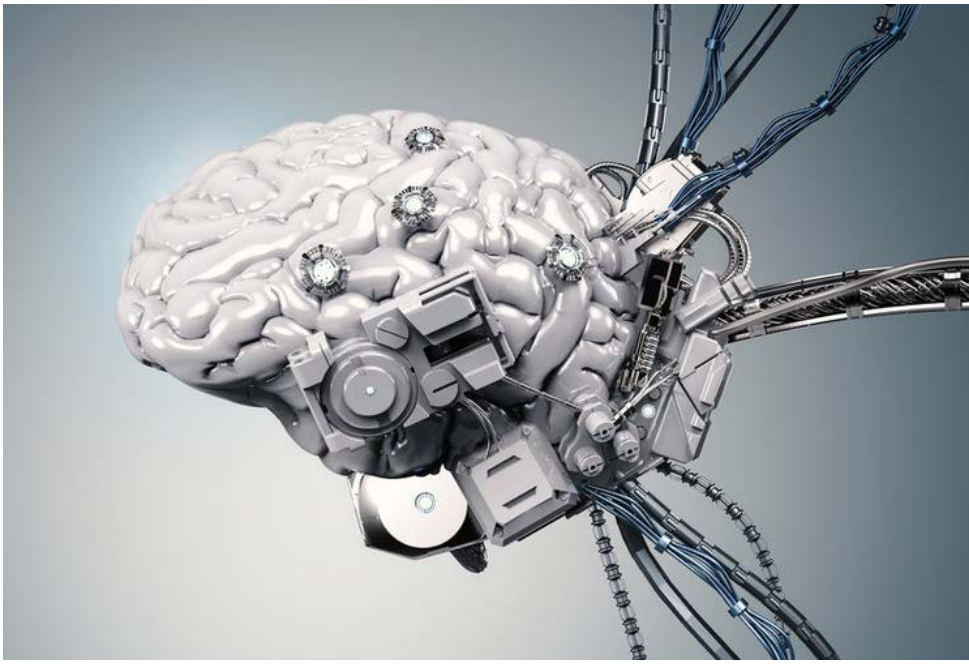
Une question reste en suspens. Que faire de ces masses de données accumulées dans les supports numériques de stockage d'information? Peut-on les utiliser, comme certains le prétendent pour prédire l'avenir?

Dès l'Antiquité, Cicéron distinguait deux types de divination pour prédire le futur: la parole inspirée – celle de la Pythie – et la corrélation entre les signes, dont il disait qu'elle était «scientifique». Cette dernière se fondait en effet sur l'observation d'un grand nombre d'événements reliés entre eux pour effectuer des prédictions. Longtemps, les gouvernants examinaient les présages avant de partir en guerre, à savoir la corrélation entre des signes apparemment anodins, et le sort. À l'aube de la période moderne, Machiavel propose aux dirigeants un type d'anticipation rationnel différent, en les enjoignant de considérer toutes les hypothèses, c'est-à-dire toutes les possibilités théoriques, puis de les évaluer une à une, à partir des leçons du passé, en calculant la probabilité de chacune d'entre elles.

Un disque de verre pourrait contenir 3 000 fois plus de données qu'un Blu-ray de même dimension

L'ANTICIPATION DU FUTUR

De nos jours, l'apprentissage machine tel qu'il est mis en œuvre en intelligence artificielle, est aussi une espèce d'anticipation du futur à partir du passé, à savoir une forme de divination. Ce que l'on présente comme étant le *nec plus ultra* de la technologie reste fondé sur les détections de corrélations. Dans l'apprentissage supervisé, un «enseignant» fournit à la machine des exemples type (que l'on appelle des exemples étiquetés parce qu'ils sont annotés manuellement avec un jeu d'étiquettes fourni à l'avance), à partir desquels cette dernière établit des corrélations, comme associer les caractéristiques propres à une image, en l'occurrence l'image d'un visage, avec son étiquette, par exemple le nom de la personne. Des techniques actuelles permettent – lorsque le nombre d'exemples croît et que l'on utilise de grandes masses de données, ce qui correspond au *big data* – de réduire considérablement le taux statistique d'erreur de la machine lors de la reconnaissance et du



Elon Musk, entrepreneur médiatique et PDG de *Neuralink*, entre autres, prévoit de connecter un cerveau humain à un dispositif électronique afin d'augmenter la mémoire humaine et son intelligence. Ce projet ne résiste pas à une analyse scientifique.

classement d'images. Cela permet de rationaliser les choix en tirant parti des leçons du passé pour se comporter mieux dans le futur. Ces avancées jouent aujourd'hui un rôle central pour la prise de décision dans beaucoup de secteurs. Toutefois, il est essentiel de souligner que «corrélation» ne signifie pas «causalité». Quoi qu'il en soit, notre vision du futur va évoluer avec le temps, comme elle l'a toujours fait.

LA RELIGION DU FUTUR

L'étude rétrospective des anticipations est d'ailleurs riche d'enseignement. Elle constitue une mémoire du futur, au sens d'une mémoire des conceptions du futur. Les œuvres de science-fiction y ont indubitablement une place. Celles de «pop-science» aussi. C'est le cas du très récent *Homo deus, Une brève histoire de l'avenir*. Ce phénomène de librairie révèle ce que les femmes et les hommes de notre temps sont prêts à croire. L'auteur, l'historien Yuval Noah Harari, distingue dans le passé de l'humanité trois grandes phases.

Dans la première, les hommes étaient soumis aux aléas de la nature, sans rien comprendre. Pour donner un sens à ce qui advenait, ils auraient créé des dieux, ce qui aurait conduit à l'invention des religions traditionnelles. Dans la deuxième phase, l'homme aurait commencé à maîtriser les phénomènes naturels grâce au développement de la science. Ce faisant, il se serait pris à penser qu'il n'existait plus de limite à son savoir et qu'il était lui-même la valeur suprême: cela conduisit à une nouvelle religion sans dieux, la religion de l'humain, l'humanisme.

Aujourd'hui, toujours aux dires d'Harari, nous aurions atteint une troisième phase de l'évolution de l'humanité dans laquelle, avec le développement de la génétique, de l'informatique, de la science et de la médecine, les machines que nous avons créées en sauraient plus sur nous que nous-mêmes. Grâce aux masses de données emmagasinées et traitées par l'intelligence artificielle, elles nous dépasseraient d'ores et déjà et pourraient même nous supplanter.

Et, puisque ce sont les données qui sont à l'origine de cette puissance des machines, Harari émet l'hypothèse selon laquelle une nouvelle religion émergera, celle des données (data) qu'il appelle donc le «dataïsme». L'autorité divine y serait remplacée par celle des données, qui s'imposera aux individus comme aux sociétés. Il prétend que l'analyse des données permettra bientôt de remplacer les anciens usages démocratiques, comme les élections.

D'après Harari, les tenants de cette nouvelle religion (les dataïstes) considéreront que bientôt les hommes ne pourront plus gérer le flux de données, c'est-à-dire leur mémoire, et qu'il leur sera préférable de s'en remettre aux algorithmes pour les analyser. Bref, cette mémoire du futur (la mémoire des activités humaines stockée sur des supports externes) sera mortifère puisqu'elle conduira à priver l'humanité de sa liberté pour la déléguer à des machines.

Cependant, un examen rétrospectif montre qu'au début de l'âge moderne des penseurs comme Spinoza niaient de la même façon le libre arbitre, au nom du déterminisme de la nature, ce qui vient contredire l'hypothèse selon laquelle l'humanité entrerait dans une nouvelle ère, le dataïsme qui différerait radicalement de l'humanisme. Nous voilà rassurés... ou pas. ■

Cet article est adapté d'un chapitre du livre *La Mémoire au futur*, Le Pommier, 2018.

BIBLIOGRAPHIE

J.-G. GANASCIA, *Le Mythe de la singularité. Faut-il craindre l'intelligence artificielle?*, Le Seuil, 2017.

J. KLOTZBACH *ET AL.*, Eternal 5D data storage by ultrafast laser writing in glass, *SPIE Proceedings*, vol. 9736, p. 97360, 2016.

J. SUNDET, The end of the Flynn Effect? A study of secular trends in mean intelligence test scores of Norwegian conscripts during half a century, *Intelligence*, vol. 32, p. 349, 2004.

L'ESSENTIEL

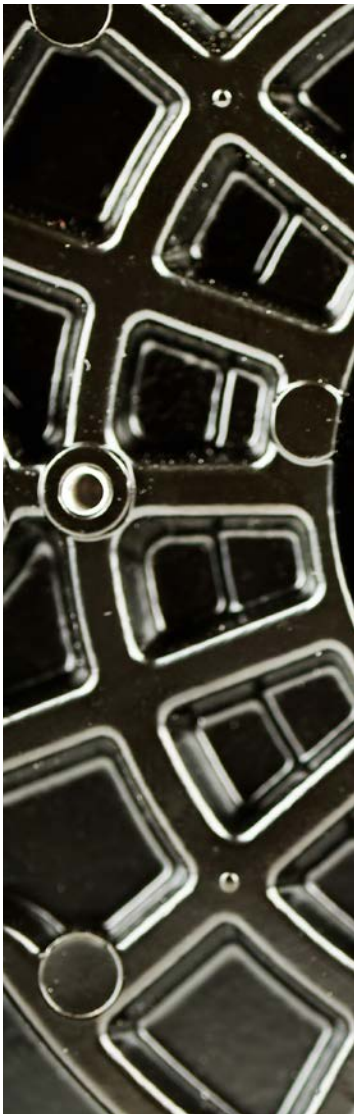
- Un disque de quelques centimètres, qui coûte moins de 100 euros, peut contenir aujourd'hui l'équivalent d'une bibliothèque nationale.
- De telles mémoires de stockage, par les possibilités qu'elles offrent, bouleversent l'activité scientifique et nécessitent des développements informatiques.
- Elles modifient aussi notre rapport au passé et ouvrent des perspectives dans de nombreux domaines : la politique, l'économie, l'éducation...

L'AUTEUR

GILLES DOWEK
est chercheur en informatique à l'Inria, au sein de l'équipe *Deducteam*.

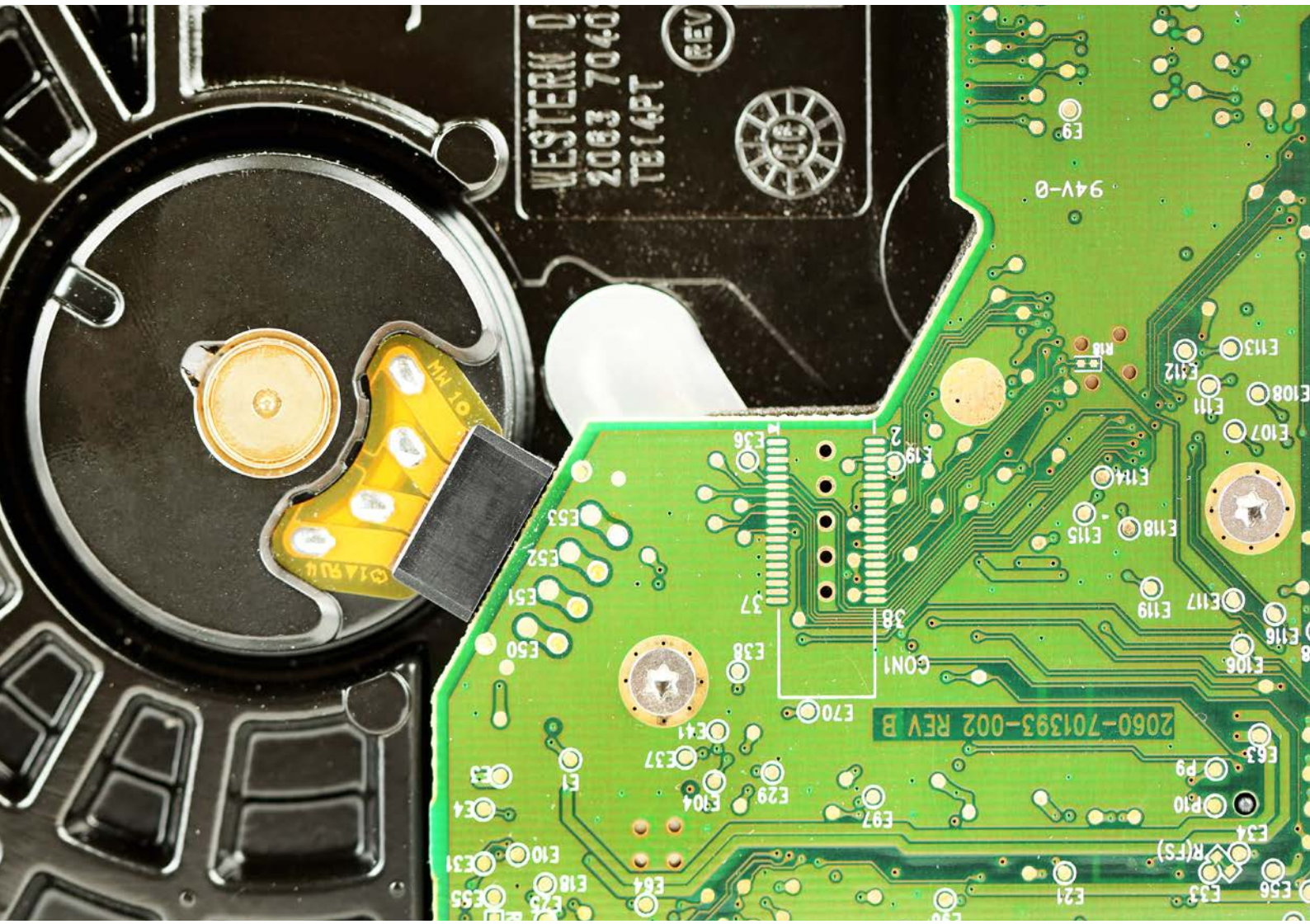
L'explosion mémorielle change la donne

On peut aujourd'hui facilement stocker d'énormes quantités d'information. Cette formidable mémoire n'est pas qu'un changement quantitatif : elle annonce des transformations profondes dans la société.



Révolution dans le monde de l'informatique : les nouveaux ordinateurs Macintosh pourront lire... des disquettes trois pouces et demi stockant jusqu'à 1,44 mégaoctet ! C'était en 1984. Depuis, ces disquettes ont été remplacées par les CD-Rom, les clés USB et désormais les data centers de l'informatique «dématérialisée». En quelques décennies, les capacités de production et de stockage de l'information ont énormément augmenté, menant à un «déluge de données». Cette croissance s'accompagne de nombreux défis scientifiques et techniques : il faut notamment améliorer les performances des matériels et des logiciels, garantir la sécurité et la pérennité des données, concevoir des méthodes pour les exploiter... Ce n'est pas tout. On ne peut s'intéresser à ces questions scientifiques et techniques sans se pencher sur leur impact sur les individus et les sociétés.

Le déluge de données est d'abord un changement de nature quantitative. Nous pouvions naguère collecter, stocker, transmettre et transformer de petits volumes d'information :



De petits disques de sauvegarde ayant une capacité de un téraoctet sont désormais disponibles pour quelques dizaines d'euros. Or un téraoctet correspond à peu près à l'information contenue dans une bibliothèque d'un million de livres de 1000 pages chacun ! Quelle société prépare cette orgie de mémoire ?

nous pouvons désormais faire de même avec les volumes d'information plus grands. Toutefois, comme souvent, un changement quantitatif annonce un changement qualitatif. La lunette de Galilée n'était qu'un œil qui permettait de voir des objets plus petits et plus lointains ; mais la découverte de ces objets a révolutionné l'astronomie et, au-delà, la physique. De même, l'augmentation des capacités des mémoires numériques transforme le champ des problèmes scientifiques, les méthodes de la recherche et la forme même de nos connaissances.

UNE SOCIÉTÉ BOULEVERSÉE

La portée de ces changements ne concerne pas uniquement la science. Notre rapport au temps, nos institutions politiques, nos économies, nos systèmes éducatifs… sont bouleversés.

Pour mieux comprendre ces transformations, commençons par donner quelques ordres de grandeur. Les quantités d'information s'expriment, comme toute autre grandeur, dans une certaine unité. L'unité fondamentale est le bit, qui correspond à un choix binaire (0 ou 1), mais on utilise souvent une unité dérivée, l'octet, égal à huit bits et qui correspond donc à un choix parmi $2^8 = 256$ possibilités.

Un octet est, *grosso modo*, la quantité d'information contenue dans une lettre de notre alphabet qui, en comptant les majuscules, les minuscules, les lettres accentuées, les chiffres, les ligatures, les signes de ponctuation, etc., en contient un peu plus d'une centaine.

Un kilooctet, soit 1000 octets, est à peu près la quantité d'information contenue dans une page de livre. Un mégaoctet, soit

1 000 kilooctets, correspond à l'information contenue dans un livre d'environ 1000 pages. Un gigaoctet, égal à 1000 mégaoctets, est approximativement la quantité d'information contenue dans une bibliothèque personnelle de 1000 volumes. Un téraoctet, soit 1 000 gigaoctets, est environ la quantité d'information contenue dans la collection de livres et imprimés de la Bibliothèque nationale de France, qui contient quelques millions de volumes. Le multiple suivant est le pétaoctet, qui vaut 1000 téraoctets. Certains suggèrent qu'un pétaoctet correspond à la quantité d'information contenue dans l'ensemble des cultures humaines, même si cette quantité est difficile à évaluer.

Bien entendu, dans cette échelle – lettre (octet), page (kilooctet), livre (mégaoctet), bibliothèque personnelle (gigaoctet), bibliothèque nationale (téraoctet), ensemble des cultures (pétaoctet) –, ce sont les ordres de grandeur et non les détails qui comptent. Par exemple, les images et les vidéos sont plus denses en information que les textes – une heure de vidéo contient ainsi une dizaine de gigaoctets, alors qu'une heure de lecture (quelques dizaines de pages) contient quelques dizaines de kilooctets. Et la collection de livres et imprimés de la Bibliothèque nationale de France comporte en réalité 14 millions de volumes, et non un million.

Cependant, cette échelle aide à comprendre les transformations que nous sommes en train de vivre, depuis qu'un disque permettant de stocker un téraoctet ne coûte que quelques dizaines d'euros. Ces changements concernent toutes nos activités qui consistent à collecter, stocker, transmettre et transformer de l'information… c'est-à-dire une grande partie de nos activités !

VERS L'ORDINATEUR THÉORICIEN

Commençons par les sciences, qui ont toujours comporté une part de collecte d'information. Par exemple, l'observation des satellites de Jupiter par Galilée ou les observations recueillies par Darwin lors de son voyage à bord du *Beagle* ont joué un rôle essentiel dans la construction de leurs théories. Mais la quantité d'information collectée par les scientifiques d'aujourd'hui est d'un tout autre ordre de grandeur.

Le résultat du séquençage d'un génome humain, qui comporte 3,4 milliards de paires de bases, équivaut ainsi à un texte dont la taille est de l'ordre d'un gigaoctet, soit la taille d'une bibliothèque de 1000 volumes. Quant au LHC, le grand collisionneur de particules du CERN, il produit *via* ses détecteurs plusieurs pétaoctets de données chaque année, soit plusieurs milliers de fois la taille de la collection de livres et imprimés de la Bibliothèque nationale de France. Et les astronomes collectent des volumes de données encore plus… astronomiques.

Parce qu'ils demandent de brasser de telles quantités d'information, des projets tels que le séquençage du génome ou la recherche du boson de Higgs n'étaient pas à la portée des scientifiques avant la fin du XX^{e} siècle. Ce sont donc des domaines de recherche entiers qui s'ouvrent, depuis peu, à nous.

Si cette transformation touche la nature des problèmes que les scientifiques peuvent se poser et tenter de résoudre, elle a également un impact sur la démarche scientifique et la forme même de nos connaissances.

La démarche d'abord : naguère, les scientifiques notaient leurs observations dans des « cahiers de manip » (*voir la figure page ci-contre*) et s'inspiraient de ces données pour imaginer des théories – c'est ce que l'on appelle l'induction – ou pour confronter les théories imaginées aux observations, afin de réfuter celles qui n'étaient pas en adéquation avec ces dernières. L'importance relative de l'induction et de la réfutation est, aujourd'hui encore, une question débattue. Quoi qu'il en soit, avec des « cahiers de manip » dont la taille se mesure en gigaoctets ou en téraoctets, il est devenu impossible tant de confronter « à la main » les théories aux observations que de s'inspirer de ces observations pour imaginer des théories.

La confrontation des théories aux observations demande un traitement informatique aussi bien des données observées que de la théorie elle-même, qui doit être exprimée sous une forme prédictive, c'est-à-dire algorithmique, pour qu'elle puisse être automatiquement confrontée aux données observées. Et l'utilisation des observations pour imaginer des théories demande un traitement informatique plus difficile encore, appelé « apprentissage automatique ».

Une question typique en apprentissage automatique est de savoir si les lois de Kepler (qui décrivent les trajectoires des planètes autour du Soleil) peuvent être découvertes par un algorithme à partir des observations de Tycho Brahe, que Kepler a utilisées pour concevoir ses lois. Une autre est de savoir s'il est possible, à partir de grands corpus de textes, d'inférer automatiquement des règles de grammaire ou des règles de traduction d'une expression d'une langue en une autre.

En extrapolant – peut-être dangereusement – les évolutions actuelles de la méthode scientifique, nous allons peut-être vers un temps où les observations seront tellement volumineuses que la construction de théories à partir des observations sera une tâche laissée exclusivement aux ordinateurs, le rôle des scientifiques devenant alors de concevoir des algorithmes qui permettraient de construire des théories à partir des observations.

L'échelle des octets

OCTET : unité égale à huit bits, codant $2^8 = 256$ caractères.

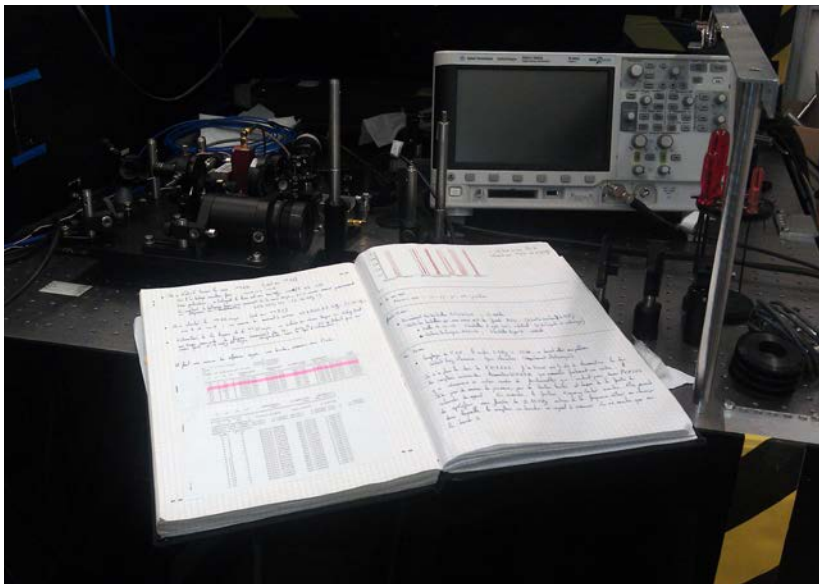
KILOOCTET (Ko) : 10^3 octets (environ une page d'un livre).

MEGAOCTET (Mo) : 10^6 octets (un livre de 1000 pages environ).

GIGAOCTET (Go) : 10^9 octets (une bibliothèque de un millier de livres).

TERAOCTET (To) : 10^{12} octets (une grande bibliothèque nationale).

PETAOCTET (Po) : 10^{15} octets (l'ensemble des cultures humaines ?).



Un cahier de laboratoire, la mémoire d'une expérience, où l'on consigne les résultats. De plus en plus, ces cahiers prennent une forme électronique. Certains d'entre eux contiennent des téraoctets de données, voire plus : leur exploitation ne peut se faire qu'avec des moyens informatiques.

IL EST DEVENU IMPOSSIBLE TANT DE CONFRONTER « À LA MAIN » LES THÉORIES AUX OBSERVATIONS QUE DE S'INSPIRER DE CES OBSERVATIONS POUR IMAGINER DES THÉORIES

Cette transformation progressive de la démarche scientifique en induit une autre sur la connaissance scientifique elle-même. Jusqu'à la fin du XX[e] siècle, les théories scientifiques étaient exprimées par des propositions de petite taille. Par exemple, la deuxième loi de Newton (selon laquelle la force s'exerçant sur un objet est égale au produit de sa masse par son accélération) s'exprime par une proposition d'une dizaine de caractères : $\vec{F} = m\, d^2\vec{x}/dt^2$. Mais rien ne garantit que les théories automatiquement inférées à partir de gigantesques volumes d'observations soient petites. De fait, nous commençons à prendre conscience qu'il n'y a aucune raison *a priori* pour que les lois de la nature ou les règles de la grammaire d'une langue s'expriment par de courts énoncés.

La grammaire d'une langue, par exemple, contient sans doute des milliers de règles dont certaines ne portent que sur des expressions très particulières. En français, on peut dire « je viendrai lundi 2 septembre » ou « je viendrai le lundi 2 septembre » ; on peut aussi dire « je viendrai demain », mais pas « je viendrai le demain ». Il semble ainsi y avoir des règles de grammaire locales propres aux dates, qui diffèrent des règles de grammaire relatives aux adverbes de temps. Et si nous mettons bout à bout toutes ces règles de grammaire locales propres aux dates, aux noms de pays et autres toponymes (on va « en Russie », mais « au Brésil » et « à Madagascar »), on obtiendra probablement des connaissances qui ne peuvent pas s'exprimer, comme la deuxième loi de Newton ou les équations de Maxwell régissant les champs électromagnétiques, en quelques dizaines de caractères (*voir l'encadré page suivante*).

QUE DEVIENT LE SCIENTIFIQUE ?

En fait, cette idée est légèrement antérieure au déluge de données. Elle est sans doute apparue quand nous avons pris conscience que les lois qui régissent l'évolution de l'atmosphère ou le fonctionnement d'une cellule, par exemple, ne pouvaient pas s'exprimer en quelques lignes.

Lorsqu'une théorie s'exprime par des énoncés ou des algorithmes qui font des centaines de pages, le lien entre prévision et explication se distend. Ainsi, nous avons pris l'habitude d'accepter que les prévisions météorologiques indiquent le temps du lendemain avec une probabilité de succès assez élevée, mais qu'elles ne nous expliquent pas pour quelles raisons ce lendemain sera ensoleillé ou pluvieux. Les lois de Newton, au contraire, nous permettent non seulement de prédire que les trajectoires des planètes sont des ellipses, mais aussi de comprendre pourquoi.

Si nous ne pouvons pas expliquer le temps du lendemain, c'est précisément parce que la situation météorologique n'est pas le résultat d'une cause unique, comme le mouvement d'une planète est le résultat de l'attraction d'une étoile, mais de milliers de causes particulières desquelles il est difficile de faire émerger une explication globale.

Comme les données, ces théories sont trop complexes pour être utilisées « à la main » : seul un ordinateur peut les exploiter pour faire des prédictions. En extrapolant – à nouveau, peut-être dangereusement – les évolutions de la forme des théories scientifiques, nous pouvons imaginer que l'élaboration des prédictions sera un jour entièrement déléguée aux ordinateurs, et que les scientifiques auront alors pour rôle de concevoir des algorithmes permettant aux ordinateurs de calculer des prédictions à partir d'une théorie.

Il est cependant essentiel de garder en tête que, comme les autres théories scientifiques, ces théories restent des hypothèses, toujours à la merci d'une réfutation par les observations, et que leur pertinence ne tient qu'à leur capacité à résister à ces réfutations potentielles. Le risque est grand de prendre pour des oracles >

des prédictions produites par des ordinateurs à partir de théories trop complexes pour être comprises. Par exemple, contrairement à ce que l'on entend parfois, ce n'est pas le fait que tous les modèles climatiques s'accordent dans leurs prédictions qui importe, mais le fait que les prédictions passées aient été en accord, ou non, avec les observations.

Comme souvent, ces transformations de la technique et de la science en annoncent d'autres, dans divers autres domaines de notre culture. Un premier changement, conséquence de cette capacité nouvelle de collecter, stocker, transformer et transmettre de grandes quantités d'information, est celui de notre rapport à la mémoire et au passé.

La plupart des quelque 100 milliards de femmes et d'hommes qui ont vécu avant nous n'ont laissé aucune trace de leur passage sur Terre. Par exemple, malgré l'écriture et l'imprimerie, peu d'entre nous peuvent citer le nom et le prénom de leurs 16 arrière-arrière-grands-parents. Et les plus anciennes personnes dont nous connaissons le nom, sans doute quelques souverains de Mésopotamie ou d'Égypte, remontent à un passé relativement récent. De l'histoire de l'humanité durant les centaines de milliers d'années qui les ont précédés, depuis l'apparition des premiers *Homo sapiens*, nous n'avons presque aucune trace.

UN *BIG BROTHER* HYPERMNÉSIQUE

Les femmes et les hommes des siècles prochains auront une vision bien différente de leur passé, car les capacités actuelles de stockage de l'information rendent l'humanité hypermnésique. Ainsi, nos descendants connaîtront mieux que nous leur arbre généalogique ; et au lieu d'un nom laissé, pour toute trace, dans un registre d'état civil, ils pourront conserver sur chacun de leurs lointains ancêtres une grande quantité d'informations. Et les futurs historiens rendent jaloux ceux d'aujourd'hui, car ils disposeront de documents bien plus nombreux et complets.

Cette médaille a son revers : il n'est pas si facile de vivre en sachant que chacun de ses gestes laisse potentiellement une trace à la postérité – c'est vivre avec un *Big Brother* hypermnésique. Aussi est-il probable, et souhaitable, que se développera un véritable droit à l'oubli, afin de permettre à chacun de décider des traces qu'il souhaite effacer ou transmettre. Ces préoccupations sont à l'origine des recherches des informaticiens qui développent des techniques pour protéger la vie privée, par exemple celle des personnes enregistrées dans des bases de données.

D'autres éléments de la culture humaine transformés par cette capacité nouvelle à collecter, stocker, transmettre et transformer de grandes quantités d'information sont les institutions politiques. Notre démocratie représentative a été inventée aux XVII^e^ et XVIII^e^ siècles, à une époque ou le débit de l'information que chaque citoyen pouvait communiquer à la collectivité – et, de façon symétrique, la collectivité à chaque citoyen – était très faible.

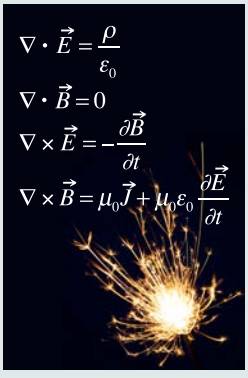
De fait, en participant tous les cinq ans à l'élection d'un chef d'État parmi 16 candidats, chaque citoyen communique à la collectivité une information de quatre bits. Le débit d'information est donc de 0,8 bit par an – soit 2×10^{-8} bit par seconde. On peut ajouter l'information communiquée lors des élections législatives, locales..., l'ordre de grandeur reste le même : quelques bits par an.

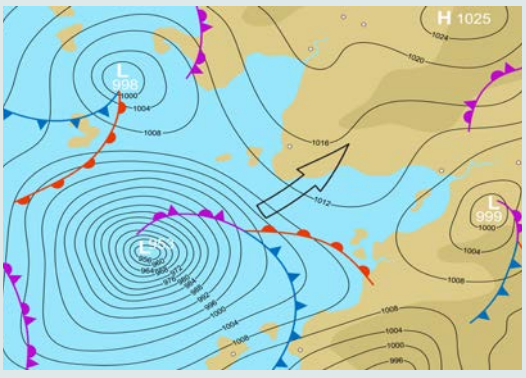
Aussi, jusqu'au XX^e^ siècle, de nombreuses stratégies – tracts, pétitions, manifestations, etc. – ont été inventées pour accroître cette quantité. Ces formes de militantisme ont vieilli et sont aujourd'hui remplacées par d'autres : sites Web, pétitions en ligne... La faible quantité d'information échangée a également pour conséquence que, lors d'une unique élection, nous décidons à la fois du devenir de l'armée, de la police, de la justice, de la diplomatie, de l'éducation, de la recherche, de la santé, des arts, du logement, de

DES THÉORIES SCIENTIFIQUES QUI S'ALLONGENT ?

Les phénomènes électriques et magnétiques, telles des étincelles *(à gauche)*, sont bien [illegible] électromagnétique élaborée par James Clerk Maxwell vers 1870. Cette théorie s'exprime sous forme compacte par quatre équations vectorielles (les « équations de Maxwell ») mettant en jeu le champ électrique $\vec{E}$ et le champ magnétique $\vec{B}$. En revanche, les prévisions météorologiques *(à droite)* résultent de modélisations théoriques et de calculs qu'il est impossible d'exprimer sous forme courte. Avec les données massives, les situations de ce type seront probablement de plus en plus fréquentes.

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$
$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$
$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$
$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$





l'économie, de l'agriculture, du travail… Un chef d'État, comme un roi de jadis, est en effet en charge de toutes ces questions.

L'augmentation du débit de l'information que chaque citoyen peut communiquer à la collectivité et que la collectivité peut communiquer à chaque citoyen permet d'imaginer d'autres formes de démocraties, par exemple des systèmes électifs où plusieurs représentants, élus indépendamment les uns des autres, gèrent chacune de ces questions. La séparation des pouvoirs, jusqu'ici limitée aux trois pouvoirs législatif, exécutif et judiciaire, sera peut-être bientôt rendue possible à une toute autre échelle. Cette augmentation de la quantité d'information que chaque citoyen peut échanger avec la collectivité est sans doute l'une des causes du vieillissement rapide de nos institutions, qui ne sont plus en phase avec les techniques.

NOURRIR L'ÉCONOMIE

Une autre transformation est celle de nos économies, dont l'information est, selon une métaphore déjà un peu usée, le nouveau pétrole. Par exemple, chacun de nos achats en ligne, ainsi que dans un magasin dont nous détenons une carte de fidélité, permet aux commerçants de construire notre profil de consommateur et de nous proposer des produits adaptés à nos besoins et nos désirs. Mais ces constructions de profils individuels ne sont qu'une partie de l'énorme iceberg que représentent les données en économie.

Il est ainsi devenu possible de suivre en temps réel la progression d'une épidémie de grippe simplement en comptant le nombre de requêtes dans un moteur de recherche qui portent sur un mot lié à la grippe – alors que les signalements par les médecins aux autorités de santé ne permettent de suivre la progression d'une épidémie qu'avec plusieurs jours de retard. Ce type d'information est beaucoup plus utile à l'industrie pharmaceutique, qui essaie d'anticiper nos besoins en médicaments, que de construire le profil de tel ou tel consommateur.

De même, les achats de pétrole ou de gaz sont conditionnés à la fois par les prévisions météorologiques à moyen terme et par l'analyse du comportement collectif des consommateurs en réaction à une vague de froid ou à un hiver clément. Sans de telles analyses, il deviendra rapidement impossible pour une entreprise de se maintenir sur le marché du gaz ou des médicaments. Et cela explique, parmi d'autres raisons, que certains pays, dont la Chine, aient décidé de développer leurs propres moteurs de recherche et de limiter l'accès aux moteurs de recherche étrangers, pour ne pas laisser fuir cette information, comme nous le faisons en Europe.

Lorsqu'un citoyen vote, il communique à la collectivité, *via* son bulletin, quelques bits d'information à peine. La technologie actuelle permet pourtant de transmettre beaucoup plus d'information par des sites Web, des blogs… À quand des institutions politiques adaptées, qui profiteraient de ces capacités techniques ?

Un autre domaine qui subit l'influence du déluge de données est celui de l'éducation. Depuis quelque temps déjà, les enseignants savent que toutes les connaissances qu'ils transmettent à leurs élèves sont déjà disponibles sur le Web. Le rôle des enseignants n'est plus d'être une source d'information, la bouche d'où sourd la connaissance, mais de donner un sens à cette information, d'aider leurs élèves à se l'approprier et de leur en montrer la cohérence et l'utilité.

Le déluge de données bouleverse le secteur de l'éducation plus radicalement encore, en transformant l'enseignement à distance. Nous prenons conscience rétrospectivement du caractère élitiste des universités du XX^e^ siècle, qui s'adressaient uniquement à ceux qui pouvaient être présents quand la connaissance sortait de la bouche de l'enseignant. Pour les autres, qui travaillent en plus d'étudier, ou qui vivent dans un village ou un bidonville loin des centres universitaires, rien n'était possible. L'augmentation des capacités de stockage de l'information, en permettant l'enregistrement des cours en vidéo et leur accès de manière souple et depuis le monde entier, contribuera sans doute à réaliser ce vieux rêve d'une éducation pour tous.

Nous comprenons plus ou moins l'impact de ces possibilités nouvelles de collecter, stocker, transformer et transmettre de l'information à grande échelle sur tel ou tel élément de notre culture – la science, la politique, l'économie, l'enseignement, etc. Mais nous avons encore du mal à penser globalement ces transformations. C'est le défi qui s'offre aujourd'hui à nous. ■

BIBLIOGRAPHIE

Dossier « Universités en ligne », *Pour la Science n° 431*, pp. 33-49, septembre 2013.

M. SERRES, *Petite Poucette*, Le Pommier, 2012.

E. HOOG, *Mémoire année zéro*, Seuil, 2009.

L'ESSENTIEL

- La plupart des souvenirs sont modifiables à condition d'être traités à un moment crucial.
- La règle fondamentale est que le souvenir doit être réactivé. Cela peut être réalisé pendant le sommeil ou par des indices appropriés.
- Lorsqu'un souvenir est réactivé, il peut être consolidé par des sons, des stimulations électriques ou des molécules neuroactives.
- L'effacement de souvenirs par des médicaments est également possible.

L'AUTEUR

ROBERT JAFFARD est professeur émérite de neurosciences à l'université de Bordeaux

Des souvenirs à la carte

Mieux apprendre, consolider certains souvenirs certes, mais pourquoi ne pas éliminer ceux qui sont inutiles ? Telle est la voie ouverte par les récentes découvertes sur notre cerveau. Des molécules de l'oubli seront-elles bientôt disponibles ?

À première vue, il paraît bien ambitieux de vouloir contrôler la mémoire. Se concentrer pour bien apprendre ses leçons, faire quelques exercices de mots croisés, voilà ce qui vient à l'esprit lorsqu'on parle de « mieux mémoriser ». Quant à espérer qu'un moment particulièrement précieux s'ancre plus efficacement dans nos souvenirs ou qu'une leçon de piano soit mieux assimilée, cela semble hors de portée. Notre inconscient ne déploie-t-il pas son alchimie en marge de notre volonté ? Quant à imaginer ressusciter un jour des souvenirs ensevelis par la maladie d'Alzheimer...

LA PÂTE MOLLE DES SOUVENIRS

Prenons les problèmes les uns après les autres. Les souvenirs ne sont pas forcément ce que l'on pense. Si un mot devait les caractériser, ce serait « malléabilité ». Les souvenirs, loin d'être gravés dans le marbre, sont faits d'une pâte molle... si molle qu'on peut même y inscrire des faits qui n'ont jamais existé. C'est ce qu'a prouvé la psychologue américaine Elizabeth Loftus en amenant des gens comme vous et moi à croire qu'ils avaient rencontré le lapin Bugs Bunny lors d'une visite à Disneyland, uniquement en insérant une photo de ce personnage dans un dépliant du parc d'attractions qu'ils devaient feuilleter. Non seulement les lecteurs étaient persuadés d'avoir rencontré le lapin, mais ils en

avaient créé un souvenir aussi réel et évocateur que leurs véritables souvenirs d'enfance (*voir Le tapping de la mémoire, par Pierre Marie Lledo, page 52*). Rappelons que Bugs Bunny est totalement étranger à l'univers Disney... Si la mémoire peut être modifiée par des images, tout devient possible. D'ailleurs, les nouvelles connaissances sur le cerveau ouvrent la voie à des modifications du même ordre, voire supérieures.

DORMEZ, APPRENEZ...

C'est une des grandes découvertes de ces dernières années: quand nous dormons, nos souvenirs sont accessibles et modifiables de l'extérieur. Tout simplement parce qu'ils sont réactivés par le cerveau qui les traite alors de diverses façons, en les consolidant notamment quand ils ont une valeur affective ou utilitaire particulière (*voir Dormir pour mieux se souvenir, par K. Paller, page 28*).

Ce constat a émergé dans les années 1990, lorsque deux équipes américaines ont étudié, chez des rats endormis, le fonctionnement de l'hippocampe, une sorte de porte d'entrée des souvenirs et aussi centre de traitement. L'hippocampe est muni de neurones particuliers qui mémorisent l'emplacement qu'a occupé l'animal au cours de la journée. Lors de ses déplacements, le rat photographie en quelque sorte ses différentes positions et active, pour chacune d'entre elles, une combinaison bien précise des neurones de l'hippocampe qu'on appelle «cellules de lieu». Ces cellules gardent la mémoire de chaque lieu visité et construisent une carte mentale de l'environnement du rat. Ce GPS cérébral a valu le prix Nobel de médecine, en 2014, à John O'Keefe, de l'University college, à Londres, et à May-Britt Moser et Edvard Moser, de l'université des sciences et technologies, à Trondheim, en Norvège.

Or, les chercheurs ont constaté que, pendant le sommeil, ces mêmes cellules de lieu se réactivent, selon une séquence temporelle identique à celle qui accompagnait les déplacements du rat lors de sa phase d'éveil. Tout se passe comme si l'animal refaisait mentalement ses déplacements de la journée. Ces réactivations séquentielles sont brèves et «compressées» (15 à 20 fois plus rapides qu'au cours du parcours réel). Elles se produisent lorsque l'hippocampe entre et se maintient de façon très brève (moins d'une seconde) dans un état particulier pendant lequel ses neurones émettent des ondes de très haute fréquence (plus de 100 hertz) appelées «vaguelettes cérébrales» (en anglais *Sharp Wave Ripples*).

Ces réactivations peuvent être sélectionnées (ciblées) par un expérimentateur externe. C'est ce que révèlent les résultats d'une expérience menée par Daniel Bendor et Matt Wilson de l'Institut de technologie du Massachusetts. Dans cette expérience, un rat est placé au centre d'un couloir rectiligne. À l'extrémité gauche du couloir se trouve une première mangeoire où il peut trouver de la nourriture si un son particulier (clochette) retentit. À l'autre bout, mais sur sa droite, une seconde mangeoire contient de la nourriture si un autre son (un bip) est émis.

Manipuler les souvenirs ne sera bientôt plus du domaine de la science-fiction.

Ainsi, le rat apprend à associer un déplacement vers la gauche avec un tintement de clochette, et un déplacement vers la droite à un bip.

Que se passe-t-il si l'on fait entendre au rat, pendant son sommeil, un son de clochette ? On voit se réactiver ses cellules de lieu correspondant au déplacement vers la gauche. Et si on lui fait entendre un bip sonore, ce sont les neurones ayant mémorisé le déplacement vers la droite du couloir, qui se réactivent. Il est donc possible de réactiver le souvenir d'un déplacement précis avec des indices sonores pendant le sommeil. Cette réactivation étant la base de la mémorisation, il devient possible de consolider le souvenir d'un déplacement à gauche ou à droite, à volonté.

Ces manipulations ont été reproduites récemment sur des volontaires humains. L'équipe du neuroscientifique allemand Jan Born de l'université de Tübingen a réussi pour la première fois à consolider des souvenirs chez des dormeurs en modulant, pendant la phase qualifiée de « sommeil lent », l'activité de leur cerveau, d'abord par des stimulations magnétiques, puis par de simples sons.

La diffusion de sons pendant le sommeil lent peut aussi améliorer la mémoire procédurale, celle des gestes répétés par exemple dans l'apprentissage d'un instrument de musique. Ainsi, James Anthony et ses collègues de l'université de l'Illinois ont réussi à faire apprendre de petits morceaux de piano à des débutants en leur repassant des enregistrements du morceau pendant leur sommeil.

Dans toutes ces situations, le souvenir est réactivé pendant le sommeil, puis consolidé. Mais l'inverse est-il possible ? Trois psychologues américains, James Misanin, Ralph Miller et Donald Lewis, ont en effet découvert, dès 1968, qu'un souvenir réactivé est temporairement instable. Pourquoi ne pas en profiter pour l'effacer ?

NETTOYER LES SOUVENIRS

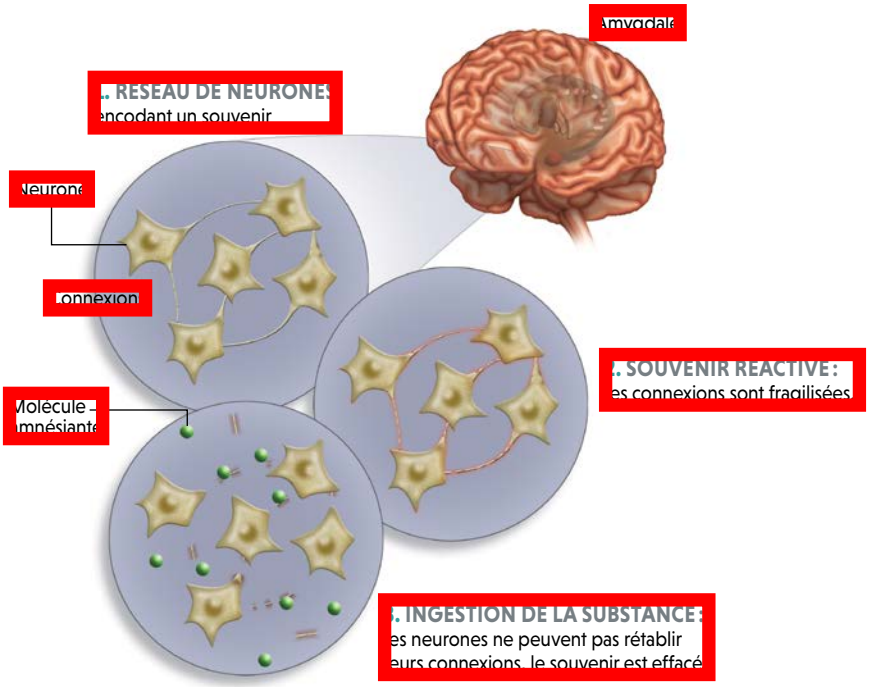
Des expériences sur des rats et des souris ont montré que c'était possible. Dans ces expériences, on commence par créer un souvenir chez un animal de laboratoire qui associe un son de clochette à une douleur (un choc électrique modéré dans les pattes). Rapidement, l'animal se souvient d'avoir ressenti ce choc lorsque le son de la clochette retentissait. Le souvenir peut être réactivé : en faisant tinter la clochette, le rat se fige de peur.

En 2000, le Canadien Karim Nader a administré à ces animaux une molécule, un « inhibiteur de synthèse protéique », pile au moment où leur souvenir était réactivé. Il a alors constaté que le souvenir du choc électrique avait disparu, car les animaux ne se figeaient plus de peur en entendant la clochette : ils avaient oublié l'association entre le son et la douleur.

Ce processus d'effacement est possible parce que les neurones qui codent le souvenir (dans une région du cerveau nommée « amygdale ») voient leurs connexions temporairement fragilisées au moment où ils se réactivent. Si on empêche les neurones de fabriquer des protéines essentielles à la reconsolidation des connexions, ces dernières se délitent et le souvenir se perd. Il est aussi possible d'affaiblir les souvenirs réactivés et déstabilisés par la prise d'une molécule, le propranolol, qui bloque un certain type de communication entre neurones.

Chez l'homme, cette approche a été testée en contexte clinique par une équipe canadienne. Des personnes ayant des souvenirs traumatiques (peur intense associée à un contexte particulier) voient leurs symptômes reculer lorsque la réactivation de ces souvenirs est associée à la prise de cette molécule.

À l'inverse, serait-il possible de renforcer par des pilules des souvenirs que l'on souhaite garder pour toujours ? Aujourd'hui, les scientifiques s'accordent à penser que les souvenirs sont gravés dans notre cerveau par des connexions entre neurones, des connexions renforcées lorsque nous mémorisons un événement ou une connaissance. Si les mécanismes moléculaires qui induisent et stabilisent ces changements sont bien connus, la question de leur permanence a été fréquemment soulevée. En effet, comment expliquer que la mémoire se maintienne alors que les molécules constitutives des connexions neuronales sont remplacées et éliminées en permanence ?

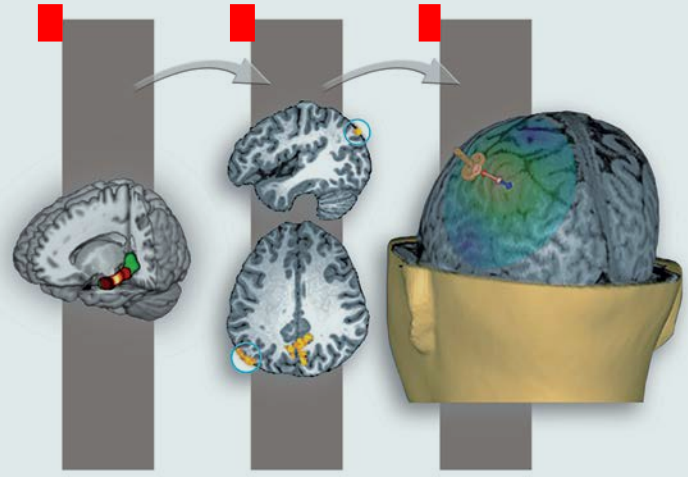


Les substances de l'oubli ciblent les réseaux de neurones où sont stockés nos souvenirs (1). Le souvenir étant réactivé (2), les connexions neuronales deviennent fragiles. La substance est alors administrée : ses propriétés chimiques empêchent les connexions de se reconstituer (3).

UNE MÉMOIRE DOPÉE AUX ONDES

Une technique récemment imaginée pour moduler l'activité du cerveau est la stimulation magnétique

zone du cerveau et y envoie, à travers la paroi du crâne, des ondes électromagnétiques de haute fréquence produites par un électro-aimant. Ces impulsions électromagnétiques stimulent les neurones, augmentant l'activité de zones du cerveau préalablement choisies. Pionnier de cette méthode, le neuroscientifique Joel Voss, de l'université de Chicago procède en trois temps : chez un sujet, on repère d'abord avec précision, par IRM, l'emplacement précis de l'hippocampe, la porte d'entrée des souvenirs dans le cerveau *(a)*, et d'une autre zone cérébrale qui lui est fortement connectée, le cortex pariétal *(b)*. Enfin, des ondes électromagnétiques de haute fréquence sont envoyées *(c)* sur le cortex pariétal après une séance d'apprentissage consistant à mémoriser des associations entre des noms et des visages. La mémoire des sujets est finalement testée :



au terme de cinq séances de 20 minutes de stimulation, le taux de mémorisation a augmenté de 20 à 25 pour cent. On observe aussi que la communication entre l'hippocampe et le cortex pariétal a augmenté. L'association de ces deux zones est considérée comme cruciale pour l'enregistrement durable des souvenirs. Ainsi, le renforcement de ce réseau par des stimulations magnétiques ouvrirait la voie à une mémoire « améliorée ».

Depuis une dizaine d'années de nombreux travaux ont abouti à l'identification d'une protéine enzymatique, la PKMζ (PKM «zéta»), qui assurerait le maintien des modifications d'efficacité synaptique qui sous-tendent la mémoire lors de sa formation. Le fait de bloquer l'action de cette molécule efface des souvenirs âgés de quelques jours à plusieurs semaines, alors que le fait de la produire en excès – par manipulation génétique – les renforce et prolonge leur maintien. De tels effets ont été démontrés chez des animaux comme l'aplysie (un mollusque), la mouche drosophile, la souris et le rat, et ce sur différentes formes de mémoire – mémoire spatiale, mémoire de la peur, etc. – et, dans de nombreux cas, en modifiant spécifiquement l'activité de la molécule dans diverses parties du cerveau comme l'amygdale, l'hippocampe, le striatum (impliqué dans la motivation et la récompense) ou certaines régions de l'écorce cérébrale.

UNE MOLÉCULE DU SOUVENIR ?

Par exemple, l'équipe de Yadin Dudai, de l'institut Weizmann, a montré qu'un souvenir désagréable associé à la saveur d'une nourriture (que l'on peut créer en provoquant un malaise chez un animal venant d'en consommer) pouvait être manipulé plusieurs semaines après sa formation en agissant directement sur le cortex insulaire, la partie du cerveau où le souvenir s'implante. Si l'on fait produire plus de PKMζ au cerveau (en injectant des virus contenant le gène de cette protéine), le souvenir désagréable de ce goût devient plus vif et plus présent chez des sujets testés, alors que l'inhibition de la molécule supprime ce souvenir.

Une seule molécule sous-tendrait-elle le maintien de toutes les mémoires ? Les choses ne sont certainement pas aussi simples. Récemment, deux équipes ont prouvé que des souris génétiquement modifiées pour ne pas exprimer la PKMζ n'ont aucun problème pour former des mémoires persistantes… Les organismes vivants disposant souvent de plusieurs dispositifs qui remplissent des fonctions voisines, les Canadiens Paul Frankland et Sheena Josselyn avaient alors supposé que d'autres molécules étaient susceptibles de suppléer à l'absence de la PKMζ. Une telle molécule, la PKCι/λ, a effectivement été identifiée par l'équipe de Todd Sacktor, de l'université de l'État de New York.

Ce rapide panorama des recherches sur les stratégies utilisées pour renforcer les souvenirs, les supprimer ou modifier leur contenu, révèle finalement leur plasticité et l'importance d'un stade clé dans leur existence : leur consolidation qui a presque toujours lieu lorsque le souvenir est réactivé, et plus particulièrement au cours du sommeil. Les études sur la biochimie du cerveau nous ont aussi appris que plusieurs mécanismes enzymatiques permettent aux souvenirs d'être consolidés, fragilisés ou pérennisés. Ce sont autant de leviers pour agir sur la mémoire. À nous de les utiliser à bon escient. ■

BIBLIOGRAPHIE

T. SACKTOR ET J. HELL, The genetics of PKMζ and memory maintenance, *Sci. Signal.*, vol. 10(505), eaa02327, 2017.

R. MORRIS, Memory: Forget me not, *eLife*, vol.5, e16597, 2016.

R. JAFFARD, Amélioration, effacement, restauration et insertion: manipulations expérimentales de la mémoire, in *Mémoire et oubli*, Le Pommier, 2014.

D. OUDIETTE *ET AL.*, Upgrading the sleeping brain with targeted memory reactivation, *TICS*, vol.17, pp.142-149, 2013.

e Bataclan (ici, e 15 novembre 2015) est un des multiples lieux où nt eu lieu les attentats du 13 novembre 2013. Avec le temps, il devient e symbole de cette période, un vecteur de la mémoire collective.

© PHILIPPE LOPEZ/AFP

L'ESSENTIEL

- La mémoire est une représentation du passé, mais aussi du futur. Elle suscite dans le présent un choc des temporalités.
- La mémoire du futur permet également, à partir du passé, de se forger une représentation d'un avenir.
- Cette mémoire du futur est menacée par le recul annoncé de la théorie : les nouvelles technologies fusionnent, *via* le *big data*, le passé et le futur.
- La mémoire collective participe également de la mémoire du futur, au sens où elle relève de la construction identitaire d'un groupe.

L'AUTEUR

DENIS PESCHANSKI
Directeur de recherche au CNRS, Centre européen de sociologie et de science politique (CNRS, Université Paris 1, EHESS) et coresponsable scientifique du programme 13-Novembre.

Les futurs possibles de la mémoire

Comment l'historien s'accommode-t-il des trajets incessants de la mémoire entre passé, présent et futur ? Comment compose-t-il avec la relecture continue des événements passés à la lumière du présent ?

Lors d'une croisière sur le Nil, en 3750, un homme découvre une bibliothèque exceptionnelle depuis très longtemps oubliée. Et voilà que cet archéologue des temps futurs décide de reconstituer l'histoire de l'humanité depuis 1960. Il prend les ouvrages d'Huxley, de Wells, d'Orwell ou de Bradbury, grands noms de la science-fiction s'il en est, comme jalons d'une chronique historienne. Il mobilise les règles de la démarche scientifique pour peser le pour et le contre des récits proposés, telle « l'invasion martienne ». En reconstituant l'histoire qui court entre 1960 et 3750, l'archéologue devient donc une sorte d'explorateur d'un passé qui est, en même temps, le futur de l'auteur de ce livre exceptionnel intitulé *Les Mémoires du futur*, de John Atkins (1958), un autre grand nom de la science-fiction.

Tout y est ou presque de ce que l'historien peut faire de cet objet improbable que serait la mémoire du futur, un champ récent d'investigations qu'explorent neuroscientifiques (*voir La mémoire à tous les temps, par F. Eustache, page 78*), philosophes (*voir l'avant-propos, page 10*), informaticiens (*voir L'explosion mémorielle change la donne, par G. Dowek, page 92*)… et historiens. La pluridisciplinarité n'est pas un vain mot. Relève-t-elle de l'utopie ? Serait-elle une promesse, un horizon d'attente ? Mais l'utopie, construite un jour, doit devenir

plus tard, un futur pour l'homme et s'il y a bien promesse ou simple horizon d'attente, ils doivent concerner un futur sur terre et non au ciel. Dans ce sens, deux pistes peuvent être explorées. D'une part, il y a choc des temporalités, car la mémoire est représentation du passé, mais elle peut l'être du futur, et ces deux représentations agissent sur le présent. D'autre part, la mémoire du futur est construite dans le passé et nourrit le présent à partir du moment où les lois de l'histoire donnent les clés pour une représentation d'un avenir dans le présent. En outre, on peut également voir la mémoire du futur comme celle qui sera à l'œuvre dans le futur, la mémoire conjuguée au futur.

LE PRÉSENT DE LA NARRATION CHANGE TOUT

Comme le rapporte le neuropsychiatre Boris Cyrulnik en ouverture d'un livre-dialogue que nous avons écrit sur la mémoire, des expériences d'imagerie cérébrale ont montré que dans le cerveau les zones de la mémoire sont les mêmes que celles dédiées à l'anticipation. « Que fait l'historien avec cela ? » concluait-il en substance. D'évidence la confrontation entre neurosciences et sciences sociales devait apporter beaucoup pour appréhender le choc des temporalités.

D'autres croisements disciplinaires illustrent le sujet. Tel est le cas pour deux études menées sous la direction du linguiste et historien Damon Mayaffre, en 2014 et 2018, à partir de témoignages de survivants des camps d'extermination publiés par la Fondation pour la Mémoire de la Shoah. La discipline mobilisée ici est la textométrie (analyse statistique de discours). La première étude a mis en évidence des ensembles de mots structurant le récit. Le programme Iramuteq, analyse factorielle des correspondances à l'appui, a fait ressortir l'opposition entre deux grands registres de vocabulaire, celui de l'expérience singulière (la vie au camp, le corps…) et celui de l'analyse réélaborée (généralités sur le camp, sur la guerre…). Un dernier ensemble pouvait intriguer, celui du vocabulaire de la parentèle (père, mère, frères, sœurs, enfants…), qui se trouvait du même côté que le vocabulaire réélaboré.

La deuxième étude allait fournir une clé chronologique qui illustre l'emboîtement entre passé, présent et futur. Au sortir de la guerre, le vocabulaire de l'expérience sensible, celui qui arme une description très clinique de la déportation et de la vie au camp, est surreprésenté, au sens où un calcul de probabilité montre qu'il est bien plus utilisé que ne le voudrait une distribution moyenne.

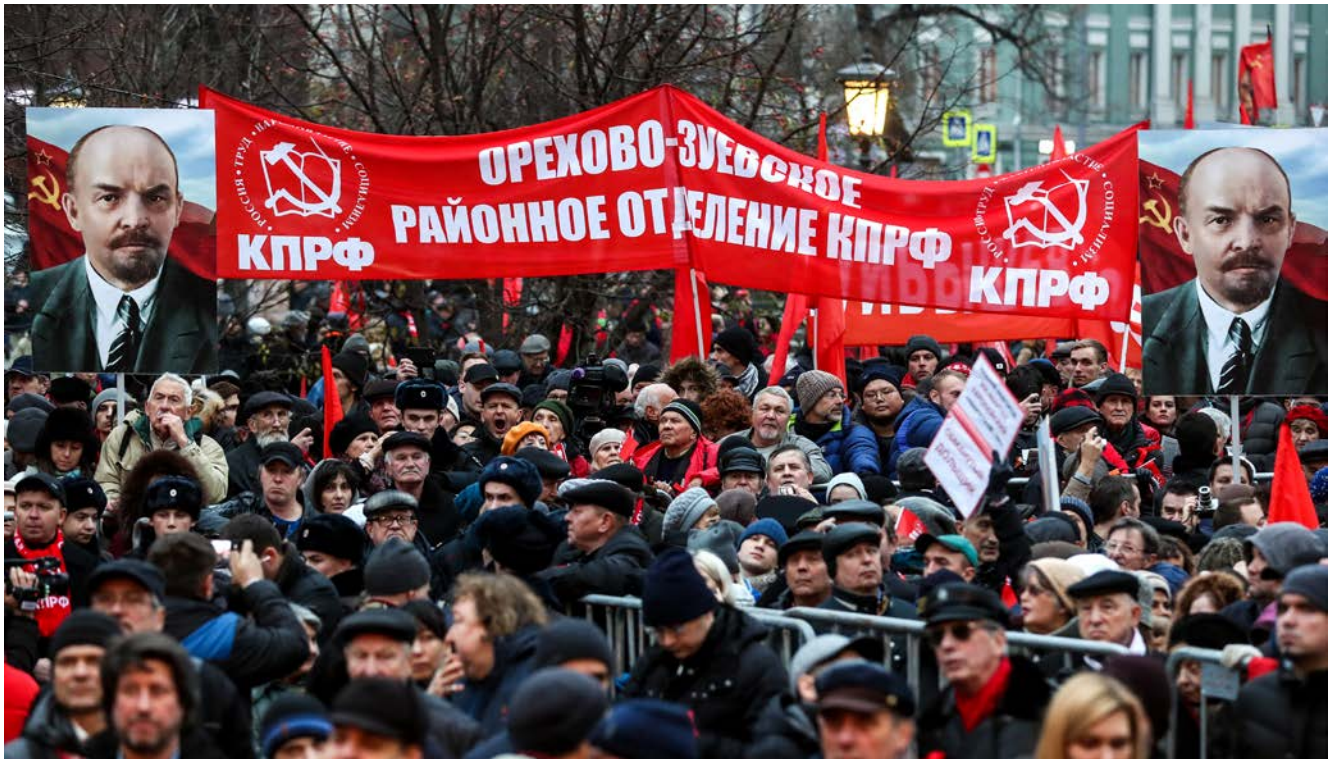
À l'inverse, le vocabulaire qui relève plus de l'analyse générale, de la mise en perspective historique, de l'inscription dans les enjeux politiques du présent (contre le négationnisme et l'extrême-droite par exemple) est surreprésenté dans les années 2000 correspondant au troisième ensemble de livres étudié, écrits le plus à distance de l'événement raconté. L'ensemble de la parentèle s'y trouve également surreprésenté. Ce n'est pas qu'il n'y avait ni père, ni mère, ni cousins concernés par la déportation, mais la question de la transmission occupe le cœur du discours quelque soixante années plus tard.

Quand le témoin parle, il le fait pour ses enfants et souvent ses petits-enfants. Il le fait généralement pour les autres enfants auxquels il souhaite transmettre son expérience et, au-delà, les conclusions qu'il tire sur la société, sur la Seconde Guerre mondiale, sur les dangers d'hier et d'aujourd'hui. Et il le fait avec, comme horizon d'attente, un horizon d'urgence : la mort.

Pour transmettre à ses enfants et aux autres, il est conduit à parler, plus qu'avant, de ses parents, de ses frères et sœurs ou cousins et cousines. Ainsi la représentation qu'on se fait de ce qu'on aura transmis aux générations suivantes (autrement dit une des formes de la mémoire du futur), changera en fonction du présent de l'écriture, entre passé et horizon d'attente du moment.

Moduler ce qui sera la mémoire du passé dans le futur – ce que nous voulons transmettre – en revisitant les événements du passé, tel est aussi le propos de la série à succès de France Télévision *Un village français*, portant également sur la Seconde Guerre mondiale. Achevant en 2018 sa sixième saison, la série vise à retracer l'histoire de la France en guerre à l'échelle d'une sous-préfecture située non loin de la ligne de démarcation. La démarche de ses concepteurs, les producteurs Frédéric

Dans le cerveau, les zones de la mémoire sont les mêmes que celles dédiées à l'anticipation



Le communisme (ici le centenaire de la Révolution d'octobre, à Moscou, en novembre 2017) a été une utopie du XIXe siècle et est entré dans l'action au XXe siècle. La promesse d'une société idéale en a fait une mémoire du futur pour beaucoup.

Krivine et Emmanuel Daucé, est revendiquée: ils souhaitent faire passer à l'écran une vision actualisée de la France des années noires, inspirée des avancées de la recherche historique. Ils s'appuyèrent pour cela sur les travaux de l'historien Jean-Pierre Azéma.

En privilégiant les zones grises, en donnant la parole à des personnages ordinaires qui évoluent avec le temps, il s'agit bien de rendre compte de l'ambivalence du temps et des comportements. Le nouveau récit a pour vocation de s'inscrire comme référence dans la mémoire collective des Français et pour espoir de la modifier.

RETOUR VERS LE PASSÉ

La reconstruction du passé peut aussi se faire dans une volonté de contrôle. On sait combien Orwell a marqué son époque. Au cœur de *1984*, il y a bien l'idée qu'il est impératif, dans une perspective totalitaire, de contrôler le passé pour mieux imposer sa mainmise sur le présent. De la sorte, un avenir autre que celui ci programmé est prohibé. C'est autour de cette appropriation que se joue significativement la résistance.

Il est de multiples exemples, dans le monde réel autant que dans la littérature, de cette volonté de contrôler le passé. Prenons pour illustration la démocratie athénienne. En 403 avant notre ère, les démocrates athéniens en ont fini avec la dictature oligarchique dite des Trente. Mais, comme l'a montré l'anthropologue et historienne Nicole Loraux, la sortie de la dictature passa par une forme de compromis autour de la prestation d'un serment d'amnistie: refuser d'oublier était désormais puni par la mort.

Avec l'oubli institutionnalisé du passé, afin de ne pas, disait-on, réveiller le spectre de la guerre civile, le peuple se liait les mains en s'interdisant d'exercer le cœur de sa souveraineté, à savoir l'administration de la justice par un procès. La mémoire du futur de la démocratie se trouvait amputée par la réécriture du passé.

Un autre exemple est la France de Vichy, ce régime autoritaire né de l'effondrement de la France en 1940. Le jeu est évident pour les Allemands: des autorités françaises seront bien mieux écoutées que l'Occupant pour permettre à ce dernier de mettre en œuvre ses deux priorités d'alors, à savoir la sécurité des troupes d'occupation et le pillage du pays occupé le plus riche d'Europe. Dans cette perspective, le maréchal Philippe Pétain à la tête de l'État est une aubaine. Pour les Français qui, certes sonnés, n'en sont pas moins très majoritairement opposés à l'occupation et à l'occupant, la présence à leur tête du vainqueur de Verdun est une forme de garantie.

Le mécanisme est exactement inverse à celui de la Grèce antique: on ne décrète pas

l'oublier le passé, on le convoque. Mais, dans es deux cas, le passé est mobilisé pour occulter a réalité du présent et pour construire un autre futur, celui souhaité par les nouveaux gouver-nants. Dans le cas de Pétain, il s'agit de légitimer *de facto* le double choix inscrit dans l'armistice, celui de la Révolution nationale (projet autori-taire de rassemblement et d'exclusion) et celui de la collaboration avec l'occupant.

PLACE A L'IMAGINAIRE SOCIAL

Les constructions imaginaires de et dans a société agissent résolument dans le présent et y jouent même un rôle crucial au point que 'on peut parler d'imaginaires sociaux. Le phi-osophe Cornelius Castoriadis en fit le point nodal de sa pensée, dans les années 1970. Une dizaine d'années plus tard, l'historien Bronislaw Baczko explorait les mêmes pistes dans *Les Imaginaires sociaux*.

Ce n'est pas un hasard si ces deux auteurs innervèrent la pensée antitotali-taire, qui sonna bientôt le glas des modèles dits nomologiques, c'est-à-dire selon lesquels l'histoire est régie par des lois. Pour autant, ces imaginaires sociaux ne réfèrent pas uniquement au totalita-risme ; ils peuvent être également moteurs et souvent conditions de possi-bilité d'une action de libération ; c'est même sous cet angle que, dans la majo-rité des cas, ces imaginaires étaient per-çus avant Cornelius Castoriadis et Bronislaw Baczko.

Pierre Popovic, de l'université de Montréal, a mis le doigt sur ce qui s'y joue : « L'imaginaire social est ce rêve éveillé que les membres d'une société font, à partir de ce qu'ils voient, lisent, entendent, et qui leur sert de matériau et d'horizon de référence pour tenter d'ap-préhender, d'évaluer et de comprendre ce qu'ils vivent ; autrement dit : il est ce que ses membres appellent la réalité ». On regrettera que la formule fonctionne pour la seule immédiateté, mais elle montre un point essentiel, à savoir que l'événement représenté prend statut d'événement, car c'est cette représentation qui agit dans le pré-sent et dans le futur.

Pour reprendre ce que nous disions en introduction, il n'y a mémoire du futur que si ce futur, construit dans un passé donné, reste actif comme moteur de comportement et d'ac-tion. Tel peut être le cas de l'utopie.

Partons de celle de Thomas More. Le tour-nant est d'importance car, en ce XVI^e^ siècle de l'auteur d'*Utopia*, la promesse est passée du ciel à la terre. Dans et par un tableau extrême-ment précis d'une société idéale, celle de l'île d'Utopia justement, il instruit un procès, en négatif, de la réalité sociale dans laquelle il vit.

LE CAS DU DJIHADISME MONTRE QUE L'EFFONDREMENT DU COMMUNISME SOVIÉTIQUE N'A PAS SIGNÉ LA MORT DES UTOPIES

Sa vision (comme cadre) devient mémoire du futur à partir du moment où, dans sa lignée, les constructions utopiques s'inscriront comme horizon d'attente.

Le communisme nous en offre un exemple. Lénine et la Révolution d'octobre donnent corps à une utopie qui s'inscrit comme résolument engagée dans le présent de l'action et de la prise de pouvoir, la perfec-tion attendue de l'utopie permettant de légi-timer la violence du présent.

Pour le mouvement communiste interna-tional qui, dès lors, se déploie dans le monde entier, l'Union Soviétique devient, pour plu-sieurs décennies, le pays de l'utopie réalisée. La dimension téléologique (porté vers une finalité) du communisme, parce que fondée sur une promesse construite dans le passé, est bien une mémoire du futur. Avec la crise du communisme, la mémoire d'une utopie a laissé place à ce que François Furet a appelé le passé d'une illusion.

Depuis lors, le cas du djihadisme nous a montré que l'effondrement progressif puis soudain du communisme soviétique n'a pas signé la mort des utopies comme promesses agissantes. L'islamisme n'est pas qu'une promesse pour chacun au-delà de la mort, elle est un objectif politique au point que le sacrifice, rendu acceptable par la promesse de l'au-delà, est un instru-ment de ce combat sur terre. Tout est mobilisé, y compris le Djihad, pour construire sur terre une cité utopique fon-dée sur la charia, ensemble de normes pensées émaner de la volonté divine.

QUEL AVENIR POUR NOTRE MÉMOIRE ?

Mais, dans la formule « la mémoire du futur », la conjonction « du » est ambiva-lente et nous ne l'avons envisagée jusque-là qu'inscrite dans un présent donné. Le « du » peut signifier aussi « dans ». Que sera donc notre mémoire dans l'avenir ? Sur quelles sources se fondera-t-elle ? Comment se rappel-era-t-on des événements d'aujourd'hui ? Il est évident que les révolutions technologiques, sociales et économiques en cours posent depuis déjà quelque temps la question du futur de notre mémoire avec une particulière acuité.

Bernard Stiegler (*voir l'avant-propos page 10*) et Jean-Gabriel Ganascia (*voir Les fausses pro-messes du numérique, par J.-G. Ganascia, page 86*) convergent pour nous alerter sur les réflexions qui accompagnent ce que nous vivons, associant *big data* et algorithmes, avec les vastes mutations engendrées par l'intelligence artificielle.

Dans une critique frontale de Chris Anderson, selon qui les données amassées en grandes quan-tités parlent d'elles-mêmes et peuvent prédire l'avenir depuis le passé sans hypothèse ni même

théorie, Antoinette Rouvroy, de l'université de Namur, a bien ciblé les enjeux pour ce qui nous occupe ici, passé et futur étant absorbés dans le présent: «Il ne s'agit pas de prédiction. C'est un régime d'action sur l'avenir [...]. La réalité prend ainsi toute la place, la réalité en tant qu'actualité. C'est une actualité assez particulière qui prend la forme d'un vortex aspirant à la fois le passé et l'avenir. Tout devient actuel.»

LES SOURCES DE LA MEMOIRE

Le *big data* change-t-il la question, cruciale, de la conservation des archives? Une polémique récente semble avoir répondu par anticipation à la question puisque dans un rapport demandé par la ministre de la Culture, une inspectrice générale des archives de France conseillait de conserver «les archives essentielles».

L'objet n'est pas là de discuter de ce que recouvrait l'adjectif, mais de relever qu'était évacuée l'hypothèse d'une très large conservation grâce à la révolution technologique de la numérisation et des capacités de stockage. Il ne s'agit pas simplement d'une question d'argent, même si elle n'est pas mince. La France, comme tous les pays développés, se trouve confrontée à une augmentation exponentielle des archives. Mais demander à un historien de trier les archives à conserver c'est, si le tri n'est pas aléatoire, aller à l'encontre de l'essence même de son métier. Il n'y a pas La Vérité en Histoire; il n'y a pas plusieurs vérités; il y a plusieurs lectures vraies des traces laissées par les événements passés.

Il y a toujours d'abord un questionnement. Les sources ne parlent jamais d'elles-mêmes, y compris si elles sont très nombreuses. Qui plus est l'historien plaidera toujours pour l'irréductibilité de l'événement. Il faut entendre par là qu'il n'y a pas d'événement inéluctable. Je suis, comme bien d'autres, parfaitement en situation de vous expliquer pourquoi tel événement s'est produit, mais je le serais tout autant pour expliquer pourquoi le contraire s'était produit. Il n'y a là aucun relativisme mais la prise en compte de la pluralité des possibles, la capacité des individus à agir sur et dans l'histoire, la conviction qu'il n'y a pas de lois en histoire. Ainsi, on redonne au futur et à sa mémoire sa liberté.

De fait la mémoire elle-même n'est en rien figée. Je m'arrêterai ici à la mémoire collective entendue comme représentation sélective du passé qui participe à la construction identitaire d'un groupe. Or la mémoire collective est dans l'histoire et elle agit sur l'histoire. Au cœur de notre propos se trouve ce que je nomme les régimes mémoriels et entend comme des configurations dominantes et stabilisées des représentations et appropriations du passé dans un présent donné. Les potentialités sont grandes dans le présent de se projeter dans le futur, ou plus exactement de projeter un imaginaire social dans le futur.

ET LA MEMOIRE COLLECTIVE?

Prenons un exemple. La mémoire des attentats du 13 novembre 2015 dans la région parisienne est l'objet d'un vaste programme de recherche que nous pilotons, Francis Eustache et moi-même. Ce programme 13-11 a plusieurs volets qui mettent au cœur du propos la réflexion sur l'articulation entre mémoire individuelle et mémoire collective d'un événement traumatique.

Des très nombreux entretiens recueillis dès l'été 2016 et de l'étude menée au même moment par le Crédoc sur un échantillon représentatif de quelque 2000 personnes, mais aussi au vu du déroulé des premières commémorations, la question est bien posée du futur de la mémoire des attentats et des possibilités que l'on a, ou pas, d'influer sur ce futur. On peut constater sans surprise un phénomène que je qualifierai d'entonnoir mémoriel.

On le sait: on ne peut et on ne doit se souvenir de tout. L'individu comme le collectif retiennent ce qui fait sens, et même ce qui suffit à faire sens, à rendre compte du sens de l'événement. Or de quel événement s'agit-il? De la chaîne des attentats qui ont touché la France entre 2015 et 2018, après les crimes de 2012 à Toulouse et Montauban. Et quels attentats apparaissent comme vecteurs de la mémoire collective de cet événement?

On note une forte polarisation sur les attentats du 13 novembre, devant ceux de janvier à Paris. Deux ans plus tard, dans une étude de juin 2018, Nice apparaît bien, mais loin derrière le 13 novembre pourtant plus lointain, tandis que les attentats de janvier 2015 sont peu évoqués. Si nous parlons des lieux des crimes du 13 novembre, le Bataclan est cité en premier, largement, en juin 2016, nous dit le Crédoc, mais le Stade de France et les terrasses le sont aussi, bien que bien moins.

En 2018, deux références restent: Paris, comme référence floue, et le Bataclan, comme lieu symbole. Les autres lieux s'estompent. L'entonnoir mémoriel dont je parle peut aboutir à la réduction au Bataclan comme vecteur de la mémoire collective des attentats du 13 novembre et, au-delà, de la chaîne des attentats des trois dernières années.

La mémoire au futur, c'est aussi l'articulation entre mémoire individuelle et mémoire collective. Nous pensons qu'il faut être résolument radical en convoquant non seulement l'héritage philosophique à côté des sciences sociales, mais aussi les neurosciences et les sciences cognitives pour penser pleinement l'interaction et donc pour penser la mémoire, telle qu'elle se décline au passé, au présent et au futur. ■

Cet article est adapté d'un chapitre du livre La Mémoire au futur, Le Pommier, 2018.

BIBLIOGRAPHIE

Programme 13-11: www.memoire13novembre.fr

D. MAYAFFRE *ET AL.*, L'évolution de la mémoire de la Shoah au prisme de la statistique textuelle, in D. PESCHANSKI ET B. SION (Eds.), *La Vérité du témoin,* Hermann, 2018.

H. ROUSSO, *Face au passé. Essais sur la mémoire contemporaine,* Belin, 2016.

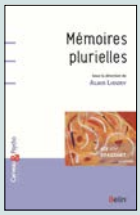
A. ROUVROY ET B. STIEGLER, Le régime de vérité numérique, *Socio*, vol. 4, pp. 113-140, 2015.

B. CYRULNIK ET D. PESCHANSKI, *Mémoire et traumatisme. L'individu et la fabrique des grands récits,* INA éditions, 2012.

À LIRE EN PLUS

La mémoire au futur
FRANCIS EUSTACHE (DIR.)
LE POMMIER, 2018
(156 PAGES, 17 EUROS)

La mémoire, qui semble par essence tournée vers le passé, est en fait [illegible]. Quelles sont les grandes fonctions de cette mémoire du futur qui contribue grandement à nos prises de décision? Comment s'articule-t-elle avec la mémoire du passé? Quelles sont les pathologies qui la mettent à mal? Que peut-on attendre des recherches en cours? Cet ouvrage répond avec clarté à toutes ces questions pour tout comprendre de cette mémoire du futur, indispensable sur le plan tant individuel que collectif.



Mémoires plurielles
ALAIN LIEURY (DIR.)
BELIN POUR LA SCIENCE, 2014
(205 PAGES, 21 EUROS)

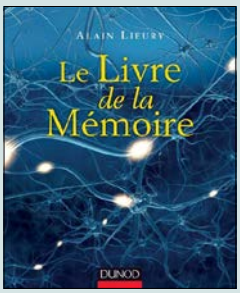
Souvenirs d'enfance, souvenir visuel, souvenir collectif: nous sommes loin [illegible]. Découvrez dans cet ouvrage comment nos souvenirs vivent, évoluent, se transforment, disparaissent parfois. Moyens mnémotechniques, impact des émotions, action des neurones: les neuropsychologues explorent le dédale des mémoires. La mémoire est définitivement protéiforme.

Intelligence artificielle : vers une domination programmée ?
JEAN-GABRIEL GANASCIA
LE CAVALIER BLEU, 2017
(216 PAGES, 20 EUROS)

Les machines seraient-elles vraiment devenues intelligentes, posséderaient-elles [illegible]. En tout cas, elles sont désormais présentes dans toutes nos activités quotidiennes. Pourtant, la complexité de l'intelligence artificielle dépasse notre entendement immédiat et suscite nombre d'idées reçues. L'auteur, en distinguant la réalité du pur fantasme, nous permet de comprendre ce qui se joue avec l'intelligence artificielle, quelles sont ses potentialités et ce qu'elle ne sera jamais... sauf au cinéma.

Qu'appelle-t-on panser ? Au-delà de l'Entropocène
BERNARD STIEGLER
LES LIENS QUI LIBÈRENT, 2018
(384 PAGES, 24,50 EUROS)

À présent que «l'événement Anthropocène», l'épreuve de [illegible] et tout ce qui constitue l'immense régression en cours accablent tout un chacun, il apparaît que la pensée sous toutes ses formes est absolument démunie. Elle arrive trop tard. Et cette fois-ci son retard serait fatal à l'humanité – et, au-delà, à toutes les formes supérieures de la vie. Il n'est cependant jamais trop tard pour panser. Et si la pensée est démunie, c'est parce qu'elle a cessé de se penser comme soin: comme panser.



BEAU LIVRE

Le livre de la mémoire
ALAIN LIEURY
DUNOD, 2014
(240 PAGES, 22,90 EUROS)

Ce livre propose un véritable voyage en images... au centre de la mémoire. Tous les aspects y sont traités (médicaux, psychologiques [illegible], philosophiques et anthropologiques). Le parcours est chronologique... de l'Antiquité à nos jours et retrace ainsi l'odyssée de la découverte de ce continent intérieur mystérieux. Un périple passionnant qui nous mène des techniques de mémorisation aux découvertes les plus récentes des neurosciences de la mémoire.

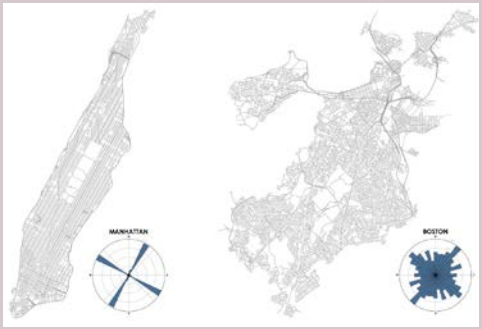
RENDEZ-VOUS

P. 110

REBONDISSEMENTS
DES ACTUALITÉS SUR
DES SUJETS ABORDÉS
DANS LES HORS-SÉRIES PRÉCÉDENTS

P. 114

DONNÉES À VOIR
DES INFORMATIONS
SE COMPRENNENT MIEUX
LORSQU'ELLES SONT MISES EN IMAGES



P. 116

LES INCONTOURNABLES
DES LIVRES, DES EXPOSITIONS,
DES SITES INTERNET, DES VIDÉOS,
DES PODCASTS… À NE PAS MANQUER

P. 118

SPÉCIMEN
UN ANIMAL ÉTONNANT CHOISI
PARMI CEUX PRÉSENTÉS SUR
LE BLOG « BEST OF BESTIOLES »

P. 120

ART & SCIENCE
COMMENT UN ŒIL SCIENTIFIQUE
OFFRE UN ÉCLAIRAGE INÉDIT
SUR UNE ŒUVRE D'ART

Hors-Série 101 : Plante

Une algue en promenade

La présence d'une algue, symbiotique des coraux, vivant à l'état libre dans tous les océans du globe pose la question : peut-elle aider à repeupler les récifs victimes du blanchissement.

Le monde végétal regorge de symbioses en tout genre: les mycorhizes (associations de champignons et de racines de plantes), les lichens (associations de champignons et d'algues)... Le *Hors-Série* n° 101: «La révolution végétale. De la neurobiologie des plantes à la sylvothérapie» en détaillait les rouages. Une autre symbiose, essentielle, y était décrite, celle des algues et des coraux à l'origine des récifs qui abritent plus de 30% de la biodiversité marine. Les algues en question sont très souvent les *Symbiodinium*, renommés récemment *Symbiodinicea*. Étonnamment, on retrouve beaucoup de ces microorganismes en pleine mer loin de tout récif. Selon quelles modalités? C'est ce qu'ont précisé Johan Decelle, de la station biologique de Roscoff (Sorbonne Université, CNRS, AD2M) et ses collègues, notamment de l'université du roi Abdallah, en Arabie Saoudite, et de celle d'Auckland, en Nouvelle-Zélande.

En 2015, grâce à des prélèvements effectués lors de l'expédition *Tara Oceans*, les biologistes avaient découvert la trace de *Symbiodinicea* dans tous les océans du monde (à l'exception des régions polaires) et particulièrement en symbiose (encore) avec *Tiarina*, un organisme unicellulaire, un cilié, doté de flagelles. L'équipage ainsi formé se retrouve sous la surface, à portée de lumière, à travers le monde.

La dernière étude a consisté en des analyses génétiques d'échantillons collectés dans 121 lieux. Que révèlent-elles? D'abord, outre qu'elle est embarquée avec *Tiarina*, *Symbiodinicea* est aussi présente à l'état libre. En effet, plusieurs gènes de la microalgue impliqués dans la photosynthèse, le métabolisme des lipides et des sucres... sont actifs.

Ensuite, parmi les groupes (ou clades) connus de *Symbiodinicea* (notés de A à I), deux se démarquent par leur abondance, ce sont les clades C et surtout A. Or ce clade serait le plus ancestral. Qu'il soit fréquent sous une forme libre conforte l'hypothèse selon laquelle *Symbiodinicea* serait apparu dans les océans, il y a environ 160 millions d'années, et aurait vécu de façon autonome avant de s'associer aux coraux pendant la période du Jurassique.

Une question importante est soulevée par cette étude. Les *Symbiodinicea* libres peuvent-elles constituer une sorte de réservoir qui aiderait à régénérer, en les «ensemençant», les récifs coralliens malmenés par le réchauffement climatique, la pollution...? Ils ont des atouts. Ceux du clade C fixent rapidement le carbone et le transfèrent au corail. Quant à ceux du clade A, leur opportunisme à se fixer dans des récifs déjà blanchis (donc désertés) pourrait être très utile.

J. DECELLE *ET AL.*, *CURRENT BIOLOGY*, VOL. 28(22), PP. 3625-3633, 2018.

Les coraux *(à gauche)* vivent en symbiose avec *Symbiodinicea*. Cette microalgue s'éloigne parfois des récifs grâce à *Tiarina*. Pourvu de flagelles, ce cilié *(à droite, en vert)* peut transporter ses hôtes *(en rouge et bleu)*. *Symbiodinicea* vit aussi à l'état libre.

Un anticorps à double détente

Le *Hors-Série* n° 99: «Cancer, l'arsenal

vantait les vertus de l'immunothérapie qui lève les freins du système immunitaire et le rend le nouveau opérationnel contre les tumeurs. Une équipe internationale emmenée par Éric Vivier, du centre d'immunologie de Marseille-Luminy, le confirme en mettant en évidence l'efficacité d'un anticorps doté d'un double effet. D'une part, il réactive les deux principaux types lymphocytes tueurs de tumeurs. Chez des souris atteintes de diverses tumeurs, l'anticorps monalizumab agit sur le récepteur NKG2A, un point de contrôle des cellules NK et des lymphocytes T. Libérés, ces acteurs essentiels de l'immunité s'attaquent de nouveau aux cellules cancéreuses. D'autre part, le monalizumab augmente l'efficacité d'autres traitements, en l'occurrence les immunothérapies de première génération, comme le durvalumab, un immunotraitement ciblant une autre voie de blocage (PD1/PDL1). Sans que l'on sache bien l'expliquer, ces traitements ne fonctionnent que chez 20% des patients. Avec le monalizumab, le taux de survie a atteint 60%! Un essai clinique en phase II est en cours: les résultats préliminaires confirment ceux obtenus chez les rongeurs.

E. ANDRÉ *ET AL.*, *CELL*, À PARAÎTRE, 2018.

« Life on Mars » ?

La musique est universelle

es articles du Hors-Série

De la physique des ondes à la musicothérapie» se prouvaient. Mais jusqu'où? Mars? Peut-être... Domenico Vicinanza et Genevieve Williams ont créé une bande-son à partir du 5000e lever de soleil capturé par le rover *Opportunity*. Les données de luminosité, de couleur... de chaque pixel ont été transformées en une mélodie. David Bowie se demandait s'il y a de la vie sur Mars. Il y a au moins de la musique!

YOUTU.BE/LOXHSGLSG-W

Hors-Série 98 : Big Data

Apprentissage profond au cœur des poumons

Le *deep learning* (ou apprentissage profond) défraie régulièrement la chronique par ses exploits : gagner contre un champion de go, reconnaître des visages ou des voix, créer des œuvres d'art… Le *Hors-Série* n° 98 : « Big data. Vers une révolution de l'intelligence » racontait les grands principes de ce pilier de l'intelligence artificielle. Un domaine où il est de plus en plus sollicité est la médecine. L'équipe de Hugo Aerts, de l'école de médecine Harvard, à Boston, aux États-Unis, vient d'en apporter une nouvelle preuve.

Avec ses collègues, il a utilisé les méthodes du *deep learning* pour améliorer le pronostic de tumeurs du poumon (prédire leur évolution), plus particulièrement celles dites « non à petites cellules ». À partir d'images de tomographies de 1 194 malades traités (radiothérapie ou chirurgie), suivis dans cinq institutions différentes, les chercheurs ont nourri un algorithme afin qu'il décèle les caractéristiques des tumeurs et puisse distinguer les patients en deux groupes, à haut et à faible risque de mortalité à deux ans. Les résultats ont été meilleurs que ceux obtenus avec d'autres méthodes fondées sur des paramètres cliniques : on peut dès lors imaginer diminuer la force des traitements pour ceux du deuxième groupe.

Le programme a également révélé que l'environnement des tumeurs est une zone à surveiller tout particulièrement pour établir un bon pronostic. Des analyses génétiques préliminaires ont commencé à mettre en évidence les processus liés au profil des tumeurs repérées par l'algorithme.

Ce n'est pas encore suffisant et les auteurs appellent à explorer les bases biologiques de ces résultats pour rendre moins opaque la boîte noire que constitue l'algorithme.

H. HOSNY ET AL., PLOS MEDECINE, PREPUBLICATION EN LIGNE, 2018

Hors-Série 100 : Musique

Quand la musique est bonne… contre l'autisme

Chanter et jouer de la musique améliore notablement les capacités de communication d'enfants atteints des troubles du spectre de l'autisme. La neuro-imagerie explique pourquoi.

Jouer de la musique, une aide précieuse pour les autistes

Les bienfaits de la musique sur la santé ne sont plus à démontrer, le *Hors-Série* n° 100 : « Good vibrations. De la physique des ondes à la musicothérapie » en attestait. C'est notamment vrai dans le cas des troubles du spectre de l'autisme (TSA) : la musique semble en atténuer les expressions. Megha Sharda, psychologue à l'université de Montréal, au Canada, et ses collègues ont voulu en savoir plus sur ces liens, notamment d'un point de vue neurobiologique.

Ils ont étudié pendant 3 mois 51 enfants de 6 à 12 ans atteints de TSA et ont proposé à une partie d'entre eux de chanter, de jouer de plusieurs instruments, en présence d'un thérapeute chargé d'engager une interaction. Le praticien a également suivi l'autre groupe, dispensé quant à lui d'activités musicales. Résultats ? Dans le registre de la communication et de la qualité de vie familiale, les parents des enfants du premier groupe ont fait état d'améliorations substantielles. Les examens par neuro-imagerie qui ont suivi ont révélé une augmentation des connexions entre les régions auditives et celles dévolues aux mouvements. À l'inverse, celles entre les régions auditives et visuelles diminuaient. Selon Megha Sharda, ces évolutions tendraient vers le rétablissement d'une connectivité optimale entre toutes ces zones, indispensable à de bonnes interactions avec autrui.

Ce n'est pas réservé aux seuls individus atteints de TSA : nous savons tous qu'une musique appropriée améliore notre communication avec nos congénères. Rappelez-vous votre dernière séance de karaoké…

M. SHARDA *ET AL.*, *TRANSLATIONAL PSYCHIATRY*, VOL. 8, ART. 231, 2018

Hors-série 99 : Cancer

Venir à bout des résistances tumorales

Les traitements de certains cancers, notamment le carcinome basocellulaire, laissent souvent de côté une population résiduelle de cellules à l'origine des rechutes. On vient de comprendre les mécanismes de cette résistance.

Le *Hors-Série* n° 99 : « Cancer. L'arsenal des nouvelles thérapies » proposait de changer de regard sur la maladie pour découvrir de nouvelles pistes de traitements à explorer. Cédric Blanpain, de l'université libre de Bruxelles, et ses collègues semblent en avoir découvert une qui permettrait de venir à bout de la résistance des tumeurs.

Ils se sont intéressés au carcinome basocellulaire, un cancer de la peau. On compte plusieurs millions de nouveaux cas chaque année dans le monde. Le plus souvent, on prescrit du vismodégib, notamment quand le cancer est avancé et métastatique. Des régressions sont fréquemment observées, mais elles sont de courte durée : après l'arrêt du traitement, les rechutes sont nombreuses. Pourquoi ?

Les biologistes ont compris le mode de fonctionnement du vismodégib. Cette molécule induit la différenciation des cellules tumorales (en inhibant la voie de signalisation nommée Hedgehog, impliquée, elle, dans la prolifération cellulaire) et stimule leur élimination naturelle par desquamation comme dans un épiderme sain. Toutefois, une population de cellules tumorales résiste à ce traitement et donnera un second élan à la maladie quand le traitement sera arrêté. Pour quelles raisons ?

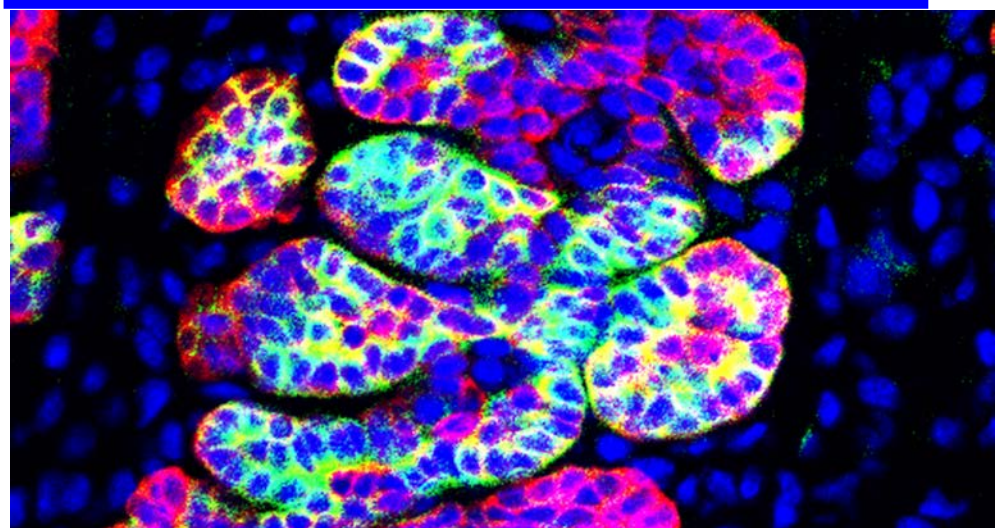
Ces cellules tumorales résiduelles de carcinomes basocellulaires sont dormantes et caractérisées par l'activation d'une voie de signalisation nommée Wnt. Elle est surtout connue pour son rôle dans l'embryogenèse. Chez l'adulte, en général, elle maintient l'état indifférencié des cellules-souches. Ainsi, lorsqu'elle est activée, elle empêcherait l'effet différenciateur du vismodégib.

Dès lors, l'inhibition de cette voie Wnt (à cet effet, de tels médicaments existent d'ores et déjà) en parallèle de l'administration du traitement réduirait les phénomènes de résistance. C'est bien ce qui a été observé, pour l'instant chez la souris : l'éradication tumorale dans la grande majorité des cas.

En outre, comme le souligne Cédric Blanpain, « la différenciation tumorale est une option très intéressante pour le traitement des cancers, car c'est une approche qui n'est pas toxique pour les cellules normales. »

A. SANCHEZ-DANES *ET AL.*, *NATURE*, VOL. 562, PP. 434-438, 2018

Dans ces cellules du cancer de la peau *(en rouge)*, on distingue celles *(en vert)* qui résistent au vismodégib seul, mais contre lesquelles l'ajout d'un inhibiteur de la voie Wnt est efficace.



Un duo de choc

Le Hors-Série n° 101 : « La révolution végétale » [illegible] plantes à la sylvothérapie » faisait l'inventaire du microbiote des plantes, essentiellement autour des racines, et de ses bénéfices. Juan Francisco Jiménez-Bremont, du Laboratoire de biotechnologie moléculaire des plantes, à San Luis Potosí, au Mexique, et ses collègues en donnent un nouvel exemple. Ils ont étudié les mécanismes des bienfaits des champignons *Trichoderma atroviride* et *Trichoderma virens* quand ils sont présents dans la rhizosphère d'*Arabidopsis*. Les champignons favorisent le développement des plantes grâce à l'accumulation d'auxine, l'hormone de croissance, dans les extrémités des racines. Les *Trichoderma* protègent également *Arabidopsis* du froid et produisent des composés organiques volatils (des sesquiterpènes) aux propriétés biocides. Sans ces champignons, *Arabidopsis* ne serait pas grand-chose…

E. GONZÁLEZ-PÉREZ *ET AL.*, SCIENTIFIC REPORTS, VOL. 8, ART. 16427, 2018

Vers l'apprentissage quantique

D'un côté, la révolution de l'intelligence [illegible] *Hors-Série* n° 98 : « Big data. Vers une révolution de l'intelligence ». De l'autre, celle des ordinateurs quantiques. Imaginez la réunion des deux ! C'est ce qu'a fait L.-M. Duan, de l'université Tsinghua, à Pékin, en Chine. Avec son équipe, il propose un algorithme quantique pour l'apprentissage profond, inspiré des modèles actuels dits génératifs. Ceux-ci peuvent répliquer des données, selon la même distribution, de façon à créer des données « fausses, mais réalistes » à partir de vraies pour améliorer l'apprentissage. La version quantique serait plus efficace et apprendrait beaucoup plus vite.

K. GAO *ET AL.*, SCIENCE ADVANCES, VOL. 4(12), EAAT9004, 2018

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

OFFRE D'ABONNEMENT

DURÉE LIBRE

3 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE DÉCOUVERTE	FORMULE PAPIER + HORS SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier (12 numéros par an)	✓	✓	✓
Le hors-série papier (4 numéros par an)		✓	✓
L'accès en ligne illimité à pourlascience.fr			✓
L'édition numérique du magazine (12 numéros par an)			✓
L'édition numérique du hors-série (4 numéros par an)			✓
L'accès aux archives numériques depuis 1996			✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	**4,90 €** PAR MOIS **29 %** D'ÉCONOMIE	**6,50 €** PAR MOIS **31 %** D'ÉCONOMIE	**8,20 €** PAR MOIS **43 %** D'ÉCONOMIE

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service abonnements – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email : pourlascience@abopress.fr

☑ **OUI, je m'abonne à Pour la Science en prélèvement automatique**

PAG19STD

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher) et je complète l'autorisation de prélèvement ci-dessous

☐ FORMULE **DÉCOUVERTE**
12 n° du magazine papier
4,90€ PAR MOIS **-29 %** DPV4E90

☐ FORMULE **PAPIER + HORS SÉRIE**
12 n° du magazine papier
4 Hors-série papier
6,50€ PAR MOIS **-31 %** PPV6E50

☐ FORMULE **INTÉGRALE**
12 n° du magazine papier
4 Hors-série papier
Accès illimité aux contenus en ligne
8,20€ PAR MOIS **-43 %** IPV8E20

2 / Mes coordonnées

Nom : .....
Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....
Tél. : |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|
E-mail : ..... @ .....
(indispensable pour la formule intégrale)

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / Mandat de prélèvement SEPA

En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement dès réception de mon bulletin. Je bénéficie d'un droit de rétractation dans la limite de 8 semaines suivant le premier prélèvement. Plus d'informations auprès de mon établissement bancaire.

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : ..... Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

IBAN |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|

Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom : .....
Adresse : .....
Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....

Date et signature

Organisme Créancier : Pour la Science
70 bis, bd du Montparnasse – 75014 Paris

Cadre réservé au service abonnement. Ne rien inscrire

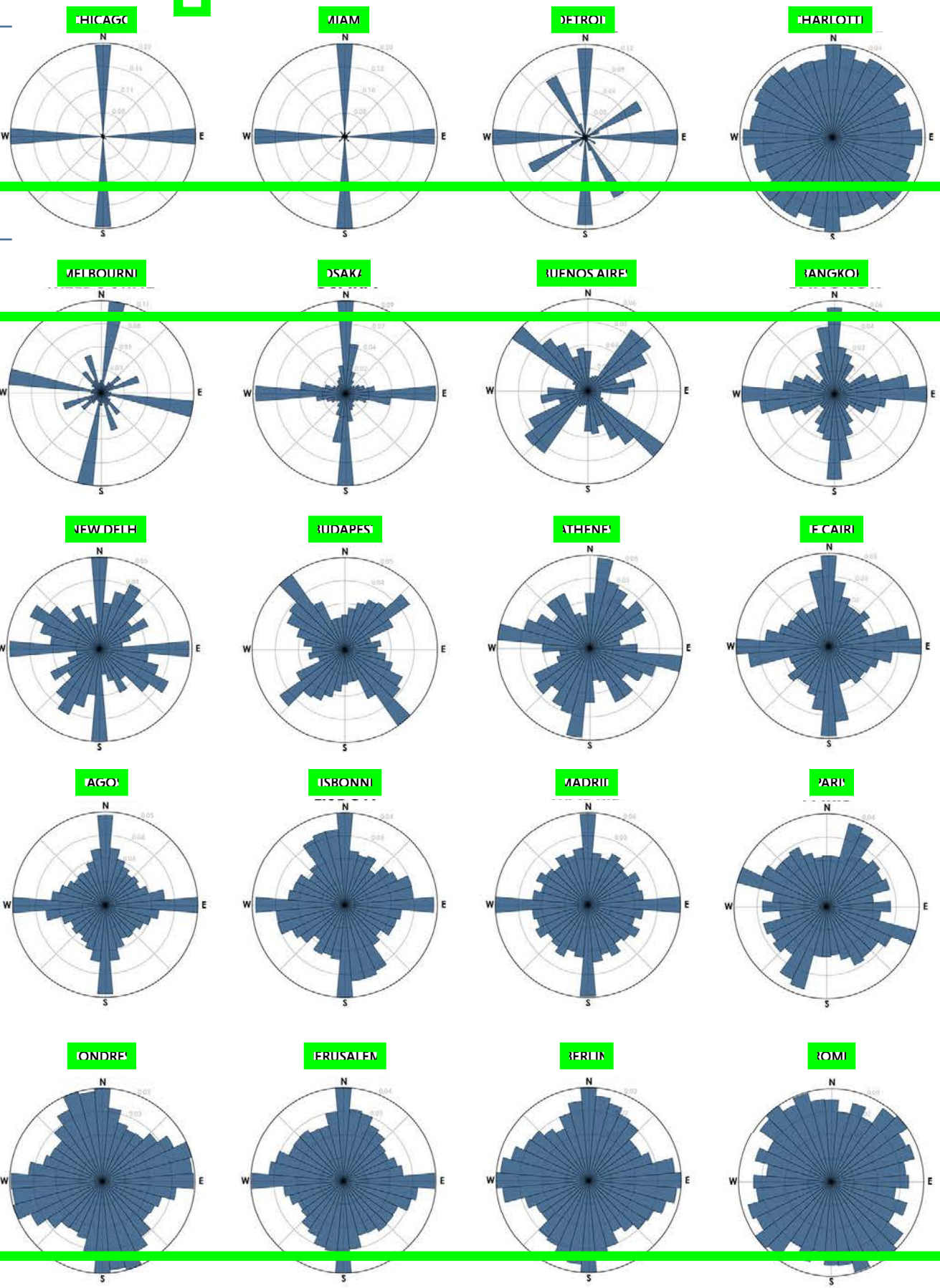
Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/12/2019 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site https://boutique.pourlascience.fr. Photos non contractuelles.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de votre choix en la matière. Le responsable du traitement est la société *Pour la Science*. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. *Pour la Science* ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à *Pour la Science*. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : https://rebrand.ly/charte-donnees-pls. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

Groupe Pour la Science - Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris cedex 14 – SarL au capital de 32 000€ – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

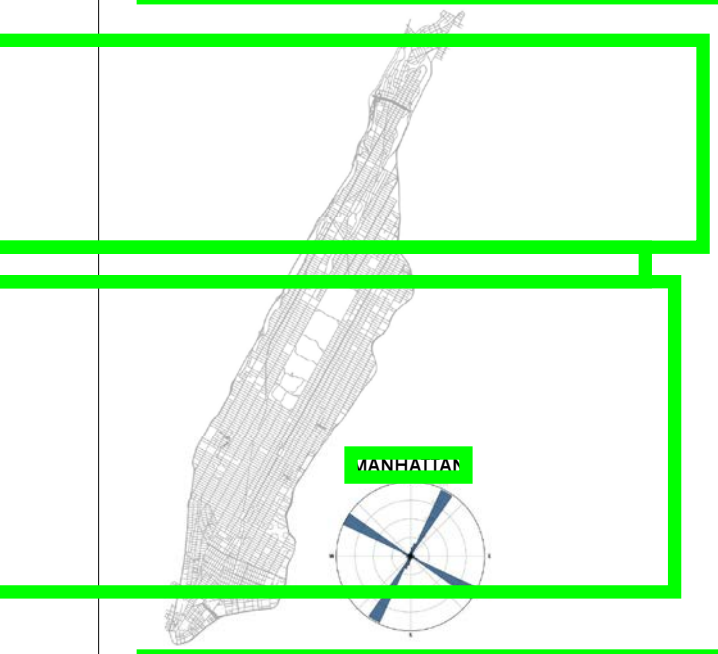
4 / MERCI DE JOINDRE IMPÉRATIVEMENT UN RIB

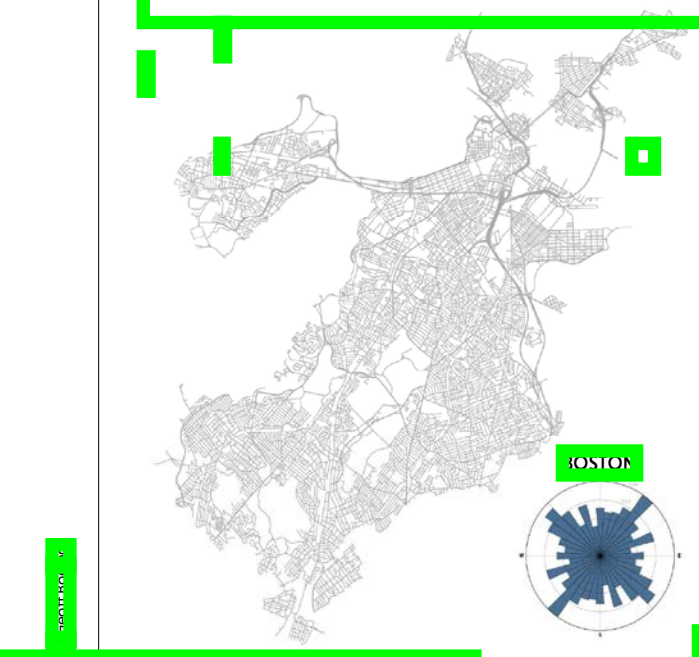
ÉTATS-UNIS


CHICAGO
MIAM
DETROI
CHARLOTTI
MELBOURNI
OSAKA
BUENOS AIRES
BANGKOI
NEW DELH
BUDAPES
ATHENES
LE CAIRI
AGOS
LISBONNI
MADRII
PARI
LONDRES
JERUSALEM
BERLIN
ROMI
N
S
W
E

Du chaos dans les villes

Dans certaines villes, les rues forment un quadrillage presque parfait. Dans d'autres, au contraire, l'urbanisme est beaucoup plus anarchique. Des informations précieuses pour organiser les transports en commun... ou préparer ses vacances.





Conseil voyage. En week-end à Rome, perdez-vous dans le lacis de ruelles sinueuses du Trastevere, un quartier pittoresque de la capitale italienne. C'est facile! Les voies partent dans toutes les directions et c'est un cauchemar pour s'orienter. Vous cherchez quelque chose de mieux organisé? Direction Manhattan! Dans cet arrondissement de New York, les rues ne suivent que deux directions (on met de côté Broadway). Et Paris? Le Caire? Bangkok? New Delhi? Londres?

Geoff Boeing, de l'université Northeastern à Boston, dans le Massachusetts, aux États-Unis, a compilé pour une centaine de villes l'orientation, la longueur, la connexion (par exemple, le nombre de rues à chaque intersection, le nombre d'impasses)... des rues afin de rendre compte de l'ordre, ou non, du plan des voies de communication. À partir de ces données, il a obtenu un indicateur de l'entropie urbaine, qui caractérise le degré d'organisation des cités.

Dans des sortes de boussoles (*voir les illustrations*), la position de barres (*en bleu*) représente la direction des rues, tandis que leur longueur rend compte de la fréquence relative des rues dans cette direction. Que voit-on? La ville la plus ordonnée est sans conteste Chicago. De fait, aux États-Unis, les villes sont très quadrillées, plus que dans le reste du monde. Pourtant, une commune dénote: Charlotte, en Caroline du Nord, jumelée avec Limoges, en France, est la plus chaotique des cent villes, après Rome et São Paulo! Paris est à la quatre-vingt-deuxième place.

À quoi peuvent servir de telles informations? Selon Geoff Boeing, elles seraient utiles pour optimiser les services de transports en commun.

G. Boeing, Urban spatial order: Street network orientation, configuration, and entropy, *SSRN*, 2018; http://bit.ly/SSRN-Rues

À LIRE

Blockchain et cryptomonnaies

PRIMAVERA DE FILIPPI

PUF, QUE SAIS-JE?, 2018

(128 PAGES, 9 EUROS)

Vous entendez parler de bitcoin sans trop savoir de quoi il retourne? Le concept de blockchain vous échappe? Cet ouvrage, simple et clair, est fait pour vous! L'auteure, chercheuse au Centre d'études et de recherches de sciences administratives et politiques (Cersa, CNRS et université Panthéon-Assas, à Paris) et chercheuse associée au Berkman center for Internet & society (université Harvard) vous livre les secrets d'une révolution en cours. De fait, le bitcoin n'est qu'un exemple parmi de nombreuses cryptomonnaies qui font trembler le monde de la banque. Pourquoi? Parce que c'est tout le système de confiance sur lequel s'appuie le monde de la finance qui est bousculé.
Les blockchains décentralisent l'idée de confiance, en la répartissant dans de nombreux ordinateurs, et rendent caducs ceux qui en sont dépositaires. Imaginez un monde sans banquiers, mais aussi sans notaires, sans registres de cadastres poussiéreux en mairie...
Les implications sociales sont potentiellement vertigineuses, avec la transition d'un modèle hiérarchisé vers un autre plus collaboratif et décentralisé. Primavera de Filippi prend l'exemple, parmi de nombreux, de l'industrie pharmaceutique dans laquelle la découverte de nouveaux médicaments serait plus rapide et moins onéreuse. Les risques n'en sont pour autant pas inexistants. Ainsi, des acteurs, privés ou non, pourraient s'emparer de ces technologies et les utiliser à des fins de surveillance généralisée. L'une des clés, pour tout un chacun, est de garder le contrôle sur ses données personnelles. Une autre est de savoir de quoi on parle... et donc de lire ce livre!

Un art écologique

PAUL ARDENNE

LA MUETTE, LE BORD DE L'EAU, 2018

(288 PAGES, 27 EUROS)

En 2015, à l'occasion de la COP21, à Paris, l'association Coal, créée par des professionnels de l'art contemporain, du développement durable et de la recherche, a organisé Art COP21, un festival artistique pour le climat réunissant 150 événements. Le grand public put alors se rendre compte de l'essor que prennent les considérations écologiques dans le monde de l'art. Aujourd'hui, de grands noms sont rattachés à ce rapprochement: Tomás Saraceno, Olafur Eliasson, Marina Abramović... Mais d'où vient cet art écologique? Comment expliquer son succès grandissant? Dans cet ouvrage, l'auteur, historien de l'art, commissaire d'exposition et écrivain tente de cerner les ressorts de cet engagement artistique, les mobiles d'une création pour une grande part inédite. Les formes sont multiples: travail dans et avec la nature, pratique du recyclage et des interventions éphémères, création collaborative et poétique de la responsabilité... Pour Paul Ardenne, créer écologiquement à l'ère de l'Anthropocène, c'est servir la défense de l'environnement. Il est ainsi question de Khvay Samnang. En 2010, cet artiste performeur cambodgien s'est recouvert de latex de façon à devenir un hévéa, un arbre à caoutchouc, pour dénoncer la monoculture de cette essence qui détruit depuis le XIXe siècle l'écosystème forestier dans son pays, et plus largement dans toute l'Asie du Sud-Est. L'objectif de tous ces artistes est de changer les mentalités, de réparer, de refonder l'alliance avec la Terre. Dans cet élan, l'auteur voit l'annonce d'un nouvel âge de l'art. Le dernier s'il ne parvient pas à éveiller les consciences...

À EXPLORER

Manuscrits médiévaux

Rabanus de Glanville, Sigebert de Gembloux, Alfana [illegible]

Théodore de Mopsueste, Loup de Ferrières... Vous avez toujours rêvé de parcourir les manuscrits de ces auteurs? C'est désormais possible sur internet, en haute définition, grâce à la Bibliothèque nationale de France et à la British Library. Avec le soutien de la Fondation Polonsky, c'est près de 800 manuscrits enluminés du VIIIe au XIIe siècle qui ont été numérisés et rendus accessibles en ligne.
Les manuscrits, sélectionnés pour leur intérêt historique, artistique et littéraire, révèlent la richesse et la complexité insoupçonnées des échanges entre la France et l'Angleterre au Moyen-Âge. Ils donnent également à voir la qualité et la diversité de la production artistique médiévale.
Au côté des bibles, les Évangiles, de vies de saints, les herbiers, des recueils épistolaires..., on retrouve toutes les «stars» de l'Antiquité: Cicéron, Virgile, Sénèque, Suétone, Pline l'ancien, Ovide, Hippocrate...
Parallèlement à ce projet, un livre a été publié: *Enluminures médiévales, chefs-d'œuvre de la Bibliothèque nationale de France et de la British Library*, édité par la BNF. Il est signé Kathleen Doyle et Charlotte Denoël, conservatrices en chef respectivement à la British Library et à la Bibliothèque nationale de France.

http://bit.ly/ManERGH

A VOIR

Un feu d'artifice de champignons

Une forme conique se dresse, grandit et s'élance vers le ci… Puis elle se fend, se déploie, s'étale, défaillit et recouvre le pied. Pas de doute, c'est un *Phallus indusiatus*, un champignon aussi connu sous le nom de satyre voilé. C'est l'un des personnages de cette vidéo en *time lapse* qui offre à voir, en accéléré le développement de plusieurs espèces de champignons. Des chapeaux de toutes les couleurs se déploient, comme des parapluies. L'incontournable amanite tue-mouches *Amanita muscaria*, rouge constellée de blanc, est de la partie. La bande-son rend encore plus hallucinogènes ces champignons.

https://youtu.be/b-nJoROGD1…

A ECOUTER

En route pour la millième !

Si la fonte du pergélisol libère… un virus, peut-il provoquer… …

Combien de temps faudrait-il pour voir émerger une nouvelle espèce à partir d'*Homo sapiens* ? Pourquoi le feu n'a-t-il pas d'ombre ? Ce sont quelques-unes des questions étranges, sérieuses, complexes, farfelues…, auxquelles ont tenté de répondre les invités de la 500e émission *La Méthode scientifique*, sur France Culture. Nicolas Martin recevait, pour ce numéro anniversaire, les intervenants réguliers des revues de presse du vendredi : journalistes, youtubeurs, blogueurs, scientifiques…

http://bit.ly/FC-LMS-500

A VISITER

MICROBIOTE

Le Charme discret de l'intestin était jusqu'à maintenant un best-seller consacré à l'incroyable vie du microbiote. C'est aussi, pour quelques mois, une exposition.

Près de 600 mètres carrés pour rendre compte de ce qui se passe sur 300 à 400 mètres carrés. C'est presque à l'échelle 1 ! De quoi parle-t-on ? De l'exposition « Microbiote, le charme discret de l'intestin », dédiée aux processus digestifs en général et en particulier, et surtout, aux milliards de microorganismes que nos intestins hébergent, la flore intestinale, désormais connue sous un nom plus scientifique, le microbiote intestinal. L'événement est directement inspiré du livre de Giulia Enders (illustré par sa sœur Jill), paru en France en 2015.

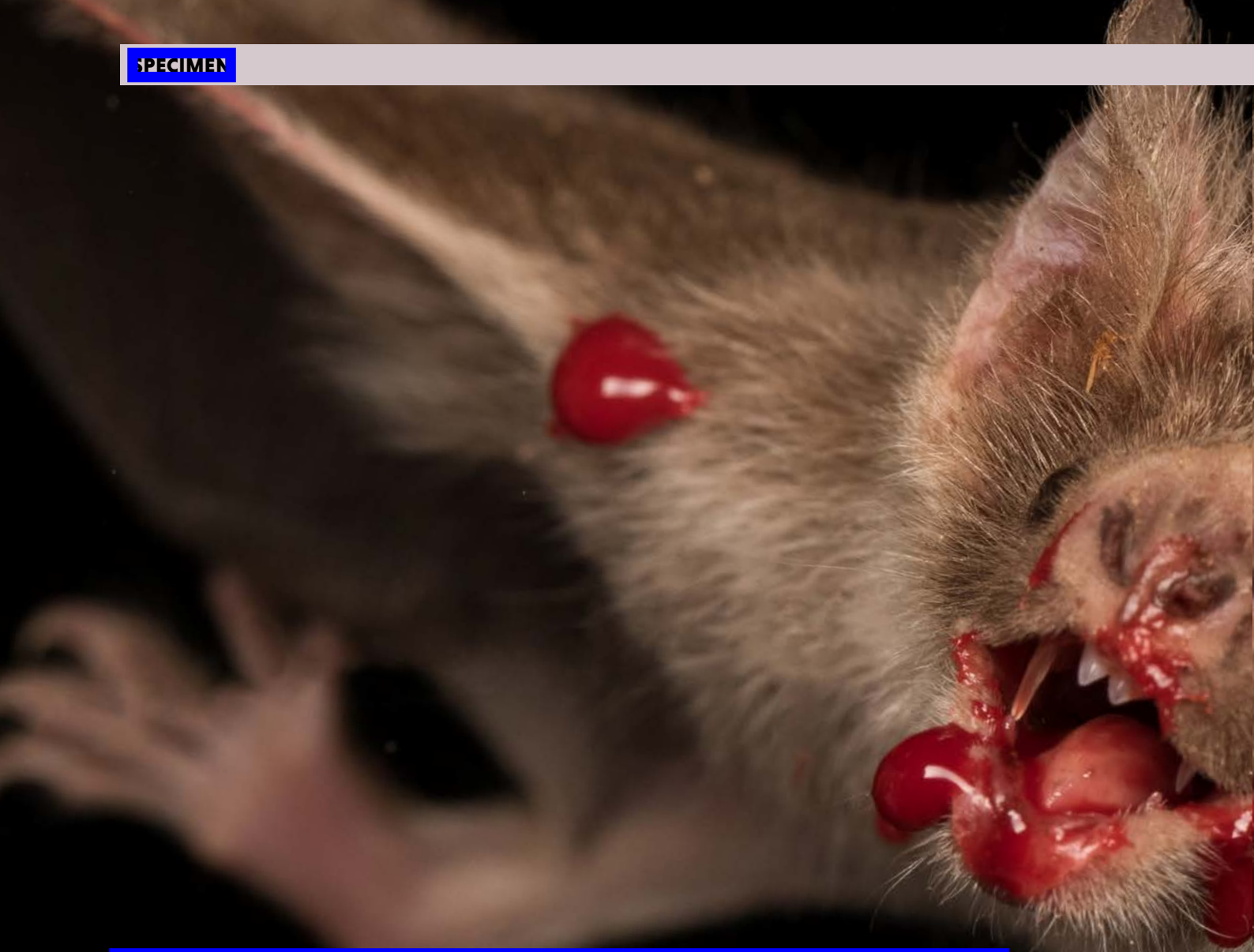
Rappelons que le microbiote abrite dix fois plus de microorganismes (100 000 milliards) que le corps humain ne contient de cellules ! Ce sont des bactéries pour l'essentiel, mais aussi des virus, des champignons, des levures, des archées… Cette flore est essentielle à la digestion, bien sûr, mais elle est aussi un acteur majeur de l'immunité. Les liens entre microbiote et santé physique, mais aussi mentale, sont nombreux et l'on n'est sans doute pas au bout des découvertes. Les molécules fabriquées par nos hôtes, comme les vitamines, agissent sur l'ensemble du corps, y compris le cerveau : obésité, diabète, Parkinson, autisme, anxiété… auraient à voir avec le microbiote.

Avant d'en arriver au microbiote, en amuse-bouche de l'exposition, les grands principes de la digestion sont évoqués. De la bouche à l'anus, chaque organe clé est détaillé, parfois de façon peu ragoûtante (la comparaison des différents types de vomis est certes édifiante, mais mieux vaut être à jeun pour l'apprécier pleinement) par des films, de vrais organes conservés par plastination, des animations…

Vient ensuite le plat de résistance, le microbiote lui-même, après le passage d'un tunnel hérissé de villosités, un fragment d'intestin géant. Là, on fait connaissance avec ces microorganismes qui nous peuplent. Ainsi, *Helicobacter pylori* est, dans des conditions normales, un allié contre l'asthme. Cependant, en cas de déséquilibre de la flore intestinale, la bactérie peut produire une substance toxique pour les neurones. La recherche a aussi sa place, grâce à des vitrines qui présentent la métagénomique (l'analyse globale des gènes), la culture de bactéries anaérobies (intolérantes à l'oxygène), les souris axéniques (sans microbiote)…

Enfin, la dernière partie est dédiée au bien-être. Un film d'animation très didactique compare le microbiote à un jardin. Comme tout écosystème, notre flore est fragile : nous devons la cultiver et en prendre soin. Mangez des fibres !

« Microbiote. Le charme discret de l'intestin », à la Cité des sciences et de l'industrie, à Paris. Jusqu'au 4 août 2019. http://bit.ly/CDS-Micro



Les curieux enfants de Dracula

La curiosité est un vilain défaut, dit-on. Pourtant, pour beaucoup d'espèces, elle est le moteur des jeunes pour explorer leur environnement et s'y confronter. Avec l'âge, la soif de découvertes s'émousse. Cette tendance a été montrée chez des oiseaux, des primates… et il suffit de voir un chaton grandir pour s'en rendre compte. Qu'en est-il chez les vampires? On parle ici des chauves-souris *Desmodus rotundus*.

Gerald Carter, de l'institut Max-Planck pour l'ornithologie, à Constance, en Allemagne, et ses collègues ont étudié la néophobie chez ces chiroptères. Pour ce faire, ils ont placé dans des cages soit des congénères soit des objets inanimés. Ce protocole s'explique: on avait déjà observé que les vampires régurgitent de la nourriture pour les prisonniers afin de les aider. Dracula est altruiste!

Quel que soit leur âge, les chauves-souris ont rendu visite aux animaux captifs, mais seuls les jeunes sont allés voir les objets qui représentaient une nouveauté. C'est important pour mieux cerner les dynamiques de transmission d'agents pathogènes, comme le virus de la rage et certains trypanosomes. Et Batman, est-il encore curieux? ■

G. Carter *et al.*, Younger vampire bats (*Desmodus rotundus*) are more likely than adults to explore novel objects. *PLoS One*, vol. 13(5), e0196889, 2018.

Cette photographie est extraite du blog Best of Bestioles : http://bit.ly/PLS-BOB

Intelligence et art artificiel

Le 26 octobre dernier, chez Christie's, *Le Portrait d'Edmond de Bellamy* était adjugé à plus de 432 500 dollars. Une première, car l'œuvre d'art avait été créée par une intelligence artificielle

$\min_G \max_D \mathbb{E}_x[\log(D(x))] + \mathbb{E}_z[\log(1-D(G(z)))]$. C'est la signature que l'on peut voir en bas d'un tableau vendu en octobre 2018 chez Christie's, à Londres, pour le prix de 432 500 dollars (environ 381 000 euros) ! Avec cette somme faramineuse, plus de 40 fois l'estimation initiale, l'affaire a fait grand bruit. L'œuvre ainsi adjugée est *Le Portrait d'Edmond de Bellamy* (*voir page ci-contre*), que l'on doit à *Obvious*, un collectif d'artistes français composé de Hugo Caselles-Dupré, Pierre Fautrel et Gauthier Vernier.

Pourquoi tant d'effervescence, alors que les sommes en jeu sont loin des montants astronomiques d'un Léonard de Vinci ou d'un Paul Gauguin ? Parce que la toile a été conçue par une intelligence artificielle. Elle s'inscrit dans une généalogie de onze tableaux, représentant la famille d'Edmond de Bellamy, produits par un système de réseaux adverses génératifs (GAN en anglais, pour *generative adversarial networks*). Dans cet algorithme élaboré en 2014 par Ian Goodfellow, aujourd'hui au centre de recherches de Google, deux réseaux sont en compétition. Le premier (le générateur) propose une image qu'il a soit créée soit puisée dans des exemples, réels, mis à sa disposition. Le second (le discriminateur) doit déterminer l'origine de l'image. Avec le temps, le générateur s'améliore et trompe de plus en plus le discriminateur. Alimenté par quelque 15 000 portraits peints entre le XIVe et le XXe siècle, le GAN a ainsi livré au terme du processus des milliers de portraits parmi lesquels la famille de Bellamy a été choisie, imprimée et encadrée. La signature est un fragment du programme.

Avec *Le Portrait d'Edmond de Bellamy*, l'intelligence artificielle s'ancre un peu plus encore dans le monde de l'art. Le mouvement est d'envergure et touche toutes les formes artistiques. Par exemple, Emily Howell, un programme informatique créé par David Cope, professeur de musique à l'université de Californie, à Santa Cruz, a sorti deux albums (*From Darkness, Light* en 2009 et *Breathless* en 2012). En 2018, a été publié *1 The Road* (en référence *On The Road*, de Jack Kerouac), un livre écrit par... une Cadillac (conduite par Ross Goodwin, artiste, hacker...) équipée d'une caméra de surveillance, d'un GPS, d'un microphone et d'une horloge connectés à une intelligence artificielle !

Le GAN étant en accès libre, vous pouvez vous lancer et viser la célébrité. Retenez que celle d'*Edmond de Bellamy* (comme beaucoup d'autres œuvres d'art d'ailleurs) doit beaucoup aux médias et au capitalisme... c'est presque l'histoire de l'autre *Bel-Ami*, celui de Maupassant ! ■

. Goodfellow *et al.*, *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 27, 2014

$\min_G \max_D E_x[\log(D(x))] + E_y[\log(1 - D(G(y))]$

PROCHAIN HORS-SÉRIE

en kiosque le 10 avril 2019

L'ordre caché des nombres

1, 2, 3, 4... rien de plus simple que les nombres ! Et pourtant, ils recèlent bien des mystères sur lesquels planchent les mathématiciens les plus chevronnés. Comme Peter Scholze, l'un des quatre derniers lauréats de la médaille Fields, qui travaille sur la théorie des nombres et ses liens avec la géométrie. Un numéro pour explorer le monde des nombres et cerner les frontières de ses *terræ incognitæ*

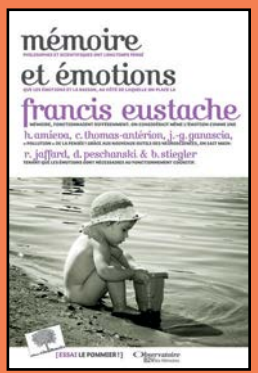
Achevé d'imprimer chez Rotographia (IT) – N° d'imprimeur : 1827/01/18 – N° d'édition : M 01201-01 – Dépôt légal : janvier 2019
Commission paritaire n° 1122 K 82179 du 15/06/12 – Distribution : Presselis – ISSN : 1760-7965 – Directeur de la publication et gérant : Frédéric Mério

Quand notre mémoire guide notre avenir...

On la pense logiquement tournée vers le passé : notre mémoire est en fait orientée vers le futur.
Et elle est indispensable pour orienter notre devenir, sur le plan individuel comme sur le plan collectif…

150 p. – 17 €

sous la direction de Francis Eustache, découvrez également...



Éditions Le Pommier

Avec l'Observatoire B2V des Mémoires

Retrouvez toutes nos nouveautés sur notre site www.editions-lepommier.fr

APPEL À CANDIDATURES

BOURSE DOCTORALE
OBSERVATOIRE B2V
DES MÉMOIRES 2019

VOUS TRAVAILLEZ SUR LA MÉMOIRE ?

VOUS ÊTES ÉTUDIANT EN NEUROSCIENCES OU EN SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES ?

CANDIDATEZ AVANT LE 14 MAI 2019

Toutes les informations sur
www.observatoireb2vdesmemoires.fr

Observatoire B2V des Mémoires

B2V GROUPE Retraite Prévoyance

Prevaal FINANCE