

The background of the cover features a large silhouette of a human figure. Inside the silhouette, there is a construction site with a crane on the left, a worker on a ladder, and a small truck. Above the figure's head, a brain is suspended by a crane hook. The background transitions from orange at the top to yellow at the bottom.

DANIÈLE TRITSCH
JEAN MARIANI

CA VA PAS
LA TÊTE!

Cerveau, immortalité
et intelligence artificielle,
l'imposture
du transhumanisme

Belin:

Ça va pas la tête!

Danièle Tritsch
Jean Mariani

Avec la collaboration d'Oriane Dioux

Ça va pas la tête !
Cerveau, immortalité
et intelligence artificielle,
l'imposture du transhumanisme

Belin:

170 bis, boulevard du Montparnasse, 75680 Paris cedex 14
www.editions-belin.com

Le code de la propriété intellectuelle n'autorise que « les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » [article L. 122-5] ; il autorise également les courtes citations effectuées dans un but d'exemple ou d'illustration. En revanche « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle, sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » [article L. 122-4]. La loi 95-4 du 3 janvier 1994 a confié au C.F.C. (Centre français de l'exploitation du droit de copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris), l'exclusivité de la gestion du droit de reprographie. Toute photocopie d'œuvres protégées, exécutée sans son accord préalable, constitue une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

AVANT-PROPOS

Demain, il verra dans le noir et il entendra les ultrasons. Il courra plus vite, ne connaîtra plus la fatigue et ne se cassera pas le col du fémur en glissant sur l'herbe mouillée. Ses capacités intellectuelles auront décuplé, sa mémoire sera prodigieuse, il se souviendra de tout, même à 100 ans ! Car les signes de vieillesse auront disparu et les maladies graves du cerveau, telles que la maladie d'Alzheimer, auront été éradiquées. Après-demain, son cerveau sera transféré dans une machine et son esprit sera quelque part dans les nuages, débarrassé de ce corps vieillissant. Le handicap, la maladie, la vieillesse et la mort auront disparu. Il sera immortel !

Qui « il » ? L'Homme, bien sûr. En tout cas, l'Homme tel que l'imagine le mouvement transhumaniste. Surfant sur deux mythes qui ont toujours fasciné l'être humain, l'immortalité et la fontaine de Jouvence, ce courant d'idées a pris, depuis quelques années, un essor considérable dans le monde au point qu'il est qualifié de Révolution, la Révolution transhumaniste. Si la première occurrence du terme transhumaniste émerge après la Seconde Guerre mondiale sous la plume de Julian Huxley (père de l'eugénisme et frère de Aldous, auteur

du *Meilleur des mondes*), ce mouvement est apparu, dans sa conception contemporaine, en Californie (États-Unis) au sein des courants libertaires et libertariens des années 1960-1970. Il a ensuite été relayé dans les années 1980 par des futurologues américains avant d'arriver jusqu'à nous. Ses apôtres recherchent une amélioration illimitée des facultés physiques et mentales de l'être humain par tous moyens possibles: chimiques, génétiques, mécaniques ou numériques, notamment grâce à «l'intelligence artificielle». Le développement important des technologies NBIC (Nanotechnologies, Biotechnologies, sciences de l'Information et sciences Cognitives) est apparu aux transhumanistes comme une opportunité historiquement unique de mettre en œuvre leurs idées. Ils ont été encouragés dans cette tendance par la célèbre loi de Gabor qui indique que tout ce qui peut être fait, tôt ou tard la science le réalise (on peut rêver d'aller sur Mars... on ira un jour!)

L'avènement de l'Homme Dieu?

Le transhumanisme est donc un mouvement qui défend l'idée de transformer/dépasser l'Homme pour créer un post-humain, ou un trans-humain, aux capacités supérieures à celles des êtres humains actuels. Cette transformation peut s'envisager au niveau individuel, mais aussi au niveau collectif, conduisant alors à une humanité nouvelle. Différentes facultés de l'être humain seraient concernées: physiques ou mentales et cognitives. Et elle prolongerait la durée de la vie, en parfaite santé bien sûr! Le but? Fusionner l'Homme et l'ordinateur, devenu alors tout-puissant après l'avoir soustrait au vieillissement et à la mort. Un projet de dépassement des finitudes humaines. Un «Homo Deus» tel que l'anticipe l'historien

Yuval Noah Harari dans son livre éponyme. Ambition ou illusion et fantasme? Pendant que certains (comme nous à présent) s'appesantissent sur cette question, les humains continuent à mourir. C'est pourquoi des transhumanistes chevronnés proposent soit de les congeler pour attendre un monde meilleur, soit même de ressusciter les morts!

Parmi les transhumanistes actuels, l'un des plus célèbres est très certainement Ray Kurzweil, sorte de « gourou » de ce courant d'idées, ingénieur en chef de Google, théoricien du transhumanisme et cofondateur de la *Singularity University* dans la Silicon Valley (Californie, États-Unis). Kurzweil prédit le moment du dépassement inéluctable de l'intelligence humaine par celle de la machine, moment qu'il nomme « singularité » par analogie avec la singularité en mathématiques qui correspond à un point où un objet mathématique ne peut plus être défini. Cette évolution technologique hypothétique, où le possible qui s'ouvre est vertigineux et imprédictible, Kurzweil la place d'une façon arbitraire en 2045. Pour Stephen Hawking, astrophysicien renommé pour ses études sur les trous noirs, « *les humains limités par leur lente évolution biologique ne pourront rivaliser face à la machine* ». En d'autres termes : la fin de l'espèce humaine est proche.

Aux États-Unis, de nombreuses sociétés transhumanistes se développent, comme l'*Extropy Institute* fondé par Max More, également président de la société *Alcor Life* qui ambitionne de cryogéniser, c'est-à-dire de congeler des humains en attendant des jours meilleurs. Sa compagne Natasha Vita-More dirige une association internationale de promotion du transhumanisme (initialement *World Transhumanist Association* maintenant appelée *Humanity+*). Zoltan Istvan, quant à lui, ancien journaliste du *National Geographic*, vise l'immortalité, ni plus ni moins! En attendant, il a fondé le

« Parti transhumaniste » et a été candidat à l'élection présidentielle américaine de 2016, mais n'a pu empêcher l'élection de Donald Trump. Un autre nom qui compte dans le mouvement transhumaniste est celui de Aubrey de Grey, ancien informaticien, qui, grâce à la fondation SENS (*Strategies for Engineered Negligible Senescence*), s'intéresse surtout aux recherches sur le vieillissement.

En France, le mouvement transhumaniste est beaucoup plus modeste. Après quelques essais dans les années 2000, il s'est structuré sous le nom de l'Association française transhumaniste-Technoprog, qui est assez active et en croissance, avec une centaine de membres et un petit millier de sympathisants. Ses positions sont « modérées » (tout est relatif!). Elle ne soutient pas l'idée de l'immortalité ou de la cryogénie et considère le risque d'une humanité à plusieurs vitesses, entre les simples humains et les post-humains. En revanche, elle défend l'hypothèse que, grâce aux progrès rapides des neurosciences, nous pourrions intervenir de manière à moduler finement nos propres comportements, avec néanmoins pour limite (et ce n'est pas complètement faux!) la tendance de l'humain à l'agressivité, la dominance, le besoin de possession et ses faibles propensions à l'empathie.

Une pompe à fric

Aux moqueurs qui considèrent que l'on a à faire à des hurluberlus, les transhumanistes les plus engagés répondent que seul le dépassement des limites biologiques et physiologiques de l'humain permettra de satisfaire l'exigence absolue de liberté et de responsabilité individuelle. En ce sens, pour

certain, ce mouvement s'inscrirait donc dans une continuation de la tradition humaniste ! Au-delà de ces prises de positions théoriques, les idées développées par les transhumanistes ne sont pas seulement des fantasmes plus ou moins délirants d'un certain nombre de techno-prophètes. Nées de la convergence des technologies NBIC, les promesses transhumanistes mobilisent des financements privés considérables en particulier de ceux qu'on nomme les GAFA (Google, Apple, Facebook et Amazon). Les cofondateurs de Google, Larry Page et Sergey Brin, investissent massivement (des centaines de millions de dollars, autant sinon plus que le *Human Brain Project* financé par la communauté européenne en 2013 !) dans la recherche dans les domaines NBIC. Google a créé *Google Xlab* et recruté Ray Kurzweil comme directeur de l'ingénierie, c'est-à-dire à un niveau élevé dans l'entreprise. Une autre filiale, *Calico*, fondée en 2013 et dédiée aux biotechnologies, est dirigée par Arthur Levinson, le président du Conseil d'administration d'Apple et ancien de la biotech *Genentech*. Enfin le PDG de Facebook, Mark Zuckerberg, a annoncé en 2017, lors de la conférence annuelle des développeurs de Facebook, des projets de recherche à long terme visant la communication directe entre le cerveau et l'ordinateur, et éventuellement la communication entre cerveaux. Une forme de télépathie en quelque sorte !

Les espoirs issus des technosciences NBIC conjuguent donc de manière délibérée le contrôle toujours plus poussé de la nature par la science et la promesse de toujours plus de profits pour les grandes entreprises. L'alliance de ce désir de puissance prométhéenne et du pouvoir financier séduit des politiques et de richissimes patrons car il leur ressemble : notre pauvre corps vivant mais mortel est le symbole de notre finitude. Or l'idée d'échapper à leur volonté de toute-puissance mégalomane est pour eux inadmissible. La cerise sur le

gâteau, c'est l'adhésion d'intellectuels et de simples citoyens aux valeurs pseudo-humanistes de ces mouvements. Il ne reste qu'à transformer en certitudes des hypothèses pourtant non démontrées par la science, comme nous le verrons tout au long de ce livre, et le tour de bonneteau est joué!

Une intelligence « post-humaine » ?

Autre cerise sur le gâteau et coïncidence heureuse: un ordinateur a réussi à battre les meilleurs joueurs d'échecs et ceux de go ; il n'en faut pas plus pour affirmer qu'une intelligence « post-humaine » est à portée de main. Il est certain que l'intelligence artificielle a fait ces dernières années des progrès fulgurants grâce à l'apparition de nouvelles méthodes d'apprentissage automatique encore appelé apprentissage profond (le *deep learning* des Anglo-saxons), fondées sur des algorithmes informatiques sophistiqués. À force de gaver la machine avec des données, comme des images, celle-ci devient capable d'apprendre toute seule, reconnaître l'image d'un chat par exemple. Ce sont ces avancées qui sont, en partie, à l'origine des délires transhumanistes.

Est-ce que, pour autant, notre conscience, nos pensées pourront être mises dans une puce ? Dès que l'on s'intéresse au cerveau, les questions posées sont particulièrement complexes. Clairement, le cerveau n'est pas une puce. Il possède une structure qui est à la fois précise et extraordinairement compliquée, ainsi que des propriétés et des fonctions éminemment dynamiques qui le rendent modifiable en permanence. De plus, l'activité cérébrale est très dépendante de ses liens avec les organes des sens (vision, audition...) et les organes de l'action (le mouvement en

étant l'exemple le plus simple). Le cerveau a certes une activité autonome, mais s'il n'était pas nourri en permanence par ces interactions avec l'environnement il serait en quelque sorte « orphelin ».

En outre, la comparaison des cerveaux de différents individus soulève un paradoxe : il existe un plan d'organisation précis des structures cérébrales de sorte que, au sein d'une espèce donnée, les cerveaux de tous les êtres se ressemblent beaucoup et semblent même identiques. Ceci suggère que la formation de cette structure obéit à un programme d'expression précis de gènes au cours du développement de l'embryon, pendant la grossesse et les premières années de la vie du bébé. Ce déterminisme génétique est en quelque sorte le prix à payer pour qu'une structure aussi complexe soit transmise de générations en générations avec un minimum d'erreur. Bref, le cerveau ne se construit ni ne fonctionne comme un ordinateur.

Si l'on était capable de les décrire à un niveau d'organisation beaucoup plus fin (microscopique), ces mêmes cerveaux apparaîtraient au contraire tous différents car les connexions précises entre les neurones varient considérablement d'un individu à l'autre et se modifient constamment. C'est la fameuse « plasticité cérébrale ». À ce niveau de complexité, chaque cerveau est unique et ceci nous rend tous singuliers. Identifier les bases biologiques de cette singularité cérébrale (bien différente de la singularité de Kurzweil !) est un tour de force dont les neuroscientifiques sont incapables et ce pour très longtemps encore.

La reproduction *in silico* du cerveau de l'Homme se heurte donc à des difficultés considérables qui sont de nature intrinsèquement biologique, au-delà des difficultés toutes aussi réelles de développer l'intelligence artificielle au niveau nécessaire.

Si l'on veut fabriquer une machine à l'image de l'être humain, il ne suffit pas de prendre en compte les différences interindividuelles de l'anatomie fine des connexions cérébrales; il faut aussi considérer les différences fonctionnelles essentielles qui en résultent telles que la mémoire, les émotions, la conscience, l'empathie. Et c'est là que réside la plus grande difficulté. *« On ne sait pas ce que c'est que la conscience, on n'en connaît pas les fondements. On n'est donc pas capable de créer une machine consciente »*, tranche Jean-Gabriel Ganascia, professeur à l'université Pierre-et-Marie-Curie (Paris VI) et chercheur en intelligence artificielle. N'est-ce qu'une question de calendrier? Non, certainement pas. Jean-Gabriel Ganascia précise: *« Pour cela, il faudrait que la machine perçoive comme nous: la douleur, le plaisir... Et quand bien même, elle ne les percevra pas de la même manière que nous... cette croyance est un pur fantasme. »*

L'Homme « augmenté » ?

Les transhumanistes nous proposent beaucoup d'autres projets qui, à première vue, semblent un peu plus modestes que la dématérialisation totale du cerveau. Ils nous promettent un humain à la fois bionique (imitation des performances d'autres espèces animales) et/ou cyborg (acquisition des propriétés des robots). Autrement dit, un Homme « augmenté ». Ray Kurzweil, encore lui, revendique de développer des post-humains porteurs de cerveaux hybrides augmentés et connectés: *« D'ici 20 ans, nous aurons des nano-robots, ils entreront dans notre cerveau à travers nos vaisseaux capillaires et connecteront simplement notre néocortex à un néocortex synthétique dans le cloud, nous en fournissant ainsi*

une extension. Nous disposerons d'un système de pensée hybride fonctionnant sur des composants biologiques et non biologiques.»

Pour les prophètes du transhumanisme, l'Homme augmenté aurait ainsi la maîtrise de ses capacités cognitives et physiques. À terme, une nouvelle espèce hybride en sortirait, promise même à l'immortalité. C'est là encore du pur fantasme !

Les apprentis sorciers du transhumanisme non seulement font preuve d'une profonde méconnaissance du fonctionnement du cerveau, mais n'imaginent pas que manipuler cet organe, ou plus spécifiquement certains réseaux de neurones, puisse entraîner des dysfonctionnements inattendus susceptibles de créer de nouvelles pathologies. La notion d'Homme augmenté pose également un certain nombre de problèmes éthiques et sociétaux.

Vivre mille ans ?

Les prophètes du transhumanisme appuient aussi leurs idées sur les avancées de la recherche en biologie, en particulier dans le domaine du vieillissement. Demain, on vivra 200 ou 300 ans, plus même, et après-demain nous serons immortels. Laurent Alexandre, chirurgien urologue et auteur prolifique de livres exploitant le filon transhumaniste, qui a notamment écrit *La Mort de la mort*, aime les phrases chocs, surtout quand elles ne s'appuient sur rien. « *L'homme qui vivra 1 000 ans est déjà né* » (et bien sûr en parfaite santé) ! les 1 000 ans succèdent aux 300 ans qu'il annonçait il y a peu. Le but avoué des fondateurs de Calico, filiale de Google, n'est-il pas de se concentrer sur le défi de la lutte contre le vieillissement et les maladies associées, avec pour projet de « *tuer la mort* » ?

Beaucoup n'y croient pas mais ne peuvent s'empêcher de succomber au rêve transhumaniste au lieu de le critiquer : Luc Ferry, philosophe et auteur de *La révolution transhumaniste*, déclare : « *Le transhumanisme est un fantasme même si l'on peut espérer vivre 200 ou 300 ans.* » Quant au cinéaste Woody Allen, il serait prêt à se laisser séduire mais il lâche cet aphorisme merveilleux : « *L'éternité c'est long... surtout vers la fin* » !

Certes, l'espérance de vie de notre espèce a considérablement augmenté grâce à la diminution de la mortalité infantile, à l'amélioration des conditions d'hygiène depuis le début du xx^e siècle, et au recul plus récent de la morbidité chez la personne âgée. Mais la vie résulte d'un équilibre délicat entre des effets protecteurs et délétères de nombreux facteurs, et avec le temps les effets délétères gagnent du terrain. Pour l'instant le vieillissement, même en bonne santé, est inéluctable. Nul ne connaît le lieu et surtout l'heure où le paradis éternel sera à notre portée, ou s'il le sera, et ceci même avec le concours de Google.

Un cerveau réparé et guéri ?

Une difficulté supplémentaire constitue un autre verrou pour le trans/posthumanisme : notre cerveau, ce joyau, est fragile et affecté non seulement par le temps qui passe, mais bien plus encore par des maladies spécifiques et souvent terribles. Pour les transhumanistes, ce n'est pas un problème car non seulement le cerveau sera augmenté, mais il sera aussi réparé et guéri des nombreuses maladies qui l'attendent au tournant, surtout quand l'âge avance. En effet, la technomédecine, comme l'annonce Laurent Alexandre, va bouleverser l'humanité. « *La médecine ne soignera plus, mais transformera nos capacités biologiques, physiques, intellectuelles*

grâce notamment à des puces implantées dans le cerveau, des implants miniaturisés, des connexions personne-machine. » Il existe pourtant une contradiction criante entre la jeunesse éternelle promise par cette « utopie technologique » et la réalité actuelle qui reste terrifiante. Si les causes et origines de quelques maladies neurologiques sont connues, aucun traitement curatif vraiment nouveau n'existe pour les maladies neurodégénératives comme la maladie d'Alzheimer. Des progrès réels concernant la connaissance du fonctionnement du cerveau ont été réalisés depuis une trentaine d'années, mais sans doute moins spectaculaires et moins médiatiques que ceux menés récemment par l'intelligence artificielle. Les avancées de la médecine dite régénérative (thérapie génique, cellules souches, greffes, interface cerveau-machine, etc.) apportent des solutions ou suscitent des espoirs pour réparer le cerveau. Mais pour l'instant, les retombées thérapeutiques sont minimales.

Place à l'intelligence humaine

Faut-il désespérer pour autant ? Certainement pas. Face à ces prophètes, dont certains se disent philosophes et d'autres prétendent à un vernis de science, il est temps que l'intelligence humaine (et non artificielle) et la raison reprennent le dessus, en confrontant le rêve qui sommeille en chacun d'entre nous avec la réalité souvent beaucoup plus dure ou décevante. C'est le but de ce livre qui insiste en particulier sur le défi que représentent la connaissance et la compréhension du fonctionnement du cerveau. Il montre que les obstacles aux espoirs transhumanistes ne résident pas tellement dans les progrès nécessaires de l'intelligence artificielle, mais surtout

ÇA VA PAS LA TÊTE!

dans les progrès considérables à accomplir pour décrypter le cerveau, qui reste par bien des aspects une « boîte noire » pour les scientifiques.

Les efforts lents et soutenus de la recherche sont la seule voie pour y parvenir, mais aussi maintenir cet organe noble en bonne santé (cerveau préservé), voire le doter de capacités nouvelles (cerveau augmenté). De grands programmes ont été lancés aux États-Unis comme la *National Nanotechnology Initiative* (NNI) par le président de l'époque Bill Clinton, en 2000, ou plus récemment, en 2013, la *Brain Initiative* (*Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies*), par un autre président, Barack Obama. La même année, l'Union européenne finançait pour dix années, le *Human Brain Project*. De plus la science, la vraie, n'évolue pas que de façon lente et continue. Des révolutions, que certains préfèrent appeler maintenant des « progrès disruptifs », peuvent se produire à tout moment, de même que de simples accélérations qui pourraient conduire à de nouveaux traitements. Elles arrivent même parfois par hasard, à partir d'observations faites dans d'autres domaines scientifiques. Nul ne sait à l'avance d'où viennent les avancées décisives.

Comprendre le fonctionnement du cerveau, pour le préserver, augmenter ses performances, le réparer et le guérir constitue un projet enthousiasmant pour les générations à venir, même si personne ne peut affirmer que nous atteindrons un jour une connaissance totale de cet organe qui fonde chacun d'entre nous comme un individu singulier et unique. Ce projet prendra beaucoup plus de temps que ne le pense le citoyen abreuvé de pseudo-révolutions successives en neurosciences, et trompé par les transhumanistes. « *Ceux qui savent ne parlent pas, ceux qui parlent ne savent pas; le sage enseigne par ses actes, non par ses paroles* » a dit le philosophe chinois Lao Tseu.

CHAPITRE 1

L'intelligence artificielle : le Graal des transhumanistes

Le matin, fini les bons vieux réveils mécaniques qui faisaient tic-tac, tic-tac... plus ou moins bruyamment. Vous êtes réveillés par la radio programmée sur votre téléphone portable. Vous vous levez et vous précipitez à la cuisine prendre votre café tout fumant. Il est prêt, bien sûr, vous avez programmé votre cafetière la veille. Le plus dur, c'est d'y penser le soir. Mais vous pouvez programmer une alerte sur votre téléphone portable ou votre ordinateur pour ne pas oublier. Tout en le sirotant, vous consultez vos mails au cas il serait arrivé quelque chose de trèèèès important pendant la nuit. Jetant un coup d'œil sur les miettes de pain un peu partout autour de la table, vous vous dites qu'il faudrait se décider à passer l'aspirateur un de ces jours. Comment ? Vous n'avez pas encore de robot aspirateur ! Vous partez à votre travail. L'ordinateur de bord et le GPS se mettent en route. Ils calculent l'itinéraire le plus rapide

en fonction des bouchons. Vous somnolez encore quelques minutes, la voiture conduit toute seule. Après une dure journée de travail, vous rentrez à la maison, votre nouveau patron, le robot Maxime, est vraiment psychorigide! Vous allumez votre ordinateur. Une voix chaude et sensuelle vous demande: « *Comment s'est passée ta journée?* » Comme chaque soir, vous lui racontez les sautes d'humeur de vos collègues, votre séance de sport et elle rit avec vous de vos maladresses. Cette voix, celle de votre système d'exploitation, vous la connaissez bien. On dirait même que vous en êtes même tombé amoureux. On glisse là dans le scénario du film de science-fiction *Her* (2014), du réalisateur américain Spike Jones, interprété par Joachin Phoenix et Scarlett Johansson (pour la voix féminine virtuelle).

Que ces prédictions soient déjà vraies ou imaginées, elles reposent toutes sur l'intelligence artificielle (IA), sur laquelle les transhumanistes s'appuient pour établir leurs fantasmes. Certes l'IA a progressé. Elle est même déjà en train de révolutionner notre société et nos façons de vivre. Mais est-elle capable de produire des intelligences virtuelles avec lesquelles nous interagissons au quotidien? Ou de rendre l'Homme immortel, en téléchargeant sa conscience sur une puce? Avant d'aborder ce point, venons-en à l'essentiel. En fait, c'est quoi l'IA?

Tout commence avec les premiers automates

L'intelligence artificielle est loin d'être une idée neuve. Elle a germé dans la tête de poètes et de penseurs bien avant l'invention des premiers ordinateurs! Dès le VIII^e siècle avant J.-C., dans la Grèce antique, Homère décrit dans le chant XVIII de l'*Iliade* comment Héphaïstos, le dieu forgeron, a construit des trépieds munis de roulettes qui pouvaient aller

et venir seuls du palais des dieux à son atelier. Les lointains ancêtres des robots personnels supposés rouler « tout schuss » dans nos maisons pour apporter chaussons et plaquette de chocolat sans que l'on ait à se lever du canapé ! Ce même Héphestos, qui avait décidément de la suite dans les idées, a également fabriqué des femmes en or, capables de travailler et de parler, pour l'assister dans ses tâches quotidiennes. Là, on se passera de commentaires... Si ce n'est pour préciser que ces femmes accomplissaient leurs missions avec une telle perfection qu'elles se révélaient plus efficaces que n'importe quel humain. Normal : elles avaient été créées par un dieu !

D'autres textes de la Grèce antique mentionnent l'existence de têtes parlantes, dont un masque d'Orphée qui rend des oracles à Lesbos. À la même époque, en Égypte, des statues articulées, animées par la vapeur et par le feu, hochent la tête et bougent les bras. Il ne s'agit pas de sympathiques automates qui réalisent une danse de Saint-Guy pour distraire. Au contraire, leurs gesticulations étaient prises très au sérieux par les prêtres qui voyaient en elles des prophéties. Quelques siècles plus tard, le Golem, un automate imaginaire de forme humaine fabriqué en bois ou en argile, fait son apparition dans la tradition juive. Pour qu'il s'anime, un rabbin devait inscrire un mot magique sur son front.

Bien sûr, toutes ces créatures étaient animées grâce à une intervention divine. Mais à partir du ^{xvi}^e siècle, les choses changent... La médecine s'en mêle. À cette époque, les médecins commencent à percer les mystères du fonctionnement des organes, et ils remarquent d'étonnants parallèles avec le fonctionnement des outils confectionnés par l'Homme. Le cœur est assimilé à une pompe, les poumons à un soufflet. Il n'en faut pas plus pour que germe l'idée que l'on pourrait créer un corps de toutes pièces sans avoir à faire appel à un quelconque

souffle divin. Et cette idée en turlupine plus d'un, dont un certain René Descartes. L'illustre philosophe propose de reproduire artificiellement les fonctions biologiques essentielles à la vie animale, telles que l'alimentation, la communication parlée ou la locomotion. Ce sont ses fameux « animaux-machines ». Mais pas question de leur offrir la possibilité d'« *user de paroles ni d'autres signes en les composant, comme nous faisons pour déclarer aux autres nos pensées* ». Ce serait les doter d'intelligence, voyons ! Rappelons que depuis Aristote, l'intelligence est censée être le propre de l'Homme. Cette vision simpliste a aujourd'hui évolué, et les scientifiques accordent une forme d'intelligence aux animaux non humains. Mais à l'époque de Descartes, pareille idée n'était pas envisageable.

Un siècle plus tard, la vision de Julien Offray de La Mettrie est nettement différente. Pour ce philosophe français, l'Homme est un animal comme les autres bien que beaucoup plus compliqué. Il devient alors envisageable de reproduire chacun de ses organes et de créer un automate à l'apparence humaine ! D'autant qu'au siècle des Lumières, la maîtrise de la technique acquise par les maîtres horlogers rend les choses possibles. C'est ainsi qu'arrive dans l'histoire Jacques de Vaucanson. Après des études de mécanique, de musique, de physique et d'anatomie, ce passionné d'horlogerie a mis tous ses talents à l'épreuve pour fabriquer trois automates qui ont marqué l'histoire. Le premier, achevé en 1737, est un joueur de flûte traversière de taille humaine, capable de jouer onze airs grâce à des mouvements des lèvres et des doigts qui découpaient le souffle sortant de sa bouche. En plus de la renommée qu'il donna à son créateur, cet automate a permis de mieux comprendre les mécanismes de la respiration, puisque les dissections sur des cadavres n'offraient pas la possibilité d'étudier le corps en mouvement. Le deuxième automate était un autre joueur de flûte capable cette fois de

jouer vingt airs différents. Le troisième était le fameux canard de Vaucanson. Un canard en cuivre doré qui boit, barbote dans l'eau, avale ce qu'on lui fourre dans le bec, le digère... puis défèque une sorte de bouillie verte. Le public curieux pouvait admirer le processus de digestion de l'animal, du début à la fin. Ces premiers automates ont fait des émules et d'autres créateurs un peu fous s'en sont donné à cœur joie. C'est le cas de l'abbé Mical, un jésuite. En 1780, il présente au public parisien des «têtes parlantes» qui imitent le mouvement des lèvres et se lancent dans un dialogue fourni: un éloge du roi Louis XVI!

L'arrivée des premières machines à calculer

À côté des automates, d'autres créatures un peu moins distrayantes mais fort utiles sont construites: des calculettes. L'une des plus anciennes et des plus connues est sans doute la Pascaline, œuvre de Blaise Pascal qui a débuté sa construction en 1642, alors qu'il avait seulement 19 ans! Cet ancêtre des calculettes était capable d'effectuer les quatre opérations principales (additions, soustractions, multiplications et divisions). Gottfried Wilhelm Leibnitz s'est lui aussi lancé dans la construction d'une telle machine en 1673. Elle pouvait également exécuter les quatre opérations, mais n'aurait jamais fonctionné correctement.

L'engrenage est lancé. La construction de machines destinées à remplacer l'Homme pour le calcul se poursuit. Il faut dire que le besoin commence à se faire sentir dans les administrations et certaines entreprises qui voient la quantité de calculs augmenter avec l'industrialisation croissante. C'est ainsi qu'en 1882, Charles Babbage – dont la réputation de «savant fou» collait à la peau parce qu'il avait imaginé des inventions aussi farfelues

qu'une plume pour dessiner des pointillés ou des chaussures munies de volets articulés pour marcher sur l'eau – entreprit la réalisation de sa propre machine à calculer. Baptisée « machine à différences », son invention était bien plus perfectionnée que les précédentes puisqu'elle était capable de calculer un polynôme du second ordre avec une précision de six décimales. C'était déjà une prouesse, mais il ne s'arrêta pas en si bon chemin. Babbage réalisa plusieurs versions de sa machine à différences. La dernière devait calculer des polynômes du sixième degré avec une précision de vingt décimales. Mais il n'en finit jamais la construction. Elle était bien trop complexe : il fallait assembler 25 000 pièces ! Babbage entreprit alors la construction d'une nouvelle machine, plus puissante encore, la « machine analytique », et il lui fallut 38 ans pour en dessiner les plans. Pour ce travail titanesque, il a bénéficié de l'aide de la première femme de l'histoire de l'informatique, Ada Lovelace. Cette jeune bourgeoise férue de mathématiques lui a prêté main-forte pour l'écriture des programmes. Ses discussions avec Babbage l'ont conduite à publier le premier article scientifique portant sur la programmation d'un ordinateur. Dans cet article, Ada Lovelace en a profité pour livrer ses réflexions sur la machine qui, selon elle, *« n'a nullement prétention de créer quelque chose par elle-même. Elle peut exécuter tout ce que nous saurons lui ordonner d'exécuter. Elle peut suivre une analyse ; mais elle n'a pas la faculté d'imaginer des relations analytiques ou des vérités. Son rôle est de nous aider à effectuer ce que nous avons déjà dominé. »* Point barre ! Babbage meurt en 1871 alors qu'il avait à peine commencé son montage. C'est son plus jeune fils, Henry Babbage, qui entreprit d'achever la construction. L'œuvre est aujourd'hui exposée au musée des Sciences de Londres.

Dès les années 1880, l'arrivée de l'électricité donne un coup de fouet à toutes ces machines. Pionnier de l'électricité,

l'ingénieur Thomas Edison a d'ailleurs électrifié la machine à écrire de sa secrétaire. À cette époque, les machines à calculer subissent le même sort et gagnent en fiabilité et en rapidité. En 1889, un jeune ingénieur, Herman Hollerith, remporte un concours organisé par le bureau de recensement aux États-Unis pour le développement de machines mécanographiques fonctionnant grâce à un système de cartes perforées permettant de compter de manière automatique. Le succès de ce type de machines, qui furent utilisées longtemps dans les entreprises pour la comptabilité, a permis à l'ingénieur de fonder sa propre affaire: la *Tabulating Machines Corporations*, qui devint en 1924 l'*International Business Machines*, plus connue depuis par son acronyme IBM.

L'automatisation des calculs et l'arrivée des machines dans le quotidien de la population marquent les esprits, titillent l'imaginaire et éveillent les peurs. En 1921, une pièce intitulée *R.U.R.*, pour *Rossum's Universals de Robots*, est jouée pour la première fois dans le théâtre de Prague en 1921 puis à New York en 1923. Elle est l'œuvre de l'écrivain tchèque Karel Capek qui invente pour l'occasion le mot «robot», dérivé du mot tchèque *robota* qui désigne le travail forcé. L'histoire se déroule sur une île, dans un atelier qui crée des machines à l'apparence humaine, les fameux robots que l'on appellerait aujourd'hui «androïdes». Ces robots sont construits par milliers et vendus dans le monde entier pour remplacer les humains dans diverses tâches. Naît alors le fantasme de les voir dépasser l'Homme et se révolter jusqu'à éliminer l'espèce humaine! Un classique des romans de science-fiction depuis lors. Quelques années plus tard, en 1942, l'auteur de science-fiction Isaac Asimov introduit les trois lois de la robotique devenues célèbres :

1. Un robot ne peut porter atteinte à un être humain.

2. Un robot doit obéir à un humain, tant que cela ne contredit pas la loi précédente.

3. Un robot doit protéger son existence tant que cela ne contredit pas les deux lois précédentes.

Censées contenir les débordements de cette discipline un peu trop rebelle, les lois de la robotique ne sont pas à l'abri de se contredire...

Turing construit le premier ordinateur

En 1919, un brevet de machine à chiffrer déposé par l'ingénieur hollandais Hugo Alexander Koch est exploité par une société basée à Berlin pour fabriquer la fameuse machine *Enigma*. Plus de 100 000 machines de ce type furent construites et utilisées par toutes les armées allemandes pour chiffrer et déchiffrer les messages. Pour les intercepter, et en connaître le contenu, le camp adverse devait trouver la clé capable de déchiffrer ces communications secrètes. L'histoire est bien connue. Le mathématicien britannique Alan Turing rejoint en 1939 le quartier général des services de renseignement britannique, à Bletchley Park près d'Oxford, pour prêter main-forte à la horde de mathématiciens enrôlés dans cette mission. Avec ses collègues, ils « craquent » le code en 1942, contribuant ainsi à éviter l'invasion de l'Angleterre.

Après cette prouesse et la fin de la guerre, Turing se consacre à la réalisation d'une autre machine encore, celle qu'il avait imaginée avant la guerre. Dans un article publié en 1936, il avait en effet expliqué que ce qui est calculable peut être décomposé en un nombre fini d'étapes à la portée d'une machine. Il ne restait plus qu'à la fabriquer. Travail qu'il achève en 1950. Turing vient ainsi de construire le premier ordinateur! Ce

n'était pas encore suffisant pour ce mathématicien de génie qui travailla ensuite à la possibilité de doter ce type de machine d'une intelligence. Nous y voilà ! La même année, il publie son célèbre article « L'ordinateur et l'intelligence » dans la revue philosophique *Mind*, dans lequel il propose le fameux jeu de l'imitation, aussi appelé « test de Turing », censé permettre de dire si une machine est intelligente ou pas. L'idée est simple : on demande à un juge de dialoguer, par l'intermédiaire de textes dactylographiés, à la fois avec un humain et avec le système informatique que l'on teste. Pour réussir, ce dernier doit leurrer le juge en répondant à ses questions de manière aussi convaincante que l'humain. Un brin optimiste, Turing pensait que l'on serait en mesure de dialoguer avec de telles machines à la fin du ^{xx}e siècle. Las ! Aucune machine n'y est encore parvenue. Pourtant, de grandes têtes chercheuses ont sué sang et eau pour tenter de construire les machines de Turing, à commencer par John Von Neumann. Ce célèbre mathématicien et physicien a participé à la construction de l'ENIAC (*Electronical Numerical Integrator and Computer*), machine achevée en 1945 qui fut présentée comme le « cerveau électronique » le plus performant de tous les temps. Il faut dire que la bête en imposait : elle occupait 72 m² de surface au sol, pesait 30 tonnes et était constituée d'un enchevêtrement complexe de milliers de composants connectés les uns aux autres ! Une complexité qui n'était pas sans évoquer celle du cerveau.

*Où l'on commence à espérer
imiter le fonctionnement du cerveau humain*

L'informatique n'est pas la seule discipline à être née lors de la Seconde Guerre mondiale. Il y eut aussi la « cybernétique »,

la science des interactions entre systèmes complexes (machines ou êtres vivants). L'étude des dispositifs construits à des fins militaires, et surtout des mécanismes de commande qui permettaient d'en réguler le fonctionnement selon des paramètres donnés (comme la température ou la pression), a conduit des mathématiciens, des électroniciens et des mécaniciens à travailler ensemble. Repérant certains parallèles entre ces dispositifs et les mécanismes de régulation employés par le corps humain, des neurophysiologistes et des psychologues se sont invités dans la bande, qui est alors devenue celle des cybernéticiens et dont le mathématicien américain Norbert Wiener était le leader. L'ambition de la cybernétique est d'établir des ponts entre ces différentes disciplines afin d'expliquer le fonctionnement de tout système, qu'il soit vivant ou artificiel.

Ce mélange des savoirs a permis de poser les bases de l'intelligence artificielle. Les biologistes commencent en effet à comprendre le fonctionnement de la cellule nerveuse – le neurone – ce qui inspire les informaticiens pour la fabrication de nouveaux composants. De plus, les découvertes sur la façon dont ces cellules sont reliées les unes aux autres ont rapidement conduit ces mêmes informaticiens à penser qu'en reproduisant cet agencement, il serait possible de fabriquer des machines imitant le fonctionnement du cerveau humain. C'est ainsi que le logicien et chercheur en neurologie Warren McCulloch et le mathématicien et psychologue Walter Pitts proposèrent en 1943 le tout premier modèle mathématique d'un neurone biologique, le neurone formel. Ces deux hommes ont dès lors ouvert une première voie vers l'intelligence artificielle, que l'on peut qualifier de « connexionniste » puisque, pour arriver à l'IA, l'idée est de reproduire l'architecture du cerveau humain, et donc les connexions entre les neurones.

1956 marque un tournant important dans l'histoire de l'intelligence artificielle. Cette année-là, le mathématicien Allen Newell et l'économiste Herbert Simon (qui devint plus tard prix Nobel d'économie), avec l'aide du programmeur Cliff Shaw, développent le tout premier programme d'ordinateur capable de démontrer quelque chose et de raisonner! Son nom: le *Logic Theorist*, ou logicien théorique en français. Sa prouesse: démontrer 38 des 52 premiers théorèmes du deuxième chapitre des *Principia mathematica* (1910), l'œuvre des mathématiciens Alfred N. Russel et Bertrand Whitehead qui ont tenté d'appuyer toutes les mathématiques sur des bases logiques. Newell et Simon ouvrent ainsi une seconde voie vers l'IA que l'on pourrait qualifier de «cognitiviste». Leur intuition est que la cognition peut se résumer au traitement de représentations symboliques. Il suffit donc de créer des programmes qui fonctionnent à l'aide d'un langage de programmation.

Durant cette année 1956 se produit un second événement capital pour l'IA. En juillet et août, sur le campus américain du Dartmouth College, université privée située dans la ville de Hanover (État du New Hampshire), se tient un grand raout. Une université d'été qui rassemble des cybernéticiens, des logiciens, des ingénieurs, des psychologues et des économistes. Parmi eux, on retrouve Norbert Wiener, Allen Newel et Herbert Simon, ainsi que Claude Shannon, notamment célèbre pour avoir élaboré la «théorie de l'information», qui permettra entre autres le codage de l'information. Que des têtes brillantes réunies pour une chose: discuter de la possibilité de créer des machines pensantes! Leur ambition est de réussir à simuler la prise de décisions sur un ordinateur, et pourquoi pas de le doter des capacités d'apprentissage et même de créativité. C'est à cette occasion que le jeune mathématicien John Mc Carthy (qui a organisé ce rassemblement avec son copain Marvin

Minsky) invente le terme d'« intelligence artificielle » pour désigner la nouvelle discipline qu'ils sont sur le point de créer. On peut ainsi dire que 1956 est l'année de naissance de l'IA!

L'enthousiasme que suscite alors l'IA est tel qu'il pousse certains scientifiques à formuler des déclarations plus qu'ambitieuses... Herbert Simon et son acolyte Alan Newell annoncèrent en 1957 que, dix ans plus tard, un ordinateur battrait sans aucun doute le champion du monde d'échecs. Simon allait même plus loin, affirmant qu'un ordinateur pourrait un jour simuler le psychisme et que toutes les théories psychologiques pourraient prendre la forme de programmes informatiques. Il est vrai que l'ébullition qui suivit la naissance de l'IA permit rapidement de remporter quelques succès. Dans le camp des connexionnistes, le psychologue américain Frank Rosenblatt présente en 1958 le « perceptron », un modèle informatique du neurone. Plusieurs perceptrons pouvaient être assemblés en réseau pour imiter celui des neurones. S'inspirant de ce modèle, différentes machines en réseau voient le jour et de nombreuses études leur sont consacrées. Dans le camp des cognitivistes, les travaux autour du *Logic Theorist* – qui avait d'ailleurs été présenté sur le campus de Dartmouth College – se poursuivent. Ils mènent à l'écriture de nouveaux langages de programmation dont le plus répandu est alors le LISP (de l'anglais *List processing*, qui signifie « trieur de listes »), développé par John McCarthy à partir de 1960.

Hélas, dix ans après les prédictions de Simon et Newell, le champion du monde d'échecs est encore un humain et on est bien loin de pouvoir réduire les théories psychologiques à des programmes! Résultat: c'est la dégringolade. L'enthousiasme retombe comme un soufflet et la recherche en IA perd ses financements.

Les « systèmes experts » entrent en scène

Ce recul de l'intérêt pour l'IA n'empêche pas certains chercheurs de continuer de travailler dans les années 1970 au développement de programmes capables de simuler le raisonnement d'un spécialiste, comme un médecin, un chimiste ou un ingénieur en aéronautique. On appelle ces programmes des systèmes experts. Leur élaboration nécessite de construire une base de connaissances constituées de faits et de règles du type « si la proposition 1 est vraie alors... » pour simuler le raisonnement du spécialiste. Le système expert *Mycin*, réalisé à l'université de Stanford, était par exemple capable d'analyser la structure chimique de matériaux ou de diagnostiquer des maladies infectieuses. Pour ce faire, il commençait par envisager le diagnostic d'une maladie donnée, puis s'assurait que les règles pour arriver à cette conclusion étaient vérifiées. Une fois la maladie identifiée, il communiquait ses recommandations au médecin. *Mycin* était plutôt doué puisqu'il était capable de donner un diagnostic comparable à celui des médecins spécialistes dans 72 % des cas !

Durant cette même décennie, les premiers ordinateurs personnels, ou *Personal Computer* (PC) en anglais, se préparent à débarquer sous nos toits. Avec Bob Noyce, l'un des inventeurs des circuits intégrés, un certain Gordon Moore – célèbre pour sa fameuse loi qui dit que le nombre de transistors sur un circuit de taille constante double chaque année (chiffre qu'il porta ensuite à 18 mois) – fonde la société Intel. Celle-ci crée en 1971 le premier microprocesseur, l'Intel 4004, qui tenait entre les doigts d'une main (il s'agissait d'une puce de 3 mm sur 4 mm). Malgré son gabarit minuscule, cette technologie était bien plus puissante que l'ENIAC ! En 1976, Steve Jobs et Steve Wozniak l'intègrent à leur premier ordinateur en

kit: l'Apple I. Le premier d'une grande famille! Et en 1981, IBM annonce son premier PC, équipé de microprocesseurs.

En parallèle, les systèmes experts sont en plein essor. On cherche à en développer de nouveaux et à les installer dans tous les secteurs possibles de l'économie. Sauf que cet engouement se heurte de nouveau à un problème technique: la faible capacité des ordinateurs. Les grands laboratoires d'informatique se lancent alors dans la course à la construction de machines plus puissantes dédiées à la réalisation de systèmes experts. L'intérêt pour l'IA se renforce car ces systèmes semblent offrir la possibilité de reproduire les raisonnements humains, et ainsi de peut-être accéder à la conscience... On voit poindre les premières idées transhumanistes.

Bien sûr, tout le monde ne partage pas cette vision. Certains philosophes s'y opposent et s'attaquent au passage au jeu d'imitation de Turing. Parmi eux, un certain John Searle. Pour lui, les ordinateurs, aussi complexes soient-ils, ne pourront que manipuler des expressions syntaxiques, mais jamais leur donner du sens. Pour illustrer ses critiques, il imagine une expérience de pensée, celle de la chambre chinoise. Le principe est simple: on enferme un expérimentateur dans une pièce avec des symboles chinois et un livre expliquant comment manipuler ces symboles. Selon Pearl, grâce au livre, et surtout à la bonne volonté de l'expérimentateur, ce dernier sera capable de manipuler les symboles à sa disposition et de donner l'impression qu'il parle le chinois. Même s'il ne comprend pas un mot de ce qu'il dit! Le philosophe veut ainsi souligner la différence entre imiter les comportements linguistiques d'une personne et être capable de donner du sens à ce que l'on énonce. Un ordinateur pourrait très bien réussir le test de Turing sans avoir donné du sens à la conversation qu'il a tenu. Or ne pas pouvoir donner du sens revient à ne pas pouvoir accéder à la pensée.

Ces critiques aboutirent à la distinction entre deux formes d'IA, distinction encore utilisée aujourd'hui :

- « l'IA faible », qui se limite à copier ou imiter les comportements humains ;
- « l'IA forte », qui est une véritable machine intelligente, douée de conscience.

Des robots et des « ordi » toujours plus forts

À partir de la fin des années quatre-vingt-dix, on couple l'IA à la robotique. La robotique est alors en plein boum. Des compétitions de robots sont organisées. Une des premières en France est la coupe $E = M6$, du nom de l'émission de télévision de vulgarisation scientifique qui sponsorisait la compétition. Les Japonais, eux, préfèrent organiser des combats de robots-sumos. Quant aux Américains, ils se régalaient avec les *battlebots*, robots armés combattant dans les arènes ! Et c'est à la fin de cette décennie que l'IA remporte une première victoire éclatante. En 1997, *Deep Blue*, le supercalculateur d'IBM, bat le champion mondial des jeux d'échecs, le Russe Gary Kasparov. Vingt ans plus tard, c'est au tour du champion du monde au jeu de go de se faire détrôner par une machine. Le 15 mars 2016, le Sud-Coréen Lee Sedol est battu par *AlphaGo*, un programme développé par Google. Entre les deux événements, il y a eu le morpion, le Puissance 4 et les Dames anglaises. Mais le jeu de go est de loin le plus ardu. Pour donner un ordre d'idées, au jeu des échecs, une partie se joue en 40 coups, ce qui donne 10^{180} parties possibles (10 suivi de 180 zéros !). Au jeu de go, les parties durent 200 coups et le nombre de parties possibles monte à perpète ! C'est du *Gogolplex* (mot inventé par un enfant de 9 ans – le neveu du mathématicien américain

Edward Kasne – pour traduire un très grand nombre). Pour réaliser ce tour de force, *AlphaGo* a effectué ce que l'on appelle de l'« apprentissage machine ». Les transhumanistes voient là le support technique à leurs idées. La machine serait capable d'apprendre, comme l'être humain !

Des machines capables d'apprendre

Il est donc temps d'en venir à « l'apprentissage machine », un domaine qui fait beaucoup parler de lui aujourd'hui. Et ce n'est pas étonnant. En effet, un programme n'est jamais qu'une suite banale d'instructions figées que la machine exécute sagement. Pour répondre à une requête, plusieurs méthodes sont possibles : la recherche par arborescence, par exemple, qui permet de battre à plate couture un joueur d'échecs, ou bien la déduction logique, utilisée par les systèmes experts pour trouver une maladie à partir des symptômes. C'est déjà très pratique, mais l'approche est en réalité limitée. Car il est impossible d'écrire à la main toutes les suites d'instructions nécessaires à une machine pour qu'elle soit capable de reconnaître votre visage sur une photo de famille. Les données contenues dans une image sont bien trop nombreuses ! Même chose pour la traduction d'une langue étrangère. Programmer un logiciel de traduction automatique plus performant que *Google Translate* et ses prouesses plus que mitigées – faites le test en lui soumettant successivement une phrase du français vers l'anglais, puis vers l'espagnol, puis vers le chinois et retour au français – relèverait du casse-tête inouï ! Plusieurs mots ou expressions peuvent en effet désigner une même notion. Il est inenvisageable de transformer des millions de phrases en lignes informatiques, pas plus que d'alimenter une machine avec toutes les règles qu'un algorithme

devrait appliquer pour résoudre ce type de tâche, ou encore d'énumérer tous les cas auxquels il pourrait être confronté. Un algorithme est un nombre donné d'opérations qui, si elles sont bien exécutées par l'ordinateur, conduit à un résultat donné (un peu comme une recette de cuisine où il n'y aurait pas de place à l'improvisation). Voilà pourquoi les chercheurs ont eu l'idée de doter les machines de la capacité d'apprendre, comme des grandes, de leur propre expérience. C'est l'«apprentissage machine», ou *machine learning* en anglais.

Bien sûr, il n'existe pas une seule méthode d'apprentissage machine, ce serait trop simple, mais plusieurs. L'apprentissage «non supervisé» et l'apprentissage «supervisé», par exemple, sont des apprentissages machines. L'apprentissage non supervisé classe les données dans des groupes hétérogènes et n'a pas besoin de l'intervention d'un être humain, contrairement à l'apprentissage supervisé. Ce dernier est utilisé pour comprendre et explorer les données. Parmi les méthodes d'apprentissage supervisé, l'«apprentissage profond», ou *deep learning*, est aujourd'hui la plus en vogue. Dans ce cas, l'architecture interne de la machine fonctionne par couches, d'où le nom de profond. C'est justement cette méthode auquel recourt l'algorithme de Facebook pour reconnaître votre visage sur une photo de famille ou bien pour tenter de cerner les informations qui vous intéresseront le plus parmi celles de vos «amis». Initié à la fin des années 1980, le *deep learning* est d'abord resté confidentiel, utilisé seulement dans quelques laboratoires de recherche fondamentale. C'est dans celui de Yann LeCun, à l'AT&T Bell Laboratories dans le New Jersey, que l'aventure commence. À l'époque, le chercheur élabore ce que l'on appelle des «réseaux de neurones formels», autrement dit des ensembles d'algorithmes, dont l'un d'eux permet à son équipe de concevoir un système automatique de lecture de chèques.

ÇA VA PAS LA TÊTE!

Une trouvaille qui se déploie rapidement. À la fin des années 1990, ce système lisait ainsi 10 à 20 % de tous les chèques émis aux États-Unis. On le trouvait même en France, dans les distributeurs de billets du Crédit Mutuel de Bretagne, c'est dire!

Comme d'habitude, les réalisations de ce nouvel outil de l'IA restent en deçà de ses promesses. La technologie a – encore – un train de retard. Et pour cause: dans les années 2000, la puissance de calcul des ordinateurs est trop faible pour exploiter le gigantesque volume de données nécessaire à l'amélioration des performances d'apprentissage des machines. La situation se débloque au tournant des années 2010 avec l'essor des cartes graphiques, les *Graphical Processing Units* (GPU), initialement conçues pour le plaisir des adeptes de jeux vidéo. Ces petits processeurs, de plus en plus puissants, deviennent capables d'exécuter mille milliards d'opérations par seconde! Et leur prix baisse: on en trouve désormais pour moins de 1 000 euros. Dans le même temps, les bases de données gagnent en volume. On dispose donc de plus de puissance et plus de données, les conditions idéales! C'est ainsi qu'en 2012, lors de la compétition annuelle de reconnaissance d'images *ImageNet*, le *deep learning* s'impose en maître. Le système de l'équipe de Geoffrey Hinton, professeur à l'université canadienne de Toronto – alors la seule à utiliser le *deep learning* – parvient à identifier des images piochées dans une banque de données avec 15 % d'erreurs seulement! Le meilleur système concurrent affiche alors un taux d'erreur de 26 %.

La victoire est éclatante et provoque une onde de choc. Du jour au lendemain, la majorité des équipes de recherche en reconnaissance d'images et de paroles laissent tomber

leurs modèles d'IA pour adopter le *deep learning*. Les géants Google, Amazon et Facebook ne ratent pas le coche et investissent en masse dans des équipes de recherche et développement en *deep learning*. D'ailleurs, depuis son succès lors de la compétition *ImageNet*, Geoffrey Hinton a été débauché par Google qui l'a intégré à son groupe de recherche *Google Brain*. « *Je n'ai jamais vu une révolution aussi rapide*, commente le chercheur Yann LeCun dans les colonnes du *Monde* en juillet 2015. *On est passé d'un système un peu obscur à un système utilisé par des millions de personnes en seulement deux ans.* »

Avec le *deep learning*, l'IA reprend donc du poil de la bête. Dotées de la capacité à apprendre, les machines deviennent aptes à reconnaître des objets sur des images ou des vidéos, à reconnaître des voix, à analyser nos textes, nos discours, à traduire les langues... Les résultats ne se font pas attendre. En 2014, Facebook présente *DeepFace*, un programme capable d'identifier automatiquement un individu sur deux photos différentes avec un taux de réussite de 97,35 %, soit quasiment aussi bien qu'une personne en chair et en os qui effectue le même exercice (taux de réussite moyen de 97,53 %)! Le même Facebook est déjà en mesure de traduire les informations de vos amis dans une langue étrangère. Quant au nouveau système de traduction de Google, le *Neural Machine Translation*, il parvient à traduire des phrases entre l'anglais et le chinois avec une précision à faire rougir *Google Translate*. L'un des objectifs à terme serait de nous permettre de tenir directement une conversation avec notre ordinateur. De lui demander « *mes amis ont-ils apprécié le café philo de notre association samedi dernier?* », par exemple. Il lui suffirait alors d'analyser le contenu des messages postés par ces mêmes amis sur un réseau social pour apporter une réponse probablement fiable. Bien sûr, avant de passer du rêve à la réalité, il faudra

permettre à ces machines de comprendre le second degré et l'ironie. Sinon, elles risquent de vous raconter des sornettes!

S'entraîner pour apprendre

Mais plutôt que de s'égarer dans l'exploration des nombreuses possibilités offertes par le *deep learning*, venons-en au dur: comment ça marche? Nous l'avons vu plus haut, la méthode repose sur un réseau de neurones artificiels, encore appelés neurones formels. Un neurone artificiel, c'est en fait une fonction mathématique capable d'effectuer des opérations simples: des additions ou des multiplications. Comme pour un neurone biologique, chaque neurone artificiel comporte plusieurs entrées et une sortie par lesquelles l'information transite. Au sein d'un réseau, des millions de neurones artificiels sont agencés en couches, et ces couches sont empilées les unes sur les autres. Pas au hasard: les sorties des neurones des couches précédentes sont reliées aux entrées des couches suivantes.

Pour rendre ce réseau opérationnel, il faut passer par une première étape: l'entraînement. Si l'objectif est de lui apprendre à distinguer une théière d'une cafetière sur une photo, on lui présente d'abord des millions d'images de théières, étiquetées comme appartenant à la catégorie «théière», et des millions d'images de cafetières, étiquetées comme appartenant à la catégorie «cafetière». Les données qui transitent vers les entrées de la première couche de neurones artificiels sont celles de la couleur ou des niveaux de gris des différents pixels qui composent ces images. À ces neurones de se débrouiller pour détecter des similitudes: des contours orientés dans la même direction, par exemple, comme celle qui dessine le bec de la théière. Cette information est alors transmise aux neurones

de la seconde couche qui la combine à d'autres similitudes obtenues pour en tirer des motifs plus généraux. Autrement dit, des bouts de théière commencent à se former ! Le bec et le couvercle, par exemple. Avec ces données, les neurones de la couche suivante deviennent alors capables d'identifier la théière, et lui accolent l'étiquette « théière ».

Certes, la machine est capable d'étiqueter des images, mais comment peut-elle « apprendre » ? Grâce à des boutons à molettes ! Le réseau de neurones est équipé d'une flopée de ces boutons, que l'on appelle de façon plus sérieuse des « poids synaptiques » (en référence aux contacts entre les neurones du cerveau, nommés synapses), aux jonctions entre les différentes couches. Sans entrer dans les détails, on peut dire que lorsqu'on lui présente une base de données, le réseau tourne tous les boutons jusqu'à ce qu'il fasse correctement le lien entre les entrées (les pixels des images de théières) et l'étiquette « théière ». Et voilà comment une machine apprend le concept de théière ! C'est celle-là même qui sera capable de battre le champion mondial du jeu de go !

L'intelligence artificielle a envahi notre quotidien

Après avoir lu et compris ce qui précède, une conclusion s'impose : l'intelligence artificielle, c'est « le fourre-tout » ! S'il suffit de prendre une puce électronique et de programmer quelques algorithmes... alors oui, on peut dire que l'intelligence artificielle est partout. Elle est sortie des universités et des labos pour devenir un produit comme les autres, acheté à une poignée de firmes géantes qui ont accumulé des trillions de données pour effectuer de l'apprentissage artificiel, et il est maintenant utilisé à toutes les sauces et pour tout faire.

Il n'est pas question d'être exhaustif ici, mais citons quelques exemples qui illustrent la place prise par l'intelligence artificielle dans notre quotidien.

- *Internet et les moteurs de recherche.* Avec l'avènement d'Internet, la très grande majorité de nos moindres demandes, questions, interrogations est traitée par l'IA à travers les moteurs de recherche des différents sites web. Google se taille la part du lion. Avec plus de 500 milliards de dollars, le géant est, dans le domaine, l'une des deux plus grandes entreprises capitalistiques au monde (l'autre étant Apple). Difficile d'y échapper tant il est partout. En un clic, Google trouve le meilleur restaurant du coin et l'itinéraire le plus court pour s'y rendre en tenant compte de la circulation pour vous éviter de poireauter dans les bouchons! Il récolte aussi votre courrier, grâce à l'interface gmail, et livre en continu les toutes dernières actualités du monde avec *Google news*.

Et ce n'est un secret pour personne: en collectant des *cookies*, sortes de petits fichiers mouchards qui permettent de retracer l'historique de vos recherches sur la toile, Google se fait une idée de vos habitudes et de ce que vous aimez. Ce qui lui permet de faire apparaître sur votre écran des publicités susceptibles de vous tenter. C'est ainsi qu'après avoir comparé des appareils photo sur un site de vente en ligne, un bandeau de pub pour l'un d'eux s'incruste dans les pages Internet que vous consultez ensuite. Pour cette trouvaille, on peut dire bravo à Criteo, une des rares licornes française (on nomme ainsi une jeune entreprise dont la valeur dépasse un milliard de dollars) qui est à l'origine de la publicité ciblée. Certes, il existe des moteurs de recherche alternatifs sérieux, comme DuckDuckGo ou Yippy, ou le premier moteur de recherche européen Qwant, qui ne pompent pas systématiquement votre adresse IP, l'identité de votre ordinateur, et

respectent votre vie privée. Mais qui utilise ces autres moteurs de recherche? Vous? Félicitations!

- *Les jeux.* Qui de nos jours sait résister aux jeux vidéo? À moins d'avoir un certain âge, pas grand monde. C'est un domaine où l'IA s'est popularisée et développée très rapidement. L'intelligence artificielle du jeu Event(O), par exemple, sorti en 2016, fait un carton. On peut lire dans une publicité: « *Vous êtes le seul humain restant dans un vaisseau spatial abandonné dans les confins de l'espace. Mais vous n'êtes pas si seul. Kaizen, l'intelligence artificielle du vaisseau est là elle aussi. Vous pourrez communiquer avec elle en tapant des commandes sur les consoles du vaisseau. Kaizen possède des millions de lignes de codes et pourra interagir, raisonner et discuter avec vous. Si vous percez l'âme de cette petite IA, peut-être parviendrez-vous à rentrer sur terre, qui sait?* » Cela ne vous tente pas?

Et que dire de Pokémon Go? Un véritable tsunami de l'été 2016. En moins de deux semaines, ce jeu vidéo sur smartphone a pris la tête des classements des applications les plus téléchargées et les plus rentables. Même la Bourse s'est enflammée! L'action Nintendo (maison mère du célèbre jeu Mario) a doublé en une semaine. Certaines universités anglo-saxonnes ont même mis en place des cours utilisant ce jeu. L'université d'Idaho, aux États-Unis, propose ainsi un module « Jeux de la pop-culture » qui permet aux étudiants d'amasser des points (les « credits units » du monde anglo-saxon) bien réels en capturant ces monstres virtuels...

- *La reconnaissance visuelle.* Nous avons vu précédemment qu'une des réalisations spectaculaires du *deep learning* a été de rendre une machine capable, par elle-même, d'appréhender des concepts de haut niveau tels que les visages, les corps humains, en épluchant des millions d'images. Facebook possède la plus grande galerie de photos du monde et, grâce

à son programme *DeepFace*, il a la possibilité de faire correspondre tous les visages et lieux qui s'y trouvent. Le système est vraiment très puissant et impressionnant. Les réseaux sociaux vous proposent régulièrement des « amis » que vous pourriez connaître. Et effectivement, très souvent vous les connaissez ! D'ailleurs, il peut être bien plus performant que vous. Ne vous est-il jamais arrivé de croiser quelqu'un dans la rue et de vous faire la réflexion : « *Mais je le connais ! Qui est-ce déjà ?* » Facebook, lui, sait. Son ambition va d'ailleurs bien au-delà puisqu'il projette de déchiffrer l'humeur de l'utilisateur et le contexte de son message ! Songer à toutes les photographies accumulées par Facebook, mais aussi par Google+, iPhoto *via* Apple... donne le vertige et pose quelques problèmes éthiques.

Ces photos peuvent également être utilisées dans d'autres domaines : identification d'une personne lors du contrôle des passeports aux frontières, empreintes, identification d'individus dans le cas de recherches policières...

- *Et bien d'autres applications...* On pourrait bien sûr multiplier les exemples : la reconnaissance vocale par exemple, dont l'exemple type est Siri, le fameux assistant d'Apple. Comment ça fonctionne ? C'est simple. Votre demande est envoyée sous forme de requête au serveur d'Apple. Si votre demande a été programmée, vous aurez la réponse programmée par Apple. Si elle n'a pas été programmée (eh oui !, toutes les demandes ne le sont pas), le serveur vous dira qu'il n'a pas compris votre demande. Le système n'est pas tout à fait au point, ce qui amène parfois à des situations cocasses ! Le taux d'erreur est particulièrement élevé s'il y a du bruit ambiant (la rue, la voiture), même si certaines techniques d'élimination des bruits parasites commencent à exister. Reste que Siri n'est pas encore assez intelligent pour réfléchir. Normal, il a une « intelligence artificielle faible » ! Les grands laboratoires comme ceux de Facebook

travaillent pourtant d'arrache-pied pour perfectionner ce type d'assistants et peut-être un jour leur permettre de se lancer dans des dialogues aussi riches que celui de Joachin Phoenix et son système d'exploitation dans le film *Her* évoqué plus haut. Mais, de l'aveu même de Yann LeCun, il manque encore des éléments de base, autrement dit des concepts comme le sens commun et les modèles mathématiques permettant de les simuler, pour que les échanges avec ces assistants ne soient pas tout simplement frustrants. Les transhumanistes devront attendre encore un peu.

La dictée vocale à un ordinateur, grâce au célèbre *Dragon Dictate* par exemple, le serveur vocal interactif, les chatbots, ces robots de conversations virtuelles, le correcteur orthographique... sont d'autres exemples de l'introduction de l'IA dans notre quotidien.

La liste des applications de l'intelligence artificielle dans notre vie de tous les jours semble sans fin : billets d'avion et de train sur votre smartphone, réglage de la température dans chacune de vos pièces à une heure donnée et pour une durée déterminée, pilotage de pratiquement tous vos appareils électroménagers... à condition qu'ils soient équipés d'une puce connectée. Enfin, tout ce qui touche à l'automatisme requiert également de l'intelligence artificielle : les drones, les robots industriels, certains robots ménagers... La gamme d'applications est considérable et c'est un domaine en grand devenir.

L'arrivée des agents et réseaux intelligents

Enfin, un des derniers développements à la pointe de l'IA concerne le développement de ce qui a été appelé des « agents intelligents » et des « réseaux intelligents » : un agent intelligent est un logiciel qui recueille de l'information à partir de capteurs

et les utilise pour déclencher une action afin d'optimiser ses chances de succès. Généralement, un agent intelligent réagit en fonction de l'environnement et en temps réel. La plupart du temps, des systèmes dénommés systèmes multi-agents intègrent des agents intelligents autonomes qui collaborent entre eux et sont assemblés à dessein pour résoudre des problèmes bien spécifiques. Il existe plusieurs types d'agents intelligents suivant leur niveau d'autonomie et leur mode de prise de décision; on peut utiliser un agent pour reconnaître une parole ou une image et l'associer à un autre agent qui va utiliser le texte ou l'image créée, puis un autre agent va appliquer un processus de reconnaissance sémantique, un autre traiter la question en fouillant dans une base de données, un dernier enfin va formuler une réponse envoyée à l'utilisateur. Un exemple bien connu de l'application des réseaux d'agents est le système de traduction automatique: il analyse la parole avec un premier agent, réalise la traduction avec un deuxième, puis utilise un troisième agent pour la transformer de manière audible (*text to speech*). Les réseaux d'agents sont aussi beaucoup utilisés dans les robots autonomes qui gèrent différents niveaux d'abstraction avec des capteurs, de la mécanique pour se mouvoir, des batteries pour l'autonomie, et éventuellement interagir avec des humains.

Une autre manifestation spectaculaire des progrès de l'IA est le programme d'IBM appelé *IBM Watson*. Au départ, il s'agissait d'un projet de recherche baptisé *Blue Jay*, focalisé sur l'exploitation de très gros volumes de données. Il a d'abord été présenté comme un ordinateur, mais c'est devenu ensuite une plate-forme logicielle destinée aux développeurs sur le cloud (nuage en français, il s'agit d'un ensemble de serveurs informatiques raccordés en réseaux et accessibles n'importe où dans le monde). *Watson* est aussi un formidable médecin qui pourrait faire pâlir de jalousie Dr House! Ses prouesses s'appliquent

essentiellement au cancer, avec le *Watson for Oncology* qui analyse les dossiers de patients atteints d'une tumeur cancéreuse pour aider au diagnostic et trouver le meilleur traitement, notamment en séquençant l'ADN des tumeurs. Une autre application est *GenieMD* qui permet aux patients des États-Unis de faire un premier niveau d'autodiagnostic des problèmes de santé courants, avant d'être mis en relation avec des praticiens.

Un aimant à start-up

Le développement spectaculaire de l'intelligence artificielle est attesté par le nombre très important de start-up créées qui exploitent différentes techniques. En 2016, le *machine learning* et le *deep learning* étaient utilisés par près de sept cents start-up, les agents conversationnels (ou chatbot) dans une centaine de start-up, les agents intelligents dans près de quarante... Enfin il existe un marché important dans les start-up gérant les solutions de perception telles que le traitement du langage, la vision artificielle, la reconnaissance de vidéo, le contrôle gestuel... Le financement des start-up dans ce secteur est d'ailleurs en forte hausse.

La France n'est pas absente de la recherche sur l'intelligence artificielle : celle-ci est disséminée dans plusieurs laboratoires, dans des projets collaboratifs universitaires et dans des organismes de recherche : les plus importants dans ce domaine sont l'Institut national de recherche en informatique et en automatique (Inria) et le Centre national de recherche scientifique (CNRS) qui ont donné naissance à quelques start-up.

Il y a même des start-up qui essayent de « bidouiller » le cerveau. Dans ce domaine, les deux plus grandes sont celles d'Elon Musk (*Neuralink*) et de Mary Lou Jepsen (*OpnWatr*)

aux États-Unis. Leurs objectifs sont d'«écrire» directement dans le cerveau ou de relier ce dernier à une intelligence artificielle, voire de l'émuler dans une machine. Ce sont leurs annonces et leurs ambitions qui alimentent les espoirs et les désirs les plus fous des transhumanistes. Nous analyserons de manière critique leurs projets dans les chapitres 4 et 5, car il faut tout de même avoir au préalable une petite idée des fantastiques propriétés du vrai cerveau, le nôtre (auxquelles nous nous intéresserons dans le chapitre suivant).

Les effets pervers de l'intelligence artificielle

Puissante, performante, en plein essor, certes. Mais l'intelligence artificielle présente aussi quelques inconvénients et non des moindres. Les plus anodins sont les fameux spams par exemple : chacun de nous a été confronté à ces centaines de courriers indésirables qui arrivent sur sa boîte mail. Facebook et l'ensemble des réseaux sociaux recèlent aussi des dangers. Il existe une pléthore d'associations et de structures officielles qui tentent d'informer les utilisateurs et de prévenir les risques. L'utilisation sans précaution, en particulier par les jeunes, peut avoir des conséquences dramatiques. On peut citer :

- La « cyber-intimidation » ou « cyber-harcèlement » : menaces, insultes, envoi de photos obscènes ou choquantes, rumeurs, tags sur des photos peu glorieuses. Un enfant, par exemple, peut créer un groupe spécifique de jeunes pour prendre un autre enfant pour cible. On peut citer aussi l'utilisation de ces réseaux par des pervers sexuels.

- La « cyberdépendance » est un trouble psychologique entraînant un besoin irrésistible et obsessionnel d'utiliser Internet, de consulter sa boîte mail... Elle se caractérise par l'ensemble des

problèmes liés à l'utilisation de l'outil informatique ayant un effet négatif sur l'utilisateur, y compris la manipulation mentale. On ne peut nier, par exemple, l'importance prise par les réseaux sociaux dans les actes terroristes...

- Le vol de l'identité numérique.
- Les détournements de fonds.
- Etc., etc., etc.

Autre inconvénient majeur, les ordinateurs consomment énormément de chaleur et d'énergie. D'ailleurs, dès qu'il y a plusieurs ordinateurs dans une pièce, chacun peut constater que, l'hiver, le chauffage peut tomber en panne! En été, les *open spaces* sont (presque tous) climatisés. Facebook a déménagé ses ordinateurs en Norvège, à une centaine de kilomètres du cercle polaire arctique, en vue de réduire sa consommation énergétique qui est équivalente à celle de 16 000 foyers! Et que dire de Sequoia, l'un des ordinateurs les plus puissants au monde, qui avec ses 1,5 million de milliards d'octets consommerait jusqu'à 12 gigawatts (12 milliards de watts), soit environ la puissance produite par le gigantesque barrage d'Itaipu, à la frontière entre le Brésil et le Paraguay. Pour tous les fournisseurs d'accès à Internet et les hébergeurs, l'optimisation des systèmes de refroidissement est un défi majeur. Les ordinateurs ultra-puissants représentent un risque considérable de dépenses énergétiques et de dissipation de chaleur colossale: des programmes de recherches sont proposés dans le monde pour utiliser des techniques d'électronique digitale associant un état physique particulier nommé supra-conductivité et les très basses températures (cryogénie) pour aboutir à ce que l'on appelle un ordinateur quantique (voir plus bas).

Une autre solution pour diminuer la consommation d'énergie concerne les transistors: il faut les miniaturiser toujours

plus (les plus récents ne mesurent pas plus de 14 nanomètres de large, soit un peu moins de 100 atomes, ce qui est proche de la limite de la physique) afin de diminuer la distance que les données doivent parcourir, et ainsi la consommation d'énergie. Des puces connectées avec de nouvelles technologies, appelées puces neuromorphiques, sont conçues pour travailler comme le cerveau d'un mammifère (!), et commercialisées en tant que telles : *Truenorth*, d'IBM, contient 5,4 milliards de transistors interconnectés formant un réseau d'un million de « neurones » numériques et 256 millions de « synapses » (256 neurones et 262 000 synapses forment un cœur). Un supercalculateur neuromorphique pourvu de 16 puces *Truenorth* traitera un réseau de 16 millions de neurones et 4 milliards de synapses pour une consommation de 2,5 watts.

Le problème est qu'il arrive un moment où rajouter de la mémoire ou des processeurs ne sera plus suffisant. L'empirique loi de Moore prédisant que la taille des transistors qui composent les processeurs approchera celle de l'atome à l'horizon 2020, on y est presque ! D'où l'idée de fabriquer des ordinateurs quantiques dont le fonctionnement serait totalement différent, utilisant les propriétés de la mécanique quantique. Ces ordinateurs ne traiteront plus les informations en binaire, le système de mesure en informatique (chaque *bit*, de l'anglais *binary digit*, chiffre binaire en français, porte soit un 1 soit un 0), mais, de manière analogue à l'échelle de l'atome et des électrons, en superposant linéairement des 0 et des 1. Nous n'irons pas plus loin dans l'explication, mais grossomodo, cela implique que les machines pourront calculer beaucoup plus rapidement, 100 millions de fois pour l'ordinateur présenté par Google (ce que *D-Wave* – première entreprise d'informatique quantique au monde – fait en une seconde prendrait 10 000 ans à un ordinateur classique !). Et

qui dit plus de rapidité dit aussi plus de possibilités de traitement et de stockage de données. Mais il reste quelques menus problèmes à régler, c'est un euphémisme. Ce n'est ni demain ni après-demain que les ordinateurs quantiques arriveront sur votre bureau.

*Les fantasmes et les peurs
que suscite l'intelligence artificielle*

Cela n'aura échappé à personne, aujourd'hui encore, l'intelligence artificielle engendre toutes sortes de fantasmes et de peurs, sans doute renforcés par le fait qu'il est difficile d'en comprendre le fonctionnement, les enjeux et d'en apercevoir les retombées futures. Il y a les alertes lancées par certains intellectuels ou savants de renoms, dont Stephen Hawking. Dès 2014, ce célèbre astrophysicien prédisait que lorsque l'IA dépassera l'intelligence humaine, elle sera alors la dernière invention humaine, car elle prendra entièrement le pas sur notre espèce et l'anéantira. Plus ambigu, le fondateur de *Tesla* *Elon Musk*, le même qui a fondé la société *Neuralink* évoquée plus haut, a lui aussi dénoncé les risques de l'intelligence artificielle, allant même jusqu'à prédire qu'elle pourrait nous détruire. Laurent Alexandre, un zélote très actif du transhumanisme qui ne se manifeste ni par sa compétence dans le domaine de l'IA ni par la prudence de ses affirmations, prédit que seuls les gens très intelligents pourront trouver du travail et que nos enfants en 2030 auront des circuits intégrés dans le cerveau ! Et pour cause : « *Les humains, limités par une lente évolution biologique, ne pourraient pas rivaliser et seraient dépassés* », a-t-il déclaré dans un entretien à la chaîne britannique BBC. Il y a aussi ceux qui développent un optimiste à toute

épreuve, au premier rang desquels Ray Kurzweil, le « pape » de la singularité, qui a d'ailleurs des liens forts avec Google. Pour lui, l'avènement de l'IA est une aubaine puisque l'être humain pourra réparer son enveloppe fragile vouée au déclin et mieux encore, fusionner son esprit avec la machine pour sauter dans les bras de l'éternité. Tout un programme ! Le célèbre PDG de Facebook Marc Zuckerberg, un peu moins lyrique, considère, lui, que l'Homme saura utiliser l'IA de façon raisonnable.

En matière de robotique aussi, de nombreux laboratoires essayent de développer des robots de plus en plus performants. Actuellement, le recours à l'intelligence artificielle dans ce domaine a pour objectif de fabriquer des robots plus adaptés à nos besoins, afin qu'ils puissent nous aider dans notre travail, nos tâches domestiques ou encore devenir notre bâton de vieillesse, en particulier les robots sociaux capables d'empathie tels Nao... Mais les mains des robots sont encore loin d'égaler les nôtres. Ils ne savent toujours pas marcher comme nous, même si le célèbre robot humanoïde Atlas arrive à se déplacer sur un terrain accidenté ou à réaliser un salto arrière. Quant à lacer des chaussures... Les robots sont et seront plus ou moins spécialisés pour un bon bout de temps encore. Il faudrait un nombre encore incalculable d'octets pour disposer d'un robot qui sache tout faire, tout en consommant aussi peu d'énergie que l'être humain. Sans s'attarder sur le sujet, notons qu'il se développe un marché, assez silencieux mais fructueux et qui se démocratise, sur les robots sexuels capables d'écouter et d'interagir avec leur propriétaire...

Demain, il y aura certainement des robots auto-construits et auto-apprenants : des robots enseigneront à des robots des gestes robotisés pour effectuer certaines tâches. Plus inquiétant, les progrès réalisés en matière de robotique et d'IA font entre-apercevoir l'émergence probable et prochaine

de robots non seulement autonomes mais armés, une classe de robots particulièrement couvée par les armées des grands pays.

Une grande question se pose: devons-nous craindre ces robots? Et en particulier les robots tueurs? En juillet 2015, un millier de signataires dont Stephen Hawking, Elon Musk, fondateur de la société *SpaceX*, le linguiste Noam Chomsky ou encore le cofondateur d'Apple Steve Wozniak ont lancé un appel, très relayé, pour dénoncer leurs dangers potentiels. Pour Jean-Charles Pomerol, professeur d'informatique et ancien président de l'université Pierre-et-Marie-Curie à Paris, il n'y a pas trop de crainte à avoir car il faudrait construire un très grand nombre de robots programmés pour nous éliminer et les usines de robots ne passent pas inaperçues. En tout cas, Google nous sauve de la catastrophe! La société compte inclure un bouton rouge capable de stopper net toute action qui nous serait préjudiciable.

Pour Jean-Gabriel Ganascia, craindre de façon plus générale l'intelligence artificielle est peu justifié: « *Rien en l'état actuel des technologies d'intelligence artificielle n'autorise à affirmer que les ordinateurs seront bientôt en mesure de se perfectionner indéfiniment sans le concours des hommes.* »*

Le vrai problème, c'est que l'IA n'est pas un produit ou une application ni même un logiciel unifié. Elle conduit à des produits ou des solutions nouvelles, mais totalement hétérogènes, qui vont de la captation des sens à l'interprétation des informations, ou du traitement du langage à l'exploitation des grandes bases de données. C'est l'intégration de toutes ces « briques » qui constitue l'IA. En raison de sa jeunesse encore

* Sur le sujet, on pourra lire l'excellent livre de Jean-Gabriel Ganascia, *Le mythe de la Singularité. Faut-il craindre l'intelligence artificielle?*, Le Seuil, 2017.

ÇA VA PAS LA TÊTE!

relative, cette intégration reste largement au niveau d'un grand bricolage non codifié toujours source de risques et de dérapage possibles.

Finalement, que faut-il retenir?

Qu'est-ce qu'en définitive que l'intelligence artificielle? Vous imaginez bien que la définition a évolué depuis les années 1960 : un langage informatique, un ensemble d'algorithmes, un logiciel, un ordinateur... Aujourd'hui, pour reprendre la définition de Yann LeCun, *« l'IA est un ensemble de techniques permettant à des machines d'accomplir des tâches et de résoudre des problèmes normalement réservés aux humains et à certains animaux »*. Avec cette définition, on voit tout de suite où se situe le problème : l'IA peut-elle se substituer à l'Homme et à terme le remplacer?

Indéniablement, l'IA a fait des progrès fulgurants et ce n'est pas fini. Elle est devenue une fonctionnalité propre à toutes sortes de machines et permet d'énormes avancées technologiques dans de nombreux domaines, du quotidien, de la santé, du transport... mais aussi quelques dérives qui sont des dangers potentiels bien réels. Néanmoins, il faut bien se rendre à l'évidence, c'est pour l'instant de la tarte à la crème avec des grumeaux dedans! La farine a été versée trop vite... L'intelligence artificielle n'est-elle qu'un artifice de l'intelligence? Ou au contraire, est-ce que les machines dotées d'IA pourront un jour penser et l'intelligence humaine pourra-t-elle être remplacée par l'intelligence artificielle? Les transhumanistes n'ont aucun doute que cela sera non seulement faisable, mais fait vers 2045. Vraiment? Encore faudrait-il savoir ce qu'est un cerveau et comment il fonctionne!

CHAPITRE 2

Mon cerveau n'est pas une puce!

Vous vous promenez en forêt à la recherche de champignons. Où se cachent-ils donc? Sous cette feuille? Ou celle-là? Ah non! Ils sont à vos pieds, bien en évidence. Vous respirez avec plaisir cette odeur d'humus. Le vent fait un léger bruissement dans les arbres. Vous vous rappelez que les cèpes de Bordeaux poussent plutôt sous les chênes. Alors vous cherchez. Où y a-t-il des chênes? Vous faites attention où vous mettez les pieds pour ne pas tomber, il y a des racines qui dépassent. Vous marchez, marchez, puis vous avez tout à coup une impression de déjà-vu. On dirait que vous êtes déjà passé par là. Vous essayez de vous repérer. Où est le sud? Zut, il est midi, il n'y a pas d'ombre! Dommage car vous venez tout juste de tomber sur trois cèpes magnifiques! Il faut absolument que vous vous rappeliez cet endroit. Tous vos sens sont en alerte. Ça crépite sous votre caboche, ça palpite de partout. Un vrai feu d'artifice! Vous apercevez votre ami qui part vers la droite. Il se baisse. Qu'a-t-il trouvé? Vous vous apprêtez à le

rejoindre. Mais non ! il relace ses chaussures tout simplement. Que se passe-t-il dans votre cerveau lors de cette balade ? Beaucoup de choses comme nous allons le voir.

L'intelligence artificielle s'est beaucoup inspirée du fonctionnement du cerveau humain, au point que certains transhumanistes rêvent de mettre leur cerveau dans une machine. Ont-ils un quelconque espoir de voir leurs rêves se réaliser un jour ? Pour répondre à cette question, il nous faut d'abord savoir comment est organisé le cerveau, comment il fonctionne et se construit et quels sont les paramètres qui influencent son fonctionnement. Bref, comment ça marche et que sait-on aujourd'hui de cet organe noble, même si on est très loin encore de le connaître et de tout comprendre ?

Dans le cerveau, l'unité élémentaire est le neurone

L'unité élémentaire dans le cerveau n'est pas le transistor mais le neurone. L'appellation même du mot neurone est due à Heinrich Wilhelm Waldeyer (1891) et les plus belles illustrations, nous les devons à Santiago Ramón y Cajal (1880) qui est parvenu à visualiser les neurones grâce à l'utilisation de la coloration argentique. En apparence, cette cellule n'a rien d'original comparée aux autres types cellulaires du corps. La cellule nerveuse contient un noyau, sorte d'enceinte de protection qui abrite, entre autres, le patrimoine génétique de l'individu (l'ADN). Ce noyau, entouré d'une paroi percée de pores, baigne dans une sorte de liquide, le cytoplasme, qui contient tous les autres composants nécessaires au fonctionnement de la cellule. Et le tout est délimité par une membrane. Même au niveau génétique et biochimique, les neurones ne se différencient guère des autres cellules : on retrouve les mêmes réseaux

de gènes et les mêmes cascades d'activation de molécules pour assurer le fonctionnement cellulaire.

Mais en sciences comme dans la vie, il ne faut jamais se fier aux apparences! En fait cette cellule est tout à fait originale. Une première particularité du neurone, par rapport aux cellules musculaires, cardiaques ou aux cellules de foie, par exemple, est de comporter outre le corps cellulaire ou soma, deux autres compartiments bien séparés :

– *Le corps cellulaire*, qui contient le noyau, est l'élément de « base » du neurone. C'est l'usine qui fait fonctionner tout le neurone. Sa seule source d'énergie est apportée par le glucose (ce qui est aussi une grande particularité par rapport aux autres cellules qui utilisent des sources énergétiques différentes comme le fructose et le lactose). La taille de ce corps cellulaire est très variable d'un groupe de neurones à l'autre. Par exemple, parmi les plus petits neurones (souvent appelés « microneurones »), on trouve les « grains » logés dans le cervelet dont le diamètre ne dépasse pas quelque 5 microns (soit 5 millièmes de millimètres) en moyenne. Les motoneurones des mammifères, situés dans la moelle épinière, qui commandent les muscles squelettiques sont, eux, parmi les plus gros, avec un diamètre pouvant atteindre 50 microns. Le record absolu du plus gros neurone chez les vertébrés semble être détenu par la cellule de Mauthner du bulbe de poisson, qui mesure 500 microns de longueur sur 30 microns de diamètre. Cette cellule est responsable de la réaction de fuite de l'animal. Chez les invertébrés, comme les mollusques, on trouve des neurones encore plus gros! Le ganglion viscéral (un morceau de cerveau) de l'aplysie, un mollusque marin qui a connu ses heures de gloire dans les années 1980 pour ce record, contient des neurones pouvant atteindre 1 mm de

diamètre. On les voit à l'œil nu ! Au sein d'un même individu, la forme du corps cellulaire est très variable et donne souvent le nom à certains types de neurones : cellules en grains du cervelet et du bulbe olfactif, neurones pyramidaux du cortex, neurones épineux du striatum...

– *Les prolongements courts, ou dendrites*, constituent le deuxième compartiment. Ils sont en quelque sorte les antennes réceptrices du neurone. Ce sont eux qui reçoivent les informations émises par d'autres neurones. Les dendrites, d'aspect trapu, ont un mode de ramification particulier dit « dichotomique » : chaque « branche » se scinde en deux nouvelles « branches » qui à leur tour se séparent en deux nouvelles « branches », et ainsi de suite. Le tout forme ainsi un « arbre » dendritique dont les caractéristiques (forme, volume) sont propres à chaque type de neurones. Cet arbre s'apparenterait plutôt au sapin qu'au chêne car les dendrites portent à leur surface des épines ! Ce qui est intéressant à retenir, et nous y reviendrons, c'est que le nombre et l'apparence de ces épines dendritiques varient tout au long de la vie en fonction des conditions physiologiques, de l'activité du neurone, de la présence dans son environnement d'hormones diverses.

– *Un prolongement long, l'axone*, constitue le dernier compartiment. C'est en quelque sorte le pôle émetteur du neurone. En règle générale, l'axone est unique. Il se distingue des dendrites par un diamètre plus fin. Il émet des branches qui se détachent à angle droit. Et il se faufile entre les autres neurones pour atteindre sa cible. Ou plutôt ses cibles : les autres neurones. Sa longueur est excessivement variable, allant de quelques micromètres à plusieurs mètres. Imaginez un motoneurone situé dans la moelle épinière d'une girafe et qui émet un axone jusqu'à un muscle situé tout là-haut dans le cou de l'animal !

*Si affinité, les neurones
établissent de nombreux contacts entre eux*

L'axone envoie des messages aux autres neurones. Il établit avec eux des contacts au niveau de leurs dendrites et de leurs corps cellulaires. Ces « points de contact » sont ce que l'on appelle les synapses. On estime qu'en moyenne un seul axone établit environ 10 000 contacts synaptiques avec d'autres cellules neuronales. Mais ce nombre peut dépasser 1 million dans certains neurones.

Le neurone ne connaît pas la monogamie ! C'est le moins que l'on puisse dire... Les terminaisons d'un neurone donné ne se font pas sur un seul neurone, mais sur quelques centaines. Si on considère qu'il existe environ 100 milliards de neurones dans un cerveau humain, la complexité du réseau qu'ils forment est extraordinaire, presque inaccessible à notre esprit, comme le sont les distances dans l'espace évaluées en années-lumières.

Au sein de l'axone, l'information est conduite par le potentiel d'action. C'est une variation de potentiel d'une durée brève, quelques millisecondes, dont le décours est assez magnifique : élancée, elle diminue rapidement, moins d'une milliseconde, atteint un pic, puis revient plus ou moins rapidement, à un niveau plus grand qu'au point de départ, pour finalement revenir nonchalamment à sa valeur initiale.

Ce potentiel naît en général là où l'axone part du corps cellulaire (le cône d'émergence). Mais comment naît-il ? Grâce à la bougeotte d'un très grand nombre de petites molécules chargées positivement et négativement ! Ces molécules, que l'on appelle des ions, entrent et sortent du neurone en passant au travers de la membrane (par des protéines appelées canaux ioniques), créant ainsi une différence de charges de part et

d'autre de la membrane du neurone. Autrement dit un potentiel. Lorsqu'il atteint une valeur seuil, boum! Le potentiel d'action naît de manière explosive. Cette impulsion électrique se propage à toute allure le long de l'axone, parfois jusqu'à plus de 100 m par seconde (c'est la conduction nerveuse), et déboule au niveau de ses multiples terminaisons, celles qui forment les synapses.

Là, l'influx nerveux, constitué de trains de potentiels, est converti en information chimique. Il y a donc discontinuité électrique dans le réseau neuronal. Contrairement aux ordinateurs, la communication nerveuse est à la fois électrique et chimique. Ainsi si l'on veut interrompre une partie du réseau, on peut agir sur l'une ou l'autre. Par exemple, des molécules chimiques peuvent bloquer la conduction nerveuse: vous devez vous faire opérer d'un hallux valgus au pied, on va vous faire une injection d'un anesthésique local au niveau du nerf sciatique qui va empêcher la transmission du message nerveux de la douleur au cerveau; de même, on doit vous faire une césarienne pour accoucher, vous allez avoir une péridurale qui consiste en l'injection d'une substance anesthésiante au niveau du canal qui contient la moelle épinière. En revanche, vous avez du mal à dormir, vous allez prendre des somnifères qui vont agir, non sur l'influx nerveux mais sur l'information chimique, autrement dit au niveau de la synapse.

Que se passe-t-il donc au niveau d'une synapse? De petites molécules, les neurotransmetteurs, attendent sagement d'être «réveillées». Lorsque l'influx nerveux, sous la forme du potentiel d'action, débarque dans la synapse, c'est le coup de fouet! Les neurotransmetteurs sont éjectés hors de la terminaison de l'axone (qui constitue le compartiment présynaptique). Ils se retrouvent dans un espace fin (large

de seulement quelques millièmes de millimètres) appelé espace synaptique et situé entre deux neurones, le neurone présynaptique et le neurone postsynaptique. Là, ils vont pouvoir se fixer sur des protéines particulières, les récepteurs, présentes à la surface du neurone voisin (on dit dans le compartiment postsynaptique). Attention, ces neurotransmetteurs sont exigeants dans le choix de leur partenaire, ils sont très « sélectifs » : ils ne se fixent pas sur le premier récepteur rencontré. Ils doivent trouver le bon partenaire, celui avec lequel ils s'emboîteront parfaitement. En effet, il existe différentes catégories de neurotransmetteurs (glutamate, adrénaline, dopamine...), dont chacun se fixe sur le type de récepteur qui lui est propre. Il faut en quelque sorte que la bonne clé trouve la bonne serrure. Henry Dale, prix Nobel de médecine avec Otto Loewi en 1936, postula qu'« *un neurone n'est capable de relâcher qu'un seul neurotransmetteur à la terminaison de son axone* [la synapse] ». Ce principe s'est depuis révélé faux, les neurones pouvant aussi libérer, avec un neurotransmetteur donné, d'autres molécules (des neuropeptides et des acides aminés). L'identification de familles de neurones en fonction des molécules qu'ils libèrent a conduit à l'établissement de répertoires, des « atlas de neuroanatomie chimique », qui se sont révélés d'une remarquable cohérence avec les données physiologiques ou pathologiques : l'exemple le plus spectaculaire est le lien qui a été établi entre l'ensemble des neurones qui libèrent la dopamine au niveau d'une structure du cerveau, le striatum, et la maladie de Parkinson. D'une façon générale, des neurones qui assurent une même fonction et libèrent les mêmes molécules sont regroupés en noyaux ou ganglions. Les axones des neurones d'un noyau qui se projettent vers un autre noyau constituent ce que l'on appelle des voies.

ÇA VA PAS LA TÊTE!

Il faut souligner que, dans le cerveau, les neurones ne sont pas silencieux. Au contraire, ils sont presque tous spontanément actifs : ils émettent des potentiels d'action à un rythme qui leur est propre et ce, même sans qu'aucun signal, que l'on appelle aussi stimulus, ne leur parvienne. Vous êtes capable de produire des sons, des paroles sans stimulation extérieure. Vous êtes prêt à vous endormir, il n'y a pas de lumière, pas de bruit, mais votre pensée court toujours, votre cerveau est actif. Même pendant votre sommeil, si vous n'êtes plus conscient, votre cerveau continue à travailler et, par exemple, consolide la mémoire des événements appris pendant la journée. Mais sous l'influence de stimuli divers, en particulier sensoriels, cette fréquence de décharge des potentiels d'action sera modifiée : elle peut aussi bien être augmentée (on parle d'excitation) que diminuée (on parle d'inhibition). En pouvant ainsi moduler dans les deux sens le message, le cerveau peut créer et modifier à tout instant de manière très fine et donc complexe les messages qu'il transmet à l'organisme.

Les neurones ne se renouvellent pas... sauf exceptions

Les neurones présents dans votre tête sont les mêmes que lorsque vous êtes sortis du ventre de votre mère ou au moins lorsque vous jouiez encore dans le bac à sable ! Eh oui, on conserve les mêmes neurones toute la vie ! Il n'en naît plus de neuf. Voilà pourquoi ces cellules sont si précieuses et pourquoi il vaut mieux ne pas passer ses journées à piquer des têtes dans un ballon de foot, ou pire, à boxer sans casque de protection, même si au final, la perte de neurones est à chaque fois minime. C'est sans doute cette particularité qui distingue

MON CERVEAU N'EST PAS UNE PUCE!

le plus les neurones de toutes les autres cellules. Au sein des muscles, du foie, du cœur, du poumon, ou dans la peau et l'intestin par exemple, les vieilles cellules sont remplacées par des cellules toutes neuves et vigoureuses, elles-mêmes issues de la division de cellules qui au bout d'un moment finissent par décliner puis meurent et sont éliminées. Ce qui est très pratique pour conserver des muscles en forme, ou retrouver une belle peau après un coup de soleil!

Mais dans le cerveau, les neurones ne se renouvellent pas. On ne peut compter que sur le stock présent dès la naissance. Bien sûr, il convient de nuancer cette affirmation. D'abord, le moment de la naissance n'est pas une frontière absolue. Ça dépend de l'espèce. La durée de la gestation chez deux espèces très semblables comme le cochon d'Inde et le hamster est différente, de sorte que l'une (le hamster) naît avec un cerveau plus immature, mais si l'on se réfère à la date de la conception, les développements du cerveau chez l'une et l'autre espèces sont très voisins. De plus, certaines catégories de neurones continuent à se diviser plusieurs semaines après la naissance. Il en est ainsi par exemple des grains du cervelet qui apparaissent avant la naissance chez l'humain mais après chez les rongeurs. Un cas bien démontré et particulièrement connu par ses implications éthologiques est, chez certains oiseaux, celui des « neurones du chant » qui se renouvellent tous les ans. Chez le mâle, l'intégration de nouveaux neurones dans le centre du chant du cerveau est en lien avec le rythme des saisons. Chez la femelle, le cycle annuel d'exécution et d'apprentissage du chant de séduction du mâle entraîne également la production de nouveaux neurones.

Dans l'espèce humaine, comme dans d'autres espèces, des types neuronaux particuliers sont encore capables de

division chez le sujet adulte. L'existence et l'importance de ces « pouponnières à neurones » présentes dans le cerveau et dans les méninges sont l'objet de nombreux débats de nos jours. Elles forment en tout cas des stocks de cellules souches qui donnent naissance, après division, à des neurones. On a également retrouvé ces pouponnières au niveau de l'hippocampe, une structure enfouie dans le cortex et impliquée dans le processus de mémorisation. Des chercheurs de l'Institut Karolinska, à Stockholm, ont ainsi estimé qu'environ sept cents nouveaux neurones sont intégrés chaque année dans chacun des deux hippocampes (celui de l'hémisphère droit et celui de l'hémisphère gauche), bien que ce phénomène diminue avec l'âge. On notera toutefois que les nouveaux neurones sont très limités en nombre puisqu'ils représentent environ 0,01 % de la population neuronale totale de cette partie du cerveau ! Le rôle de ces nouveaux neurones est encore inconnu. Sont-ils impliqués d'une quelconque façon dans la mémoire ? Certains fondent beaucoup d'espoir sur leur utilisation pour traiter des maladies neurodégénératives (voir chapitre 5), mais on est très très loin du compte !

Si vous, lecteur, gardez ces réserves en tête (dans votre propre cerveau !), vous comprendrez les conséquences d'une absence globale de renouvellement des neurones après la naissance (et ce sera très utile pour la suite) :

– Les neurones ont l'âge de l'individu. Ils conservent donc les traces de leur vie mouvementée. Les mauvaises, telles que les agressions dues aux substances toxiques ou infectieuses, les lésions, les traumatismes, le manque d'irrigation par les vaisseaux sanguins, les effets des hormones, des drogues, des médicaments, les carences ou excès alimentaires, et bien d'autres. Comme les bonnes, répercussions d'un environnement

intellectuellement stimulant, d'une vie paisible, d'une alimentation équilibrée, d'une activité sportive... Tous ces « stress » délétères ou positifs changent la régulation de l'expression de certains gènes dans les neurones et ce changement peut être durable: ce phénomène, de découverte récente et qui s'applique à toutes les cellules de l'individu, est appelé épigénèse; il a une importance fondamentale car il fait que les neurones portent en eux une trace du « passé » qu'ils ont vécu; ce mécanisme d'empreinte sous-tend peut-être le phénomène d'individuation progressive tout au long de l'existence d'un être humain par rapport à un autre et plus même pourrait dans certains cas être transmis à travers les générations.

– Les neurones étant incapables de se renouveler, une lésion directe des corps cellulaires par manque d'oxygénation lors d'un accident vasculaire cérébral (AVC) ou une section d'axones proche de leurs corps cellulaires, ce qui provoque leur dégénérescence, à la suite d'un traumatisme crânien par exemple, seront irréparables. Et les neurones, perdus à jamais. Même si, comme on l'a vu, une petite poignée de nouveaux neurones peut naître dans le cerveau.

– Le « stock neuronal » présent autour de la naissance ne peut donc que diminuer pendant toute la vie par disparition ou mort des neurones. Mais il faut bien distinguer deux types de mort neuronale. D'abord, la mort neuronale survenant au cours du développement de l'embryon puis du fœtus, essentiellement en période prénatale et périnatale, même si elle peut se produire aussi après la naissance dans certaines régions du cerveau (cervelet, hippocampe par exemple). Il s'agit d'un phénomène normal, physiologique, qui est la traduction neuronale d'une manifestation très générale de mort cellulaire au cours du développement. Son importance n'est pas négligeable puisque, suivant les régions du cerveau, de 20 à 80 %

des neurones immatures disparaissent. Ces pertes permettent d'ajuster la taille des «pools» de neurones qui doivent se connecter entre eux et ce sont donc, contrairement à de possibles idées reçues, des phénomènes très utiles à la mise en place harmonieuse du cerveau. Plusieurs types de mécanismes contribuent à ces «suicides cellulaires» et sont très étudiés actuellement, les plus connus étant l'apoptose (mot grec qui évoque la chute des feuilles) et la mort avec autophagie, véritable autodigestion des composants de la cellule (du grec «se manger soi-même»).

La mort neuronale survient aussi dans le cerveau adulte vieillissant. Dans le cas d'un vieillissement «normal», sans maladies neurodégénératives, la perte de neurones a longtemps été considérée comme un destin inéluctable («un fatum»). En fait, l'importance de cette mort neuronale a été très largement surestimée, et il y a bien d'autres changements cellulaires dans les neurones que la mort proprement dite qui peuvent expliquer ou concourir au déclin cognitif ou moteur survenant avec l'âge dans le cerveau (nous y reviendrons dans le chapitre 4).

Contrastant avec la relative constance du nombre de neurones chez l'adulte, il existe une extraordinaire plasticité des connexions entre les neurones. Ce phénomène est particulièrement important dans la petite enfance et explique les remarquables capacités d'apprentissage à cette période de la vie. Les points de contacts se font et se défont tout au long de la vie, et cette capacité reste présente dans le grand âge, même si quelque peu amoindrie! Nous aurons l'occasion d'en reparler.

Si les neurones vivent aussi longtemps que leur propriétaire, leur «identité neurochimique», caractérisée par le type

de molécules qu'ils libèrent, n'est pas forcément immuable. Ils peuvent changer de « langue ». Cette plasticité du langage des neurones, spectaculaire au cours du développement, persiste également pendant toute la vie. Non seulement le « pool » de molécules synthétisées par un neurone donné est multiple, mais il est aussi variable suivant les conditions physiologiques : par exemple, lors de la période de l'allaitement par une maman, les connexions de certains neurones spécialisés changent pour favoriser la production de prolactine, l'hormone de la lactation : ces modifications sont maintenues pour les grossesses suivantes !

Il y a quand même une bonne nouvelle qui découle de l'incapacité des neurones à se renouveler durant la vie : les neurones ne peuvent pas donner naissance à des tumeurs, ou bien de façon tout à fait exceptionnelle. Ceci n'est pas le cas d'autres cellules trouvées dans le cerveau, comme les cellules gliales.

Les cellules gliales s'invitent au dialogue

Venons-en justement aux cellules gliales. Moins connues du grand public que les neurones, elles sont cependant cent fois plus nombreuses ! On les retrouve dans tout le système nerveux central (le cerveau proprement dit et la moelle épinière) et périphérique (les nerfs et les ganglions nerveux). Comme les neurones, elles ont une longue histoire. En 1839, Theodor Schwann décrivit pour la première fois un type de cellules gliales du système nerveux périphérique auxquelles son nom fut associé, les cellules de Schwann. Le terme de glie (*glu*, colle) fut utilisé pour la première fois par Rudolph Virchow en 1846, pour désigner le tissu du cerveau et de la moelle épinière dans laquelle les neurones sont enfouis. Puis

Otto Deiters, en 1865 et Camillo Golgi, en 1885, commencèrent à caractériser ces autres cellules : celles de forme étoilée furent appelées astrocytes par Santiago Ramón y Cajal en 1913 ; puis les oligodendrocytes et les cellules de la microglie furent décrites, entre 1919 et 1928, par ces mêmes auteurs et Pio del Rio Hortega.

– Les *astrocytes* présentent des formes aussi diverses que les neurones. Ce sont des cellules très sociales, elles établissent des contacts avec toutes les cellules du cerveau, les neurones, les oligodendrocytes, les cellules qui bordent les vaisseaux sanguins et les autres astrocytes. Elles leur fournissent toutes sortes de services. Elles aident à la construction du système nerveux central au cours du développement en servant de « rails » pour la migration des neurones. Elles apportent aussi le souper (des nutriments) aux neurones, car elles sont le seul lieu de stockage du glucose dans le système nerveux, donc la seule source de pitance des neurones. Et ce n'est pas tout ! Elles jouent un rôle fondamental dans les processus de transmission des messages nerveux et les phénomènes de plasticité cérébrale. Des travaux récents ont démontré que les astrocytes interagissent activement avec les neurones pour former de véritables « ménages à trois » ou des « synapses tripartites », qui intègrent la participation des terminaisons d'astrocytes entourant les synapses.

À ces fonctions, s'ajoutent plusieurs autres rôles, dont la sécrétion de molécules tels des facteurs de croissance ou des cytokines, très utiles pour l'activité des neurones mais dont l'excès peut conduire à une inflammation du cerveau. Les astrocytes possèdent des « pieds », qui enveloppent les capillaires sanguins, prélevant le glucose, et forment aussi un véritable bouclier contre tout passage d'éléments indésirables. Ils joueraient un rôle clé dans le maintien de la barrière

hémato-encéphalique, cette barrière quasi infranchissable qui assure un environnement interne très stable et protège le cerveau de l'intrusion de composés potentiellement nocifs présents dans le sang.

– Les *cellules de la microglie*, ou cellules microgliales, comptent pour environ 20 % de la totalité des cellules gliales du cerveau. Elles jouent le rôle de cellules « mange-tout », très pratiques pour faire le ménage dans le cerveau car elles avalent et digèrent les cellules ou neurones qui dégénèrent selon le phénomène de « phagocytose » décrit pour les macrophages (des globules blancs) par Élie Metchnikoff dès 1882 à l'Institut Pasteur.

– Enfin, les *oligodendrocytes* sont les cellules qui se différencient le plus tardivement au cours du développement, jusqu'aux premières semaines après la naissance, donc après la mise en place des axones et la fin de la formation des synapses. Elles aussi ne se divisent plus. Leur fonction principale est de synthétiser des gaines de myéline, sorte de substance qui s'enroule, comme un roulé à la confiture en pâtisserie, autour de l'axone de nombreux neurones du système nerveux central des vertébrés (les invertébrés, par exemple les mollusques, sont eux dépourvus de myéline).

Dans le système nerveux périphérique, ce ne sont pas les oligodendrocytes, mais les cellules de Schwann qui recouvrent le corps cellulaire des neurones et leurs axones. Les nerfs qui sont reliés à la moelle épinière et au cerveau (on les appelle les nerfs périphériques) sont constitués de faisceaux d'axones auxquels sont associés deux types de cellules de Schwann, les myélinisantes et les non myélinisantes. La myélinisation a pour rôle de former un isolant électrique (la myéline) autour de certains axones, ce qui « booste » leurs performances. Ceci pour trois raisons: 1. grâce à cette couche isolante, l'influx

ÇA VA PAS LA TÊTE!

nerveux (autrement dit, les messages de potentiels d'action) met le turbo! Il se propage plus rapidement sur de longues distances. Un axone myélinisé conduit l'influx nerveux environ dix fois plus vite qu'un axone non myélinisé de même taille; 2. la myéline permet aussi une économie d'énergie car les échanges ioniques à l'origine du déclenchement de l'influx nerveux (et qui consomment de l'énergie) se produisent uniquement dans un endroit spécialisé, le nœud de Ranvier; et 3. la myéline permet aussi une économie d'espace. Le volume occupé par l'axone est proportionnel au carré de son rayon et la vitesse de conduction de l'influx est directement proportionnelle au diamètre de l'axone. En un mot, plus le diamètre est important, plus ça va vite. Les invertébrés qui n'ont pas de myéline ont développé des axones géants: l'axone géant de Calmar qui est impliqué dans le réflexe de fuite peut atteindre un millimètre de diamètre. Pour une vitesse de conduction identique, un axone myélinisé occupe environ 1/100^e du volume d'un axone non myélinisé. Imaginez le volume de notre cerveau et de notre moelle épinière si aucun des axones du système nerveux central n'était myélinisé! Pour le coup, nous aurions la «grosse tête»!

En myélinisant les neurones, les cellules gliales jouent donc un rôle essentiel dans le bon fonctionnement du cerveau. D'ailleurs, lorsque les cellules gliales «déraillent», parce que leur ADN comporte des mutations, elles sont à l'origine de différentes maladies neurologiques. Dans la plupart des cas, on observe également une dégénérescence secondaire et progressive des axones, reflet de l'altération des interactions axone/myéline/glie. Ces maladies peuvent toucher plus particulièrement la formation de la myéline ou bien sa stabilité. Suivant les maladies, un seul type de myéline peut être atteint: la myéline du système nerveux central, comme dans la sclérose en

plaques et dans plusieurs maladies génétiques rares (les leucodystrophies), ou alors la myéline du système nerveux périphérique comme dans les polynévrites alcooliques ou toxiques. Il est plus rare que les deux types de myélines soient atteints (dans certains cas d'adréno-leucodystrophies). Les conséquences sont très visibles et peuvent être dramatiques. Ainsi, la vision, l'ouïe, la parole, la motricité ou la mémoire peuvent être perturbées ou paralysées. Une association de patients, ELA, rendue célèbre par l'implication de l'ex-footballeur Zinedine Zidane, soutient la recherche sur les différentes formes de maladies (une trentaine) aux noms propres multiples (maladie de Refsum, de Krabbe, d'Alexander, etc.).

La diversité de communication entre les neurones est infinie

Les neurones ne sont pas connectés les uns aux autres au hasard. Le but est d'accomplir une fonction spécifique. Des circuits simples, comme ceux impliqués dans les réflexes, mobilisent seulement deux types de neurones qui se rejoignent au niveau de la moelle épinière : des neurones sensoriels qui « ramènent » au cerveau les informations captées par les organes des sens et des motoneurones qui quittent la moelle épinière pour commander l'action des muscles. Mais la plupart des réseaux sont évidemment beaucoup plus compliqués et n'ont rien à voir avec les réseaux de neurones formels de l'intelligence artificielle. D'abord parce qu'ils mobilisent davantage de neurones. En plus, des neurones excitateurs et des neurones inhibiteurs ajoutent leur grain de sel. On les appelle les interneurones parce qu'ils s'intercalent entre des neurones voisins. Ils sont capables d'inhiber d'autres neurones

excitateurs ou inhibiteurs. Dans ce dernier cas, il en résulte une excitation car moins par moins, ça fait plus! D'autres neurones excitateurs sont encore plus subtils, ou plus masochistes! Ils peuvent s'auto-inhiber eux-mêmes! Une branche de l'axone de l'un excite un interneurone inhibiteur voisin qui va très rapidement à son tour diminuer son activité (c'est l'inhibition récurrente, et elle est très efficace)! Le fait qu'il existe plusieurs types d'inhibition (peu importent les noms, rétrograde antérograde, récurrente, etc.) montre la complexité du fonctionnement de ces réseaux de neurones inhibiteurs; ils interagissent de façon très subtile et qui change en permanence; cette action est parfois très spectaculaire car ils peuvent ainsi mettre sous silence des circuits entiers de neurones!

Il existe encore d'autres types de neurones dits modulateurs qui agissent à la fois sur des neurones excitateurs et inhibiteurs pour les rendre plus ou moins excitables. Ces mécanismes constituent des micro-circuits intégrés dans des circuits plus larges.

L'intégration extrême de circuits superposés interagissant entre eux fait que l'architecture globale du cerveau est dite hiérarchique. Pour le comprendre, prenons l'exemple de l'organisation des voies visuelles. Les premières étapes du traitement d'une information visuelle se situent au niveau du fond de l'œil. L'image est projetée sur les cellules (il en existe plusieurs types) qui tapissent la rétine. Elles sont ainsi stimulées et finalement le signal de sortie de la rétine sera un (ou plusieurs) potentiel d'action qui est ensuite envoyé, *via* le nerf optique, au niveau d'une structure cérébrale appelée corps genouillé latéral. Cette structure sert de relais et envoie à son tour l'information au cortex visuel primaire où l'image sera «interprétée». Ces mécanismes de transmission de

MON CERVEAU N'EST PAS UNE PUCE!

l'information visuelle ont été identifiés dans les années 1960 par les neurophysiologistes David Hubel et Torsten Wiesel, récompensés pour cette découverte en 1981 par le prix Nobel de médecine. Les deux chercheurs ont décrit comment les signaux de l'œil sont mis en action par le cerveau pour générer des messages de type détecteurs de forme, de mouvement, de profondeur stéréoscopique et de couleur, permettant ainsi de construire les éléments de l'image.

Les descriptions qui précèdent montrent la diversité presque infinie des neurones et plus encore de leurs modes de communication. Si l'on ajoute leurs caractéristiques morphologiques, chimiques et fonctionnelles, leur capacité à construire des circuits neuronaux élaborés, on est conduit à admettre que les quelque cent milliards de neurones qui constituent notre cerveau sont autant d'entités différentes, uniques et irremplaçables. Leurs connexions sont sans doute encore plusieurs milliers ou centaines de milliers de fois plus nombreuses: nous l'avons vu, un neurone donné innerve un grand nombre de cibles et lui-même est innervé par de multiples afférences issues de neurones différents. Sous ce seul aspect « câblé », le fonctionnement nerveux apparaît donc déjà d'une complexité écrasante qui dépasse l'entendement! Si nous ajoutons, et nous y reviendrons, que ce réseau n'est pas statique, mais change, évolue, se modifie en permanence (la fameuse plasticité cérébrale), nous atteignons un complexe infini que l'on peut comparer au niveau macroscopique à l'infini de l'Univers. Ce vertige de l'infini déjà décrit par le philosophe Blaise Pascal au XVII^e siècle!

Tous les neurones ne sont pas situés dans le cerveau

Les neurones situés dans la boîte crânienne et la moelle épinière constituent le système nerveux central. Mais tous les organes, les glandes, les muscles reçoivent des axones en provenance de neurones situés dans des ganglions périphériques. Ces ganglions nerveux (à ne pas confondre avec les ganglions lymphatiques) sont situés à l'extérieur du système nerveux central, soit le long de la colonne vertébrale soit dans les organes mêmes. Ils ne sont pas protégés par les os du crâne ou de la colonne vertébrale. Ils ne sont pas non plus recouverts par la barrière hémato-encéphalique qui assure l'isolation du cerveau. Ils sont de ce fait beaucoup plus vulnérables aux lésions et aux toxines. Tous ces ganglions émettent en retour des axones vers le système nerveux central. Tous les axones se regroupent pour former des nerfs. Les nerfs servent à interagir avec notre environnement. Les nerfs moteurs, par exemple, activent nos muscles pour tendre le bras et attraper une tablette de chocolat, marcher, courir, sauter, caresser... Les nerfs sensitifs, qui véhiculent l'information en provenance des cellules sensorielles, nous permettent de ressentir le monde, le chaud, le froid, la douleur... Cet ensemble constitue le système nerveux périphérique constitué de nerfs myélinisés. On distingue les nerfs afférents, qui font remonter l'information jusqu'au système nerveux central, des nerfs efférents qui transmettent les commandes au système nerveux périphérique.

Tous les neurones des nerfs afférents bombardent donc en permanence le système nerveux central d'informations sur l'état dans lequel se trouvent les muscles et les organes et convoient aussi des informations venues du monde extérieur. Le système nerveux central prend note et « mouline » toutes ces

informations pour apporter une réponse appropriée. S'il pleut, vous prenez un parapluie. S'il fait froid, vous mettez un pull. Si vous avez les jambes lourdes et endolories après une longue marche, vous pensez à boire de l'eau et à vous étirer (si, si! c'est efficace pour limiter les courbatures). Il est 22 heures, vous n'avez pas dîné, votre estomac vous fait savoir qu'il est temps de passer à table! On pourrait multiplier les exemples à l'infini.

Évidemment, il y a quelques muscles qui tentent d'ignorer le cerveau pour vivre leur propre vie. On vous fait un compliment inattendu, vous rougissez de plaisir. Les muscles lisses qui entourent les artères se relâchent et les veinules du visage se dilatent. Le tube digestif, lui aussi, aime bien vivre sa propre vie. Si on coupait tous les nerfs viscéraux, l'estomac et l'intestin continueraient à se contracter, bouger, se tordre... pour accomplir leur travail de digestion. Il est vrai que l'innervation de l'intestin est remarquable: plus de 200 millions de neurones innervent le tube digestif, constituant ce que l'on appelle le cerveau entérique ou second cerveau. Certaines expressions sont d'ailleurs très parlantes et pourraient laisser penser que c'est un vrai cerveau qui peut se passer de celui qui est logé dans la boîte crânienne: «avoir l'estomac noué» par la peur, «avoir la peur au ventre», «être pris aux tripes» lors de scènes émotionnelles, l'affront de Monsieur Tartempion qui «laisse un goût amer»...

Popularisé récemment par les médias, ce second cerveau envoie en permanence des informations, des potentiels d'action, au premier cerveau, enfermé dans la boîte crânienne, à chaque fois que quelque chose ne va pas: nous avons trop bu d'alcool, nous digérons mal, nous avons mangé trop de chocolat... Les informations envoyées par ce second cerveau sont véhiculées par un nerf crânien, une autoroute que l'on appelle le nerf vague qui est en relation permanente avec le premier. Il n'est pas autonome, si ce n'est pour accomplir les

ÇA VA PAS LA TÊTE!

tâches quotidiennes mises en jeu dans la digestion. Cependant le cerveau « d'en haut » ne commande pas à la baguette le cerveau « d'en bas », et ce dernier pourrait bien avoir plus d'influence qu'on ne le pense*.

Petite devinette au passage : à votre avis, combien y a-t-il de cellules humaines dans un organisme humain ? Eh bien seulement 10 % ! Les 90 % restant sont pour l'essentiel des bactéries ! En effet, le tube digestif abrite quelque cent mille milliards de bactéries, soit dix fois plus que notre corps ne compte de cellules humaines. Ces bactéries, avec les levures, les champignons et les virus, constituent le « microbiote », encore nommé « flore intestinale ». De plus en plus d'arguments font penser que ce microbiote influencerait notre comportement. Des expériences réalisées chez les rongeurs ont montré que des souris sans microbiote avaient un comportement différent de celui des souris normales : elles sont plus stressées et développent des troubles anxieux très importants. Mais si on leur administre de « bonnes bactéries », ces troubles disparaissent. La même équipe a réalisé une expérience encore plus surprenante : ils ont fait un transfert de microbiote entre un groupe de souris défini comme « curieux et intrépide » et un autre composé de rongeurs « timides, hésitants et peureux ». Résultat : les comportements des deux groupes se sont totalement inversés ! En 2012, des chercheurs de l'*University College Cork*, en Irlande, ont également émis l'hypothèse que les bactéries de la flore intestinale régulent le taux d'une molécule, la sérotonine, intervenant dans le contrôle de l'humeur. Toutes ces études ne font pas consensus et doivent encore être

* Sur ce sujet, on lira avec intérêt le livre de Guilia Enders, *Le Charme discret de l'intestin*, Actes Sud, 2014.

confirmées. Pour l'heure, peu de tests ont été effectués sur l'humain.

On soupçonne aussi les déséquilibres de la flore intestinale d'agir fortement sur notre santé. Un lien possible a ainsi été évoqué entre microbiote et maladies mentales sévères telles qu'autisme et schizophrénie. Il pourrait y avoir également une relation entre microbiote intestinal et maladies neuro-dégénératives. On a observé que le microbiote de patients souffrant de la maladie de Parkinson présente une réduction de près de 80 % d'une famille particulière de bactéries (les *Proteobacteria*). Faire le diagnostic et estimer l'avancement de la maladie pourraient ainsi être réalisés par de simples prélèvements dans le colon. Pour autant, le cerveau d'en haut reste-t-il le maître absolu ? Pour l'instant, considérons que oui, mais une voie de recherche particulièrement intéressante est en train de se développer, qui pourrait révéler bien des surprises et peut-être de nouvelles pistes thérapeutiques.

*Le cerveau interagit en permanence
avec son environnement*

Une des propriétés fondamentales de tous les êtres vivants est la capacité d'interagir avec l'environnement. C'est essentiel pour survivre et préserver l'espèce. Il faut être en mesure de voir ou d'entendre le guépard qui s'approche pour pouvoir prendre les jambes à son cou ! Cette capacité est présente, même de façon rudimentaire, chez les organismes très simples, comme les êtres composés d'une seule cellule. Par exemple, certaines bactéries, algues ou champignons possèdent des cils ou flagelles qui leur permettent de se déplacer. Ces cils sont sensibles à divers signaux, mécaniques ou électriques.

Récemment, des chercheurs français de Toulouse ont montré qu'un organisme rampant composé d'une seule cellule géante, le « blob » (ou *Physarum polycepharum*), vivant dans les sous-bois et dépourvu de système nerveux, est capable d'apprendre de ses expériences dans son milieu de vie et de transmettre ce qu'il a appris en fusionnant, même temporairement, avec ses congénères!

Cette interaction permanente avec l'environnement atteint un degré beaucoup plus important chez les espèces plus complexes, où elle est liée au développement du système nerveux et des organes des sens. Les structures nerveuses responsables de l'acquisition et de la transmission de l'information présentent une grande variété qui est, en quelque sorte, adaptée à chaque espèce. Pour certains organismes complètement aveugles comme les taupes, la survie dépend de façon critique de l'information olfactive, tandis que pour d'autres elle dépend essentiellement de stimuli visuels. Les rapaces, par exemple, possèdent une acuité visuelle remarquable qui leur permet de repérer et capturer leurs proies. Les êtres humains n'ont pas de sensibilité pour les champs électriques, à moins de mettre les doigts dans une prise! Au contraire, certains poissons, comme les raies ou les requins, les détectent avec une grande efficacité, repérant leurs proies enfouies dans le sable. D'autres comme le poisson Torpille sont capables d'émettre des champs électriques importants pour se défendre et/ou tuer leurs proies.

Les humains ne perçoivent pas non plus les ultrasons, c'est-à-dire les oscillations de la pression de l'air, autrement dit les ondes sonores à très haute fréquence, alors que ces ultrasons permettent aux chauves-souris de voler avec une grande agilité dans l'obscurité la plus complète. À la différence de certains

vertébrés, nous n'avons aucune sensibilité pour les champs magnétiques statiques, ni pour l'angle de polarisation de la lumière, et nous ne pouvons pas non plus détecter les ondes électromagnétiques dont la fréquence est en dehors des étroites limites de la lumière visible, telles que les lumières infrarouges et ultraviolettes. Beaucoup d'animaux comme les tortues marines, les abeilles, les fourmis, le pigeon domestique... sont au contraire sensibles au champ magnétique terrestre et l'utilisent pour se déplacer, parfois sur plusieurs milliers de kilomètres pour les oiseaux migrateurs. Certains serpents ont des fossettes thermosensibles qui détectent l'infrarouge et permettent de localiser un corps à sang chaud. Une espèce de crevette (la crevette-mante), qui ressemble de loin à une langouste, possède des yeux à facette, relativement gros, qui lui permettent de voir à 360°. Elle vit enfouie dans le sable ou dans un trou, d'où dépassent seulement ses yeux pour scruter l'environnement.

D'une certaine façon, la présence de structures très développées et spécialisées dans la détection d'un type particulier d'information «accorde» les organismes avec leur habitat. Par exemple, la capacité de détecter la lumière est peu développée, ou même absente, chez les organismes qui vivent dans des environnements sans lumière, tels que les poissons des grandes profondeurs. Chez les organismes «visuels», elle correspond strictement aux conditions d'illuminations prévalant dans l'habitat. La rétine des animaux nocturnes contient une grande majorité de bâtonnets, une classe de photorécepteurs adaptés à la détection de lumières faibles, et dont la sensibilité peut approcher la limite physique théorique, c'est-à-dire la capacité de détection d'un seul photon (la particule élémentaire de la lumière). En comparaison, les photorécepteurs prévalant chez les animaux diurnes, les cônes,

sont beaucoup moins efficaces pour détecter la lumière, mais permettent de discriminer les couleurs présentes dans l'environnement. L'intérêt de la performance visuelle apparaît bien évident chez quelques poissons, pour lesquels les mécanismes utilisés pour la détection de la couleur présentent de grandes fluctuations saisonnières : les pics de sensibilité chromatique maximale correspondent aux variations de composition de la lumière dans leur environnement.

Le cerveau se remodèle durant toute la vie!

Les organes des sens sont constitués de cellules sensorielles spécialisées pour un stimulus donné. Impossible de stimuler une cellule olfactive par un bruit. Mais lorsqu'elle est stimulée par le doux fumet du poulet rôti, hop! elle envoie un signal électrique jusqu'au cerveau. Les cellules sensorielles, qui sont des neurones, transforment donc les signaux venus du monde extérieur (sons, odeurs, lumière, substances chimiques...) en signaux conventionnels que le cerveau comprend. Pour autant, le signal n'est pas perdu, et le cerveau analyse et intègre ces signaux sensoriels. Lorsque le signal est simple, une réponse est alors programmée par les zones cérébrales concernées. C'est par exemple l'image du poulet rôti qui se reconstitue.

Dans une situation environnementale où les stimuli sont plus complexes, la réponse à l'événement sera bien plus élaborée. Rappelez-vous votre balade en forêt à la recherche de champignons. Plusieurs stimuli sensoriels sont mis en jeu. Les potentiels d'action arrivent à de nombreuses synapses, qui libèrent divers neurotransmetteurs, lesquels activent certains neurones postsynaptiques, et en inhibent d'autres. Certaines synapses, dépitées de ne pas être stimulées, restent

silencieuses. D'autres silencieuses depuis un bout de temps se réveillent. Tous ces stimuli sensoriels vont provoquer des modifications à la fois morphologiques et fonctionnelles : des contacts synaptiques vont disparaître, d'autres vont se former et devenir actifs. Certaines parties du réseau neuronal sont stimulées pendant votre balade. Toutes ces modifications vont laisser des traces, c'est la plasticité cérébrale (encore appelée plasticité neuronale ou plasticité synaptique) déjà évoquée. Selon la durée et l'intensité des stimuli, l'empreinte durera plus ou moins longtemps. Ceci s'effectue probablement en plusieurs étapes : une rapide mais labile et une plus lente mais plus stable. Il peut y avoir passage de l'une à l'autre, mais comment ? Nous en reparlerons au prochain chapitre. Lorsque vous essayez de vous repérer dans l'espace, il y a même des cellules spécialisées, comme celles appelées « cellules de lieux » qui se mettent à décharger des potentiels d'action et qui déchargeront à nouveau si vous retournez dans ce même endroit et uniquement là !

L'idée de plasticité neuronale fut proposée, pour la première fois, en 1890 par William James dans *Principes de psychologie*. Néanmoins elle fut négligée, durant près de cinquante ans. Durant la première moitié du xx^e siècle, le consensus était que certaines zones du cerveau, comme le cortex, étaient immuables après l'enfance et plus particulièrement après une période critique de maturation du réseau (car il faut savoir que les différentes régions du cerveau continuent de mûrir après la naissance jusqu'à la fin de l'adolescence avec des rythmes différents). Seules certaines zones, comme l'hippocampe, siège de la mémoire, étaient réputées susceptibles de plasticité. C'est avec Santiago Ramón y Cajal, prix Nobel de médecine en 1906, que cette idée de plasticité

a été théorisée et utilisée, mais s'est heurtée longtemps à des résistances, ce qui ne témoigne pas d'une grande plasticité dans le cerveau des tenants du « fixisme » ! Geoffrey Raisman est considéré par la communauté scientifique comme le père de la plasticité neuronale à travers son article de 1969. Il permet d'établir pour la première fois, et de manière définitive, la capacité du cerveau à constituer de nouvelles synapses à la suite d'une lésion du cerveau chez l'adulte. Par exemple, après une lésion du cervelet, des axones peuvent repousser dans certaines conditions favorables et refaire des synapses sur les cellules clefs du cortex cérébelleux (celui du cervelet), les cellules de Purkinje; en même temps, les troubles de l'équilibre (appelés ataxie) et les troubles du mouvement rapide (hypermétirie, tremblement, nystagmus oculaire) s'atténuent nettement.

D'un point de vue morphologique, la plasticité consiste en l'apparition, la disparition ou la réorientation de structures comme des dendrites, des épines dendritiques, voire des axones. D'un point de vue fonctionnel, cette plasticité se caractérise par les modifications de l'excitabilité neuronale en fonction de l'« expérience » du neurone. Lorsque l'excitabilité est augmentée, le neurone postsynaptique répondra plus facilement à un potentiel d'action du neurone présynaptique, il est en fait plus sensible aux stimuli. À l'inverse, si l'excitabilité diminue, le neurone sera moins sensible aux potentiels d'action présynaptiques. Ceci se traduira dans les deux cas par un changement de la fréquence à laquelle le neurone déchargera en réponse à une stimulation. Plus il est sensible aux stimuli et plus il décharge fréquemment, et inversement.

Un des principes fondamentaux de la plasticité cérébrale est aussi lié au concept « d'élagage synaptique ». L'idée est simple : dans le cerveau, il n'y a pas de place pour le superflu.

Tout ce qui n'est pas utilisé est éliminé. Ainsi, les connexions entre les neurones sont éliminées lorsqu'elles ne sont pas utilisées. À l'inverse, ce mécanisme renforce les connexions très utilisées. Cela a pour conséquence de renforcer les réseaux de neurones qui sont synchronisés et de les séparer des autres neurones qui appartiennent à d'autres aires du cortex cérébral, répondant ainsi au postulat de Donald Hebb établi en 1949. Schématiquement, cette règle postule que lorsque deux neurones sont excités conjointement, il se crée ou se renforce un lien (c'est-à-dire le fonctionnement de la synapse) les unissant. Cette propriété joue un rôle essentiel dans le processus de mémorisation, nous la reverrons au chapitre suivant. Finalement, tout cela aboutit non seulement à la création mais aussi à la disparition de certains réseaux, sans compter que ceux qui persistent peuvent fonctionner plus efficacement ou plus lentement, moins fort, etc. Bref, tout est dynamique. Les neurobiologistes pensent que des phénomènes de ce type mis en jeu de manière répétée (dans l'entraînement) sous-tendent de nombreux apprentissages, par exemple jouer de mieux en mieux d'un instrument de musique.

Peut-on modéliser le fonctionnement du cerveau ?

Les propriétés anatomiques des neurones et leur organisation en réseaux ont fait, et font encore, l'objet de nombreuses études de modélisation par les scientifiques. Le but est de fournir des outils pour extraire ce qui est pertinent parmi des quantités énormes de données et développer de nouvelles pistes de recherches. Cette approche doit permettre de trouver des résultats qui n'apparaissent pas à partir des données brutes obtenues lors d'expériences effectuées par les biologistes.

La première formalisation mathématique du potentiel d'action est due à Alan Hodgkin et Andrew Huxley en 1952 qui ont établi un modèle permettant de rendre compte de la forme du potentiel d'action de l'axone géant de calmar. Le réseau le mieux connu actuellement est celui d'un petit réseau de neurones qui est responsable de la digestion chez le homard, et que l'on appelle réseau du «système pylorique du ganglion stomatogastrique du homard». Ce ganglion a été disséqué, dans tous les sens du terme, en particulier par Eve Marder, professeur à l'université de Brandeis à Boston (États-Unis). Ce petit ganglion contient précisément trente neurones qui ont un diamètre suffisamment gros pour être chacun bien identifié d'un animal un autre, ce qui est actuellement impossible à faire chez les vertébrés, et à fortiori chez l'Homme. Ces trente neurones envoient chacun un axone vers les différents muscles de l'estomac, coordonnant ainsi son activité.

Il existe de nombreuses critiques sur cette approche, mises en avant par Eve Marder elle-même. En fait, comprendre comment marche le cerveau nécessite beaucoup d'intuition. Il faut apprécier parmi une multitude de données, de détails biologiques, ceux qui sont pertinents et qui vont permettre d'aboutir à des principes généraux. Le biais est là. Pourquoi mettre en avant telle ou telle protéine (canal ionique, récepteur...) par exemple? Certains ont une importance réelle, d'autres moins et certains pas du tout, en tout cas dans une situation expérimentale donnée. Le poids de chaque détail peut d'ailleurs varier d'une situation à l'autre. De plus, l'analyse des données recueillies nécessite de nombreuses statistiques sophistiquées et des algorithmes que beaucoup d'utilisateurs ne comprennent pas toujours complètement! La mise en avant de tel ou tel point particulier choisi parce qu'il a potentiellement une fonction qui aide le calcul peut

ainsi conduire à l'élaboration de modèles qui explorent une fonction, mais qui n'ont pas de réalité physiologique. Il y a aussi des expérimentalistes qui tombent amoureux de telle ou telle molécule, ou de tel ou tel paramètre, et qui, comme en amour, perdent de leur objectivité et font prendre de l'importance à certains points particuliers qui en réalité n'en ont pas! Il faut vraiment avoir du flair et tenter de rester objectif! Ce n'est pas à la portée de n'importe qui.

Les risques que soulève l'accumulation considérable de données, obtenues en plus à des échelles différentes (du gène à la cognition, et du normal au pathologique), participant dans ce domaine du Big Data (et bientôt du Very Big Data), sont que ces données, à elles seules, ne suffisent pas à créer de la connaissance, tout particulièrement dans les sciences du cerveau. Pour atteindre ce but, il faut y associer un travail de conceptualisation très important, non seulement pour l'analyse des données à posteriori mais aussi en amont. Il faut avoir des hypothèses théoriques à priori pour organiser l'acquisition des données et même pour concevoir les outils nécessaires à leur interprétation: bref, il faut disposer d'une véritable théorie du cerveau, comme le rappelle le neurobiologiste français Yves Frégnac dans un excellent article paru en 2017 dans la revue *Science*. Cet auteur souligne les dangers de l'accumulation désordonnée de données et d'une mégascience fondée sur des projets de dimensions industrielles et justifiés, non par des hypothèses scientifiques elles-mêmes, mais par des promesses dont le résultat est présenté comme certain (élucider totalement le fonctionnement du cerveau alors que rien ne le garantit par exemple). Cette «economics of promises» des chercheurs anglo-saxons, qui est liée au Big Data, monte en puissance dans la technoscience moderne et pourrait

constituer un péril pour la recherche si les décideurs politiques qu'elle fascine en oublie les faiblesses.

Les limites et critiques de ces approches n'ont pas empêché en 2005 l'Union européenne de financer, à hauteur de 1,2 milliard d'euros sur dix ans, le très ambitieux projet *Human Brain Project* qui vise à simuler le fonctionnement du cerveau humain grâce à un superordinateur. Ce projet regroupe environ quatre-vingts instituts où travaillent plus de cent quatre-vingts responsables de recherche de vingt-quatre pays européens différents. En 2015, soit dix ans plus tard, un « champ de tonneau » du cortex de rat nouveau-né a été modélisé. Chez cet animal, chacune des moustaches appelées vibrisses active un ensemble précis de neurones dans le cortex, le champ de tonneau (les *barrels* des Anglo-saxons), qui occupe un volume d'à peu près 2 mm sur 1 mm de diamètre. La modélisation du cerveau humain dans sa totalité n'est donc pas pour demain ni même pour après-demain ! Des projets analogues existent également aux États-Unis comme le *Global Brain Initiative* annoncé par le président Barack Obama en 2013. Ce projet a des finalités plus médicales puisque l'ambition est, entre autres, de mieux comprendre les maladies d'Alzheimer et de Parkinson mais cette orientation ne fait pas disparaître les critiques de fond adressées par plusieurs neuroscientifiques.

Avoir une théorie du cerveau est d'autant plus nécessaire que la construction de l'ordinateur n'a rien à voir avec la manière dont le cerveau se met en place au cours du développement.

Le cerveau ne se construit pas comme un ordinateur

Construire un ordinateur, ce n'est pas simple mais faisable. Il faut choisir les composants, les assembler, installer le système d'exploitation. Si vous vous y connaissez un tant soit peu, vous y arriverez même si ça peut prendre un peu de temps. La construction du cerveau, c'est toute autre chose! Une première remarque intéressante consiste à comparer le nombre de gènes présents dans différentes espèces. Notre espèce en possède environ 23 000, à peine plus que le petit ver nématode *Caenorhabditis elegans* (18 212 gènes), et bien moins que la paramécie (39 642 gènes), la plante du riz (37 544 gènes), et à peu près autant que la souris! Et pourtant la taille du cerveau de souris n'a rien à voir avec celle d'un humain! Il y a, chez notre espèce, un développement incroyable du cortex et en particulier du cortex préfrontal, situé à l'avant du cerveau, dont nous reparlerons souvent dans ce livre. Ce n'est donc pas tant le nombre de gènes que leur diversité qui est importante et surtout la présence de mécanismes de régulation de leur expression qui devient très complexe et variée chez les organismes supérieurs. La modification de l'expression de certains gènes clés, que l'on appelle des «gènes maîtres», qui régulent l'expression de plusieurs milliers d'autres gènes, donc la production concertée de milliers de protéines, peut conduire à l'évolution et à la complexification du cerveau humain.

Une autre remarque est très importante: l'être humain consacre un temps fou au développement de son cerveau. Il est d'environ de quinze années. C'est-à-dire que les premiers *Homo sapiens*, dont la durée de vie était d'environ 30 ans, passaient la moitié de leur vie à construire leur cerveau!

Pendant tout ce temps, de nombreux processus de sélection ont lieu.

Lors de son développement, le système nerveux est plus réactif à certaines stimulations de l'environnement, lui permettant de connecter plus particulièrement certains neurones entre eux ou au contraire d'éliminer sélectivement des connexions déjà formées. On observe en effet au cours du développement une diminution du nombre de connexions, ce qui a amené Jean-Pierre Changeux dans son livre *L'Homme neuronal* à postuler que « *apprendre c'est éliminer* ».

Durant cette période, la plasticité est très augmentée. Des expériences de privation sensorielle sur les animaux ont pour conséquence de modifier le renouvellement des neurones du cortex sensoriel primaire chez le rat. Les célèbres expériences de Konrad Lorenz sur des oies en 1935 ont été les premières à mettre en évidence une période critique dans le phénomène d'attachement du petit pour sa mère. Dès la sortie de l'œuf et pendant les toutes premières heures de leur vie (12 à 16 heures), les oisillons sont dans une période critique qui les prédispose à suivre le premier objet en mouvement qu'ils voient, le plus généralement leur mère. Une fois cet attachement effectué il n'y a pas de retour possible et l'oisillon suivra cet objet, que ce soit un ballon ou sa mère. En parallèle, il est difficile de parler d'empreinte chez l'Homme, mais il y aurait une identification de la mère par le nourrisson. De façon analogue, de nombreuses expériences réalisées sur des chatons ou sur des singes nouveau-nés dont les paupières ont été cousues à la naissance (expériences de Carlson, 1990) entraînent un fort déficit sensoriel et des comportements anormaux.

Chez l'Homme, l'acquisition du langage, de l'écriture et de la lecture non seulement participe à la construction du cerveau, mais laisse une empreinte faiblement réversible. Par

exemple, un individu qui devient aveugle est toujours capable d'écrire.

Cette construction au cours du développement aboutit à la construction de l'identité personnelle. Le manque de stimulations spécifiques de l'environnement pendant l'enfance a pour conséquence un déficit de conscience de soi, et en particulier un déficit de langage. L'exemple le mieux connu est celui d'un enfant humain trouvé dans l'Aveyron en janvier 1800, surnommé l'enfant sauvage: il ne parle pas et se comporte comme un animal. Il est envoyé à Paris et est suivi par un médecin, Jean-Marie Itard. Le suivi dura onze années. Cet enfant sauvage, renommé Victor, intrigua toute l'Europe. Les résultats furent maigres. Victor devint affectueux et put apprendre à répondre à quelques instructions verbales, mais il ne put jamais apprendre à parler. En ce qui concerne le langage, on le sait, l'apprentissage des langues étrangères est d'autant plus performant que l'enfant est jeune. Apprendre une langue après 12/15 ans demande des efforts considérables. C'est bien connu, plus on vieillit, moins on est malléable.

Ordinateur et cerveau... À chacun ses performances

Le cerveau est souvent comparé à un ordinateur. Il est vrai que les deux possèdent un grand nombre d'unités élémentaires, respectivement les neurones et les transistors, câblés les uns aux autres pour former des circuits complexes capables de traiter l'information. L'architecture globale du cerveau et celle de l'ordinateur peuvent aussi, à première vue, se ressembler. Tous deux présentent une entrée, une sortie, un centre de traitement et une mémoire. Tous deux forment un ensemble

complexe et interconnecté, qui envoie et reçoit des données, les classent, les emmagasinent et les utilisent pour résoudre des problèmes. Mais l'analogie s'arrête là.

L'ordinateur présente des performances supérieures au cerveau si l'on considère la vitesse et la précision. Il réalise aujourd'hui des opérations aussi élémentaires qu'une addition à une vitesse de 10 milliards d'opérations par seconde. Pour le cerveau, si on prend en compte la vitesse de propagation du potentiel d'action et le franchissement de la synapse, la vitesse est au mieux de cent opérations par seconde. L'ordinateur est donc beaucoup plus rapide que le cerveau. Comment l'expliquer? L'analogique et le numérique sont deux procédés pour stocker et transporter des données. L'informatique utilise uniquement le numérique. L'unité de mesure pour l'ordinateur se fait en *bits* (le fameux système binaire 0 et 1). Le signal n'est qu'une suite de 0 et de 1, il n'a que deux amplitudes. Dans le cerveau, le signal peut fonctionner en numérique, mais également en analogique: il peut prendre une infinité de valeurs. L'ordinateur est donc beaucoup plus précis que le cerveau.

Une autre différence notable entre l'ordinateur et le cerveau est la méthode de traitement des données qui peut se faire en série et/ou parallèle. Pour l'ordinateur, chaque élément de base, le transistor, ne prend qu'un petit nombre d'entrées (1 à 3). L'assemblage des transistors constitue des circuits qui, assemblés à leur tour, forment des processeurs. Le cerveau utilise aussi le traitement des données en série (par exemple lors d'un réflexe simple), mais il emploie aussi massivement le traitement en parallèle, prenant avantage du grand nombre de neurones et de ses connexions. Le traitement en parallèle existe aussi dans un ordinateur. Le parallélisme consiste alors à exécuter simultanément, sur plusieurs processeurs différents,

des instructions relatives à un même programme. Cela se traduit par le découpage d'un programme en plusieurs processus traités en parallèle afin de gagner en temps d'exécution. Mais même 1 000 processeurs en parallèle ne feront jamais un réseau de neurones. Dans le cerveau, le cheminement se fait massivement en parallèle. Rappelons que chaque neurone possède en moyenne 10 000 entrées (les contacts synaptiques) et le même nombre de sorties (terminaisons axonales) et parfois beaucoup plus! Lors de l'exécution d'une tâche, il n'y a pas un seul réseau de neurones qui est activé, mais plusieurs qui travaillent en parallèle. Par exemple, dans une tâche visuomotrice, on estime que 50 à 60 zones différentes sont mises en jeu. De plus, dans le cerveau, les informations ne voyagent pas en ligne droite – excitation et inhibition limitent le nombre de chemins possibles, permettant un meilleur traitement de la tâche à effectuer. Bien sûr, tout cela est très schématique. D'éminents informaticiens vous diront que c'est beaucoup plus compliqué. Mais les neurobiologistes vont dire aussi la même chose!

Une autre différence essentielle: il y a discontinuité dans le réseau neuronal d'un point de vue électrique puisqu'au niveau des synapses, la transmission de l'information d'un élément à l'autre se fait par des molécules chimiques. Or s'il y a discontinuité dans l'architecture de l'ordinateur, celui-ci tombe tout simplement et tout bonnement en panne. Le plus souvent, il vaut mieux d'ailleurs en acheter un autre que d'essayer de le réparer! Cette différence est essentielle car le câblage à lui seul ne peut rendre compte des propriétés du réseau neuronal. Toutes ces molécules chimiques vont jouer un rôle fondamental dans le fonctionnement du réseau, modulant positivement ou négativement son activité, chose que l'ordinateur ne sait pas faire (c'est d'ailleurs

cette propriété qui est la cible de nombreuses molécules pharmacologiques).

Enfin, une autre différence considérable entre l'ordinateur et le cerveau est l'énergie consommée. Le cerveau, avec tous ses milliards de neurones, ne constitue qu'un petit volume consommant très peu d'énergie, environ 20/25 watts. Alors que les performances des microprocesseurs (unités centrales de traitements de données d'un ordinateur) sont principalement liées à leur vitesse, le cerveau s'appuie sur son organisation pour réduire l'énergie. Reprenons cette comparaison : lorsqu'il s'agit de simuler la communication entre 100 milliards de neurones établissant 100 000 milliards de synapses, l'ordinateur IBM le plus puissant du monde, Sequoia, avec ses 1,5 million de milliards d'octets, doit développer une puissance électrique de 12 gigawatts (12 milliards de watts). Les 100 milliards de neurones qui composent le cerveau humain moyen représentent plus de 40 petaflops (soit 40 millions de milliards d'opérations par seconde) de puissance de traitement ce qui est encore bien plus que Sequoia qui n'est parvenu à réaliser que 16 millions de milliards d'opérations de calcul en une seconde!

Les ordinateurs nous dépassent donc par leur capacité de stockage et de traitement de gros volumes de données, mais le cerveau est imbattable dans sa densité, sa complexité, son parallélisme et sa faible dépense énergétique. L'avantage est que le cerveau, par les molécules chimiques mises en jeu, est capable de communiquer des informations « floues » comme l'humeur, la souffrance, le bonheur... L'ordinateur en est incapable, même si certains chercheurs travaillent actuellement à ajouter de l'empathie chez les robots pour en faire des « robots sociaux ». Les performances dans ce domaine

sont encore rudimentaires si on les compare aux émotions humaines.

Les trois « acteurs » du cerveau – les neurones, les cellules gliales et les synapses – forment donc un réseau complètement différent de celui construit grâce à l'intelligence artificielle. Au lieu de considérer que l'ordinateur va surpasser les possibilités de cerveau humain, certains préfèrent envisager d'améliorer l'ordinateur non seulement en s'inspirant du cerveau humain (méthodes dites bio-inspirées), mais en incorporant dans les microprocesseurs de véritables neurones. Oshiorenoya Agabi, lui, est convaincu qu'il manque un élément décisif aux processeurs qui miment le cerveau humain : un vrai cerveau ou du moins, des cellules nerveuses vivantes. Sa start-up, Koniky, se vante d'être « *la première et unique entreprise de la planète à construire des puces à partir de neurones maintenus vivants* » dans l'espoir de rendre celles-ci plus puissantes que ses ancêtres en silicium. Inutile de dire que nous n'en sommes qu'au stade de prototype et que les problèmes à surmonter sont très très complexes !

Finalement, que faut-il retenir ?

Les milliards de neurones pré et postsynaptiques forment, avec les cellules gliales, un réseau neuroglial d'une extrême complexité. Certes, la machine peut être plus performante que le cerveau dans certaines tâches, mais le cerveau n'est pas statique, il n'est pas construit une fois pour toutes. Il est dynamique, en permanence bombardé par des informations en provenance du milieu intérieur et de l'environnement qui vont modifier son fonctionnement et laisser une empreinte plus ou moins labile. S'adapter à son environnement, c'est

ÇA VA PAS LA TÊTE!

vital pour tous les organismes vivants. Est-ce qu'un ordinateur est sensible à son environnement? Oui, s'il fait trop chaud, s'il y a une panne d'électricité ou s'il tombe à l'eau! Le cerveau de l'Homme, lui, sait s'adapter, il le fait à merveille et chaque individu y parvient à sa manière car son cerveau est unique.

CHAPITRE 3

Mon cerveau est unique

Nous sommes en 2050. Louis vient de rencontrer Léon. C'est un vieil ami. L'été dernier, Léon n'était pas très en forme. Il « déclinait » disait-il. Ses performances intellectuelles s'effritaient et pour la première fois son QI était tombé à 130. C'est vrai, il y avait de quoi se faire du souci ! Il allait devoir suivre des séances d'entraînement dans des centres de rééducation. Mais aujourd'hui, Léon rayonnait. Il venait de passer un nouveau test de QI et il avait obtenu 160 ! Il y a quelques semaines, on lui avait implanté une puce dans le cortex préfrontal et cela fonctionnait à merveilles. Il redevenait très efficace dans son travail et c'était remarqué. Il soutenait des conversations sur des sujets très pointus. Quant à Louis, ça allait bien d'un point de vue cognitif, mais par moments il avait quelques soucis avec sa mémoire. Non ce n'était pas un début de maladie d'Alzheimer. De ce côté-là, il était tranquille. Il y a bien longtemps qu'il s'était fait mettre un implant contre toutes les maladies neurodégénératives. Non, c'était plutôt la mémoire de travail.

ÇA VA PAS LA TÊTE!

Il avait parfois du mal à prendre des notes, à stocker des informations temporaires et quand il devait s'en souvenir, il n'arrivait plus à les exprimer correctement. Il avait aussi quelques problèmes d'attention. C'était ennuyeux, car les implantations dans l'hippocampe ne se faisaient pas encore en routine du fait que cette structure se trouvait en profondeur dans le cerveau, il fallait traverser le cortex pour l'atteindre. Et puis, était-ce son hippocampe qui était responsable de ces troubles? Même en 2050, on ne savait pas encore tout!

Tout cela sera-t-il réalisable dans un futur proche? Deviendrons-nous tous super-intelligents? Pourrons-nous augmenter à l'envi telle ou telle fonction cognitive? Quelles seront les conséquences sur notre conscience, notre esprit? Et est-ce souhaitable?

Comme beaucoup d'autres animaux, les êtres humains construisent et renouvellent leur représentation du monde à partir de deux sources fondamentales: la perception et la mémoire. Faute de percevoir, l'Homme ne saurait rien de son environnement. Sans mémoire, il ne pourrait adapter sa conduite aux changements de son environnement et donc apprendre.

Pas de conscience de soi sans mémoire

La conscience de soi institue l'Homme comme un sujet, capable de dire «je suis» et entretenant des rapports particuliers au monde et à lui-même grâce à son système cognitif et donc son cerveau. Un système cognitif est capable de traiter les informations sensorielles (visuelles, auditives, olfactives, tactiles et gustatives) et somesthésiques (sensations), ainsi que des données reflétant l'état émotionnel du sujet. Il intègre des

informations venues de différentes zones du cerveau, les sélectionne, les code sous différentes formes, les organise dans la ou les mémoires et les restitue quand il le faut. La conscience de soi est donc l'accès à un moi qui garde son identité dans le temps et donc a besoin de la mémoire. Le philosophe Henri Bergson disait : « *Toute conscience est mémoire.* » L'Homme a pu en outre développer les formidables outils de communication que sont le langage et, plus tardivement acquise, l'écriture. Parce que chacun n'est pas soumis aux mêmes stimuli et que chacun les traite et communique à sa manière propre, l'ensemble de ces fonctions cognitives fait que le cerveau d'un individu est unique et fonde son identité.

Mais d'abord, qu'est-ce que la mémoire ? Tous les êtres vivants, même les plus élémentaires, sont capables de mémoriser. La mémoire existe également dans des machines comme un ordinateur. Mais dans les deux cas, le même mot désigne des choses très différentes !

Pour l'ordinateur, c'est simple, bien que maintenant on distingue la mémoire vive de la mémoire tout court. La mémoire d'un ordinateur est un dispositif électronique qui stocke les informations et ce même si vous éteignez votre ordinateur. La mémoire vive ou la mémoire RAM (*Random Access Memory*) est présente tout le temps que l'ordinateur est en marche, et disparaît lorsque vous décidez de l'éteindre. Certes, on dit aussi que certains individus ont une mémoire « vive », c'est-à-dire qu'ils « pigent » vite, mais cela n'a rien à voir avec la mémoire vive d'un ordinateur !

Pour les êtres vivants, c'est bien plus compliqué et de nombreux chercheurs se sont cassé la tête sur le sujet. Quelques espèces leur ont servi de modèles de référence pour étudier les bases neurobiologiques de la mémoire. C'est le cas de la mouche drosophile (star de la génétique dont on peut

ÇA VA PAS LA TÊTE!

faire de nombreux mutants: sans poils, sans yeux, englué, brûlé...), et de l'aplysie (limace, lièvre ou escargot de mer qui, selon son alimentation, ressemble un peu à une courgette ou à une aubergine, mais qui exhibe toujours dix ganglions de deux mille neurones, dont certains sont visibles à l'œil nu).

Chez l'humain, dont la mémoire est la plus complexe de tout le règne animal, les études sont encore plus compliquées. Notre espèce présente des mémoires similaires à celles d'un organisme composé d'une seule cellule: même l'ADN, dont sont dotés tous les êtres vivants, peut être considéré à lui seul comme un système mémoriel. Mais l'Homme a aussi développé un système nerveux raffiné dans lequel coexistent plusieurs systèmes de mémoires. De plus, il possède un langage sophistiqué qui participe à la construction de la mémoire. Enfin, l'écrit joue un rôle majeur dans l'entretien de la mémoire personnelle (l'écrivain Marcel Proust en est un bon exemple!), historique ou collective (en témoigne par exemple, notre attachement à l'endroit et aux us et coutumes du lieu où l'on vit).

Pas d'apprentissage sans mémoire... et vice versa

On confond souvent la mémoire avec l'apprentissage. En réalité, les deux sont liés. C'est un peu comme l'œuf et la poule. Pour retenir, il faut d'abord avoir appris; mais il faut retenir (autrement dit stocker des connaissances à plus ou moins long terme) pour apprendre! Prenons un exemple: j'apprends une nouvelle langue en l'étudiant, mais je la parle ensuite en puisant dans ma mémoire les mots appris. La mémoire est donc essentielle à tout apprentissage puisqu'elle permet le stockage et le rappel des informations apprises. Au

fond, la mémoire n'est rien d'autre que la trace qui reste d'un apprentissage.

La mémoire a d'abord été considérée comme la simple réserve des souvenirs. Dans la seconde partie du XIX^e siècle, le psychologue allemand Hermann Ebbinghaus fut le premier à conduire des expériences en laboratoire sur la mémoire, et en particulier sur lui-même. Il a pu montrer que certains souvenirs sont de courte durée, d'autres de longue durée et que la répétition permet la consolidation des souvenirs. Puis le philosophe américain William James décrivit deux sortes de mémoires : une mémoire à court terme, qui porte sur un nombre réduit d'informations, et une mémoire à long terme qui porte sur un nombre plus important d'informations et nécessite des répétitions multiples pour être conservée.

Des expériences dites de conditionnement ont été ensuite menées. Les plus célèbres sont celles d'Ivan Petrovitch Pavlov, dans les années 1890, qui a décrit chez le chien le conditionnement que tout le monde connaît : association d'un stimulus neutre – le son d'une cloche – qui ne provoque aucune réponse, et d'un stimulus appelé inconditionnel – la présentation d'un morceau de viande par exemple – qui provoque une réponse, dans ce cas la salivation de l'animal ; après cette association, le stimulus neutre déclenche à lui seul la salivation. Un peu plus tard, Edward Thorndike a étudié, chez l'animal puis chez l'Homme, le conditionnement « opérant », où le stimulus influence et renforce positivement ou négativement la réponse. C'est ce processus qui est mis en jeu dans la prise de drogues addictives. L'apport de ces « behavioristes » (du mot anglais *behavior* qui signifie comportement) est que les souvenirs se forment non seulement sous forme d'images, mais également de sons et d'éléments qui ont du sens (« signifiants »).

Enfin, les sciences cognitives ont révolutionné la manière d'aborder l'étude de la mémoire. Selon le psychologue Edward Tolman, tout apprentissage consiste en l'acquisition de « cartes cognitives » qui permettent de cerner et organiser tout ce que l'on sait sur un sujet. Un autre psychologue, Frédéric C. Bartlett, a été un des premiers à comprendre que la récupération des informations mises en mémoire, pour faire remonter un souvenir à notre conscience, est un phénomène complexe. Dans une expérience célèbre effectuée dès 1932, Bartlett a présenté à des volontaires des images sans aucune signification ; lorsque les sujets se les remémorent beaucoup plus tard, on s'aperçoit qu'ils les ont organisées pour leur donner une signification.

Une mémoire ou des mémoires ?

À la même époque, les neurochirurgiens avaient une drôle d'occupation : ils excisaient les zones malades du cerveau de leurs patients atteints de crises d'épilepsie rebelles. L'un d'eux, Wilder Penfield, prenait quand même la précaution de stimuler plusieurs régions du cerveau des futurs opérés pour repérer les zones dont la suppression aurait induit des dommages considérables ! Sans doute certains patients ont fait les frais d'excisions hasardeuses de neurochirurgiens moins sérieux qui n'avaient pas pris ces précautions ! Plus tard, William Scoville et surtout Brenda Milner étudièrent un patient devenu célèbre, le patient H.M. Quand il était enfant, H.M. avait développé une forme grave d'épilepsie difficile à combattre. Les traitements traditionnels étaient inefficaces et H.M. dut subir l'ablation des régions médianes de ses lobes temporaux. La chirurgie soulagea fortement l'épilepsie, mais laissa

H.M. avec une amnésie très sévère : il ne pouvait se rappeler les événements récents que pendant quelques minutes et était incapable de former des souvenirs à partir de nouvelles expériences ! Par exemple, après avoir discuté avec lui pendant quelques instants puis quitté la pièce, on s'apercevait, en revenant le voir, que H.M. ne se souvenait pas de cet échange. L'homme était tout simplement incapable de mémoriser de nouvelles informations. Il avait aussi perdu ses repères dans le temps et dans l'espace. En revanche, il se rappelait très bien de son enfance. Le suivi de ce patient pendant quarante ans a permis des découvertes majeures sur la mémoire en général, et les différentes mémoires qui la composent (nous y reviendrons). En effet, ces déficits sélectifs de certaines formes de mémoire indiquaient que plusieurs structures du cerveau étaient mises en jeu dans les différents types de mémoire.

Enfin, deux disciplines ont permis, ces dernières années, des avancées majeures pour essayer d'entrouvrir la « boîte noire cérébrale » : la biologie, bien sûr, avec la découverte des gènes et des fonctions des protéines qu'ils codent, l'étude de la plasticité cérébrale, celle du comportement à l'aide d'organismes simples (drosophile, petits vers comme *C. elegans*) ou plus proches de l'humain (souris transgéniques, etc.) ; et en second lieu l'imagerie médicale avec la TEP (tomographie par émission de positons) et l'IRM (imagerie par résonance magnétique) fonctionnelle. Ces deux disciplines ont permis de confirmer que différentes régions cérébrales sont impliquées dans la mémoire. Chaque région stocke un aspect de cette mémoire, comme différentes parties d'un tout.

Si nous considérons le système cognitif comme un système de traitement des informations, la mémoire, au sens commun du terme, serait alors une simple base d'informations, à

l'image du disque dur d'un ordinateur. Cette vision est celle du « computationnalisme » (du latin *computare*, « calculer »), théorie philosophique qui estime que la cognition manipule des symboles et résout des problèmes logiquement à la manière d'un ordinateur. Elle découle de l'étude de l'intelligence artificielle et prend ses sources dans la psychologie cognitive. Pour les « computationnalistes », la mémoire est située dans des modules indépendants et l'information est traitée suivant une « découpe » temporelle (court et long terme) et décrite de manière symbolique et hiérarchisée. Mais la réalité est bien plus complexe.

En 1968, Richard Atkinson et Richard Shiffrin avec d'autres, ont proposé que l'information passe par trois stades successifs : la mémoire sensorielle, la mémoire à court terme et la mémoire à long terme. Alan Baddeley et Graham Hitch, en 1974, ont modifié ce modèle en introduisant un quatrième élément, la mémoire de travail. Mais certains phénomènes sont difficilement concevables avec ces modèles. Et au final, il importe peu qu'il existe trois ou quatre mémoires. En effet, en étudiant, entre autres, les images de TEP, les chercheurs ont observé qu'une tâche cognitive donnée « illumine » plusieurs parties du cerveau presque simultanément, et non pas les unes après les autres comme le prédit la théorie d'Atkinson. Par exemple, rien que pour calculer $21 - 12$, la moitié du cerveau est mise à contribution ! De plus, si la mémoire à long terme intervient uniquement en bout de chaîne, comment expliquer les différences individuelles de l'adaptation des réactions à l'environnement ? Pour répondre à ces questions, le psychologue américain Nelson Cowan a proposé que la mémoire à court terme et la mémoire à long terme fassent en fait partie d'un seul et même ensemble, et non pas de plusieurs modules différents.

En essayant de faire la synthèse des nombreux efforts menés par les biologistes et les physiologistes pour dévoiler les processus de mémorisation, voyons plus précisément ce qu'il faut savoir de ces différents types de mémoire.

La plus simple des mémoires

Lorsqu'un organisme se trouve face à quelque chose de nouveau, il extrait d'abord les données sensorielles de l'environnement. Dans notre mémoire sensorielle, nous stockons les stimuli bruts. C'est déjà une sorte de mémoire car la trace du stimulus est encore présente, bien qu'il ait lui-même disparu. Chez l'Homme, la mémoire sensorielle est très fidèle mais brève, de l'ordre de 300 millisecondes à 2 secondes. Par exemple, si dans l'obscurité, nous déplaçons rapidement une bougie, nous voyons un trait de lumière. Si l'on déplace lentement la bougie, nous ne verrons plus la traînée de lumière. C'est d'ailleurs cette propriété de la mémoire qui est utilisée pour confectionner un film : la succession des images donne l'illusion que le mouvement est continu. Tous les organes des sens sont concernés. L'audition est sollicitée de la même façon. Heureusement ! Car s'il en était autrement, nous oublierions le début d'une phrase, ou même d'un mot s'il est long, et le sens des discours aurait alors du plomb dans l'aile ! Cette mémoire peut aussi concerner les odeurs, notamment chez le chien qui piste la trace de ses maîtres grâce à son flair prodigieux !

Dans le premier chapitre, nous avons vu que l'apprentissage supervisé est à la base du *deep learning* et des progrès réalisés par l'intelligence artificielle : on fournit en entrée de la machine une photo d'un objet, par exemple une voiture, et on lui donne la sortie désirée, l'étiquette « voiture ». Puis, on lui

montre la photo d'un chien avec la sortie désirée, l'étiquette «chien». Après avoir montré à la machine des milliers ou des millions d'exemples étiquetés avec leur catégorie, celle-ci devient capable de classer correctement la plupart d'entre eux. Fait plus intéressant, elle peut généraliser et aussi classer correctement des images de voiture ou de chien qu'elle n'a jamais vues.

La mémoire sensorielle pourrait en première approximation s'apparenter à l'apprentissage dit supervisé. Par exemple, à force d'entendre le voisin qui déménage ses poubelles et les différentes variantes de bruit qui lui sont associées, on sait l'identifier à coup sûr. Mais lorsque pour une fois, ce ne sont pas les poubelles du voisin, mais le tonnerre qui gronde, on peut confondre! Cependant, même cette mémoire, la plus simple des mémoires biologiques, est bien plus complexe que l'apprentissage supervisé.

En effet, dans la vie courante, nous regardons des scènes en mouvements et en trois dimensions et non pas des images très brèves. Les informations sensorielles sont prélevées de manière sélective. Cette sélection est précieuse car elle empêche notre mémoire d'être submergée par trop d'informations parfois inutiles. Toutefois, si un stimulus sort du «bruit de fond» (un bruit sourd, un chien qui aboie ou un flash lumineux), il pourra être remarqué. Ce qui est, là aussi, très précieux pour pouvoir réagir en cas de problème!

Nous sommes aussi capables de retenir des stimuli de manière non sélective ou inconsciente. Prenons un exemple: lors d'une expérience, des volontaires entendent par les oreillettes d'un casque un texte dans l'écouteur droit et un autre dans l'écouteur gauche. Ils doivent répéter le texte diffusé dans une oreillette au fur et à mesure pour qu'ils ne puissent pas écouter le message de l'autre oreillette. Résultat: ils

peuvent répondre précisément à des questions sur le message écouté; en revanche, ils ne peuvent pas se rappeler le contenu de l'autre message, mais ils peuvent dire qu'il y a eu des changements en cours de message: intensité plus forte, voix féminine, puis masculine... Tout ceci veut dire que des traces de cet autre message existent, mais qu'elles n'ont pas pu être traitées. Elles sont restées inconscientes. Le cerveau ne fait qu'une chose à la fois! Nous en reparlerons à la fin de ce chapitre.

Des mémoires fugaces

Nous faisons tous l'expérience de souvenirs qui nous échappent. L'exemple le plus classique de mémoire à court terme est celui de la réminiscence d'un numéro de téléphone inconnu jusqu'alors. Si nous ne pouvons le noter sur un bout de papier, nous allons le répéter mentalement (discours intérieur) ou verbalement jusqu'à l'exécuter correctement sur le cadran téléphonique. Après quoi, il sera oublié aussi rapidement! Si on ne le répète pas ou si nous sommes dérangés par autre chose, même peu de temps, nous ne nous souviendrons plus de ce numéro. Mais si nous voulons retenir le numéro de téléphone pour un rappel différé, nous devons utiliser un moyen mnémotechnique: une structuration des chiffres comme la date de naissance, la date du jour, l'âge de son fils, une suite de chiffres, par exemple.

Cette expérience banale du quotidien illustre très bien certains éléments de la mémoire:

1. Il existe deux sortes de mémoires (une à court terme et l'autre à long terme) qui ne fonctionnent pas de la même manière.

ÇA VA PAS LA TÊTE!

2. La mémoire à court terme ne conserve que certaines informations, et encore, pour garder une information plus longtemps en mémoire, nous devons la répéter.

3. L'oubli peut survenir même après une répétition!

En raison de ces propriétés ou plutôt de ces limites, on ne peut clairement pas tout retenir facilement; ceci a conduit à définir «l'empan de mémoire», autrement dit le nombre d'items maximum dont on peut se rappeler immédiatement après une seule présentation. Il fut découvert par le psychologue allemand Hermann Ebbinghaus que nous avons déjà évoqué et qui fut le premier à conduire des expériences en laboratoire sur la mémoire. Ebbinghaus a découvert que l'empan de mémoire est de 5 à 9 items. Pour l'illustrer, voici un petit jeu: lisez les cinq lignes suivantes et essayez de les retranscrire ensuite sur un papier.

12 35 46

54 89 21 35

17 29 38 54 41

65 88 34 59 18 67

37 52 18 24 97 44 31

Etc.

Alors, combien en avez-vous retenu? L'empan de mémoire peut être considéré comme la capacité maximale de la mémoire à court terme. Toutefois, cette définition est bien trop générale. Le nombre de mots retenus dans une série de mots est, par exemple, plus important quand les mots sont courts que quand ils sont longs:

radis, gilet, pluie;

soleil, parapluie, courgette, bateau;

ordinateur, transhumanisme, oligodendrocyte, topinambour, computationnalisme;

Etc.

Cependant, des travaux fondés sur la mémorisation de listes de mots plus longues que la taille de l'empan (entre 10 à 30 mots) suggèrent que la mémoire à court terme est plus complexe que prévu. Comme la mémoire à court terme est limitée, les nouvelles informations remplacent les anciennes. Et l'information contenue dans cette mémoire subit des sorts différents puisqu'elle peut être soit oubliée soit incorporée dans la mémoire à long terme.

Autre exemple de mémoire maintenue de manière temporaire dans le cerveau: la «mémoire de travail». De quoi s'agit-il? Nous savons intuitivement que, pour des activités cognitives complexes, nous devons stocker provisoirement des informations pour nous en servir par la suite. La lecture est un exemple type où il faut coordonner de multiples processus pour la compréhension d'un texte: se rappeler ce que vous avez lu précédemment pour pouvoir comprendre la suite est évidemment indispensable. Essayez de comprendre une phrase du Code civil ou une phrase d'un acte notarié sans avoir compris ce qui précède!

Les exemples de mise en œuvre de la mémoire de travail sont multiples: maintenir des résultats partiels en mémoire lors d'un calcul mental (additionner 126 et 98 – il y a une retenue – c'est plus compliqué!), suivre une conversation (surtout si cela ne vous intéresse pas!), résoudre un problème (pourquoi ce maudit tiroir ne veut-il pas s'ouvrir?), prendre des notes (vous devez comprendre le texte de votre interlocuteur ou bien de celui qui parle tout en écrivant ce qu'il a dit auparavant)... Dans toutes ces situations, c'est la mémoire de travail qui bosse! Elle n'est en fait qu'une mémoire à court terme mais plus élaborée. À quoi ressemble-t-elle? Comme la mémoire à court terme, c'est une mémoire à capacité

limitée, permettant le stockage temporaire et la manipulation d'une information pendant la réalisation de tâches cognitives diverses. Pour employer une métaphore, quand nous utilisons un ordinateur, la mémoire vive correspond plus ou moins à la mémoire de travail, à l'exception près qu'elle ne disparaît que lors de la mise hors tension de l'ordinateur, alors que l'extinction de la mémoire de travail est plus rapide. Mais la mémoire de travail permet le traitement des informations pour le passage dans la mémoire à long terme, et aussi, en sens inverse, le rappel, à des moments opportuns, d'informations critiques présentes dans la mémoire à long terme.

Selon le modèle de Alan Baddeley et Graham Hitch, évoqué plus haut, la mémoire de travail est composée de plusieurs modules: 1. des «systèmes esclaves» (il en existe même dans les sociétés «modernes»!) qui stockent les informations verbales, les informations visuelles et spatiales (non-verbales); 2. un administrateur central ou «système attentionnel» (il faut toujours un chef!) qui sélectionne, contrôle, planifie, et intègre les opérations de traitement effectuées par les systèmes esclaves; 3. et le «buffer» épisodique, sorte de mémoire-tampon temporaire (la secrétaire du patron qui joue souvent un rôle de «tampon»!). La mémoire de travail sert donc non seulement de stockage temporaire, mais elle traite également les informations pour les transmettre, s'il le faut, dans la mémoire à long terme.

De la mémoire à court terme à la mémoire à long terme

Le passage entre ces deux mémoires s'appelle la consolidation. Il s'opère si l'information est répétée et/ou si elle a une valeur affective importante, aussi futile soit-elle, pour le sujet.

Mais, comme on l'a vu, la mémoire à court terme a une capacité limitée et elle est sans cesse stimulée par les événements nouveaux de l'environnement qui expulsent les représentations plus anciennes. Si le stimulus est nouveau et/ou « très signifiant », des processus de sauvegarde se mettent en place. Lorsque l'information passe dans la mémoire à long terme, elle y est organisée et intégrée aux connaissances précédentes. Dans le modèle d'Atkinson évoqué plus haut, les deux systèmes de mémoire sont complètement séparés et l'information doit forcément passer par le court terme pour activer le long terme. Si cela était vrai, en cas de déficience quelconque de la première, la mémoire à long terme ne pourrait pas encoder de souvenirs ! Or, l'analyse par Tim Shallice et Elizabeth Warrington de certains patients ayant eu des traumatismes crâniens suggère la possibilité d'accéder à la mémoire à long terme sans passer par la mémoire à court terme. Le passage de la mémoire à court terme à la mémoire à long terme n'est donc pas systématique.

Ces constatations ont poussé Fergus Craik et Robert Lockhart à proposer en 1972 la théorie des « niveaux de traitement ». La « profondeur » du traitement d'une information permet à l'individu de la restituer plus ou moins facilement par la suite : juger si un mot est plaisant ou pas requiert un niveau de traitement plus « profond », c'est-à-dire plus complexe ou plus sophistiqué, que la mémorisation simple de ce mot. On pourrait distinguer deux niveaux de traitement. Un premier consiste simplement à répéter les choses pour les maintenir actives en mémoire (comme l'expérience du numéro de téléphone). Vos professeurs vous ont sûrement dit à l'école que pour apprendre il faut répéter ! Eh bien !, les neurosciences leur ont donné raison ! L'apprentissage montre que la pratique intensive permet de mieux stocker les souvenirs. Raison pour

laquelle des experts dans un domaine peuvent plus facilement se souvenir de situations relatives à leur domaine que des personnes « naïves ». Ainsi, à force de répétitions, le célèbre chef d'orchestre Arturo Toscanini connaissait par cœur environ deux cent cinquante œuvres pour orchestre et une centaine d'opéras. Plus bluffant peut-être, les maîtres dans le jeu d'échecs peuvent jouer simultanément plusieurs parties, même les yeux fermés et se rappeler tous les coups joués et la position de toutes les pièces.

Le second traitement, plus profond, consiste à donner du sens : c'est la « répétition élaborée » au cours de laquelle s'effectue un traitement sophistiqué dit « profond » (ou sémantique, rien à voir avec le *deep learning*!). Plus le travail sémantique est important, plus la mémorisation en sera facilitée. Supposons qu'on vous présente une liste de mots à apprendre, chaque mot étant visible quelques secondes : si on ne fait que répéter le mot pendant ces quelques secondes, on ne retiendra que peu de mots. Si on imagine une histoire avec tous les mots, le rappel sera bien meilleur, parce qu'on leur aura donné du sens!

Les émotions chamboulent tout!

La mémoire dite émotionnelle échappe à cette hiérarchisation puisque, en fonction de l'intensité de l'émotion ressentie, un seul événement ou situation peut suffire pour que le souvenir perdure toute la vie. Elle n'a pas besoin de répétition. Les émotions jouent d'ailleurs un rôle fondamental dans la construction de nos souvenirs. Plus l'émotion est forte (mariage, naissance d'un enfant, accident, attentat, perte d'un être cher...), plus le souvenir est fort. À l'inverse, il n'est

pas rare que lors d'un choc traumatique important, un accident de voiture ou un viol par exemple, l'émotion ressentie provoque des phénomènes d'oubli, le sujet étant incapable de se rappeler les circonstances de l'accident ou de l'agression.

Les émotions mettent en jeu différentes régions du cerveau. Elles provoquent plusieurs manifestations corporelles : modification des fréquences cardiaque et respiratoire, du débit sanguin, de la transpiration... Le responsable de cette expression corporelle est une petite structure, pas plus grosse qu'une noisette, située à la base du cerveau appelée l'hypothalamus. C'est une glande qui régule la sécrétion de toutes les hormones du corps et supervise le fonctionnement de la plupart des organes internes ; le tout grâce à la complicité du système nerveux dit autonome car il échappe à la volonté gérée par le cortex frontal. En revanche, les émotions ne sont pas traitées par un « centre » unique du cerveau, mais par des « systèmes composés » de plusieurs unités cérébrales reliées.

Deux émotions simples – la peur et le plaisir – ont fait l'objet de nombreuses études car elles sont communes à l'humain et à de nombreuses espèces animales. Plusieurs circuits sont impliqués. La composante essentielle du circuit de la peur est l'amygdale, une petite structure en forme d'amande située dans la partie antérieure du lobe temporal du cerveau. Lors de situations de plaisir, l'activation d'un système « hédonique », qui procure du plaisir et souvent appelé « système de récompense » chez l'animal et l'humain, est mise en œuvre. Ce système comprend un certain nombre de structures nerveuses qui s'étendent du tronc cérébral (la tige du cerveau sur laquelle repose les deux hémisphères) au cortex frontal et à l'accumbens (un noyau situé à l'avant du cerveau). Ce système comprend aussi les corps cellulaires de ces neurones qui libèrent de la dopamine. Ils sont rassemblés

dans la partie supérieure du tronc cérébral, dans un petit noyau dit «aire tegmentale ventrale». Toute situation liée au plaisir (la rencontre d'un partenaire, l'éloignement du prédateur, l'accès à la nourriture) active ce circuit. Le rôle majeur joué par ce système de récompense, également nommé «circuit de la dopamine», a été initialement démontré par la technique dite d'autostimulation chez le rat. En effet, si l'on implante sur le trajet de cette voie une électrode reliée à un stimulateur que l'animal peut déclencher par appui sur un levier, l'animal se stimule de façon quasi permanente, provoquant ainsi une libération continue de dopamine. Il faut le «débrancher» pour lui éviter de mourir d'épuisement et d'inanition! Ce circuit de la dopamine, crucial, est mis en jeu également lors de la prise de drogues addictives. À coup sûr, les transhumanistes avec leurs espoirs et leurs croyances d'un monde où le cerveau serait débarrassé de toutes pathologies et pourrait être augmenté à l'envi, ont un taux de dopamine nettement supérieur à la moyenne!

Le système de récompense envoie des projections au cortex préfrontal qui joue un rôle essentiel dans les processus de mémorisation, mais aussi dans la prise de décision. En allant à un rendez-vous, par exemple, vous apercevez, là tout près de vous, une personne à laquelle vous aviez promis, depuis un certain temps, de la rappeler au téléphone. Zut! Que faire? Lui dire bonjour et s'excuser? Ou essayer de l'éviter en priant le ciel qu'elle ne vous ait pas vu? Vite, il faut se décider! Mais vous n'avez vraiment pas envie d'engager la conversation. Vous opérez brusquement un virage à 90°, ayant l'intention de vous engouffrer dans la pâtisserie là juste à côté car, en plus, vous n'avez pas déjeuné. C'est là que vous entendez: «*Bonjour!*» Trop tard... Devant la vitrine de cette même pâtisserie, des personnes, très gourmandes hésitent.

Plusieurs gâteaux leur font vraiment envie, mais lequel choisir? Certaines n'arrivent pas à trancher et repartent sans rien acheter! Bien sûr, il y a des décisions plus difficiles à prendre et qui ont des conséquences plus importantes: acheter un appartement, vivre avec quelqu'un... La décision prend plus de temps, mais la composante hédonique reste importante.

Des informations codées, stockées, puis récupérées

La mémoire à long terme est la mémoire telle qu'on l'entend communément. Elle est définie comme un système de stockage à capacité indéfinie, théoriquement illimitée et dans lequel l'information est détenue de façon durable, au contraire des mémoires précédemment décrites qui ne sont que temporaires sauf en cas d'émotions fortes. La mémoire à long terme comprend elle-même différents types de mémoire qui ont reçu des noms différents. Schématiquement on distingue:

1. *la mémoire non-déclarative*: les conditionnements simples (comme le conditionnement pavlovien), la mémoire dite procédurale (c'est-à-dire les habiletés et les habitudes qui permettent de résoudre un problème de maths, de tricoter un pull, de skier ou de faire du vélo);

2. *la mémoire déclarative* qui comprend elle-même:

– *la mémoire sémantique* (terme ambigu selon que l'on se place du point de vue linguistique ou logique) qui gère toutes les connaissances acquises (par exemple, la Terre est ronde, elle tourne sur elle-même en 24 heures et autour du soleil en un an);

– *la mémoire épisodique*, qui est une mémoire des événements particuliers, datés et localisés qui nous ont marqués

affectivement. C'est la mémoire du « *when what and where* » (quand, quoi et où), comme le souvenir à très long terme et avec une précision « hallucinante » d'un bombardement auquel on a été soumis ou d'une prise d'otages, mais aussi, heureusement, des souvenirs moins dramatiques comme un mariage, ou le bon repas que l'on a fait le week-end dernier.

Toutes ces mémoires ne sont pas indépendantes les unes des autres. Elles se complètent. Je peux me rappeler que Le Caire est la capitale de l'Égypte par mes cours de géographie au lycée (mémoire sémantique), mais également car j'y ai passé des vacances culturelles en 2004 (mémoire épisodique). De plus, ce souvenir est extrêmement plaisant car j'adore l'égyptologie : je retiendrai des informations sur ce sujet bien mieux que sur les règles du golf qui m'ennuient profondément. Ces différentes mémoires à long terme utilisent des processus communs (ce qui ne veut pas dire identiques), dont les principaux sont l'encodage, le stockage, la récupération (la « remontée » d'un souvenir) et enfin l'oubli des informations.

Qu'est-ce que l'encodage ? C'est le processus qui transforme un événement ou un fait en une trace neurologique (on dit aussi mnésique ou mnémonique). Cette trace dans le cerveau se nomme l'engramme (« gravé à l'intérieur » en français). Expérimentalement, cela peut se faire par présentation de divers stimuli dans des conditions extrêmement variées. Par exemple, on a comparé les performances de mémorisation d'une suite de mots selon que le sujet est prévenu qu'on lui demandera de se rappeler plus tard (apprentissage intentionnel) ou non (apprentissage incident). Eh bien !, les sujets qui renaient le mieux n'étaient pas ceux qui étaient avertis, mais ceux qui jugeaient du caractère plaisant ou déplaisant des mots, montrant que c'est le niveau du traitement de

l'information et non pas l'intention de mémoriser qui permet le passage en mémoire à long terme. L'encodage dépend aussi du contexte de l'apprentissage. Le fait d'associer deux items entre eux lors de l'encodage permet une meilleure récupération. C'est le cas des images mentales : par exemple, pour se rappeler « cœur » et « flèche », on utilise une image. Mais on peut également s'en souvenir par notre connaissance de l'éros des Romains. Les Grecs, dont le poète Simonide de Céos (v^e siècle avant J.-C.), ont développé la « méthode des lieux » : elle permet l'encodage des mots en les plaçant chacun dans un endroit différent. Les juristes romains ont utilisé une variante de cette méthode dite du « temple cérébral » : pour se souvenir de tous les articles du Code civil romain, ils devaient imaginer une promenade virtuelle dans leur temple favori en associant un article du Code à chaque colonne du temple et ainsi le retenir.

Certaines expériences laissent à penser que l'encodage sémantique se fait de manière hiérarchique. Si on fait apprendre à des individus des mots, ils les classifient hiérarchiquement comme on peut le faire dans les taxinomies (suite de mots formant des listes) ; par exemple du moins abstrait au plus abstrait : le chien est un carnivore, un mammifère, un vertébré, un animal, une espèce. Si on présente les mêmes mots de manière hiérarchique dans un premier groupe et dans n'importe quel ordre dans un autre, le premier groupe retient beaucoup plus d'items que le second.

Lors de la phase de récupération d'une information, le cerveau doit rechercher tous les sous-ensembles d'un souvenir pour pouvoir le restituer dans sa globalité. Toutefois, il est rare que cette réactivation se fasse *ex nihilo*. La plupart du temps, un indice déclenchera le souvenir, on parle d'amorçage. Lors

d'un amorçage sémantique, par exemple, le mot « lait » sera associé à la vache plutôt qu'à la chienne. Les éléments mémorisés sont ainsi restructurés en fonction de nombreux paramètres dont une partie est inconsciente et dépendent de notre manière de voir le monde. La représentation est alors structurée, « travaillée », quelquefois même déformée. C'est pourquoi l'indice qui amorce le souvenir nous semble parfois étrange, voire « incongru », par exemple chez les enfants bilingues si l'amorce et la cible appartiennent chacun à une langue différente. Lorsque quelqu'un prononce « galette des rois », vous ne pensez pas à ce gâteau doré particulièrement savoureux lorsqu'il est légèrement tiède, ni même à la fève, mais à vous, la dernière fois que vous en avez mangé, au fond de votre lit avec des nausées fortement désagréables!

La récupération des informations est donc fragile et variable. Quand on interroge plusieurs témoins d'un accident de voiture, aucun n'a vu la même scène car ils n'auront pas forcément encodé les mêmes informations, et leur cerveau n'aura pas reconstruit la scène de manière identique. La mémoire n'est pas infallible! Et la récupération des souvenirs est souvent infidèle! De nombreuses expériences ont montré que, suivant les questions que l'on posait à des témoins d'un événement particulier, on peut faire dire ce que l'on veut à des personnes, et en particulier à des enfants qui peuvent ainsi être manipulés, comme en a témoigné l'affaire judiciaire de pédophilie, à Outreau, dans les années 2000. Cette récupération dépend donc de nombreux critères et surtout du contexte dans lequel nous avons encodé le souvenir. La mémoire épisodique est plus fragile que la mémoire sémantique car elle doit retrouver le contexte de la situation avant de récupérer les informations. De la même façon, une situation ayant provoqué une peur intense sera plus facilement récupérée dans la

mémoire quand les contextes d'encodage et de récupération sont identiques.

Heureusement on oublie!

Il arrive cependant, et souvent même, que des informations soient oubliées. Et heureusement! Car sinon nous serions submergés par une somme ubuesque de souvenirs qui pourraient nous handicaper dans la vie courante. Mais il faut distinguer les informations disponibles et accessibles. Une information est disponible si elle existe dans la mémoire, mais elle peut ne pas être accessible. C'est le cas d'un mot que l'on ne trouve plus et qui nous revient au bout de plusieurs minutes (TOT: *tip of the tongue* en anglais). Je me souviens d'une anecdote de mon professeur de physique-chimie me posant une question sur la nature du produit d'une réaction. «*J'ai le mot sur le bout de la langue*», lui ai-je dit. Il m'a répondu: «*Crachez-le vite! C'est de l'acide sulfurique!*» Il existe de nos jours des recherches actives sur l'oubli qui montrent que ça n'est pas un simple phénomène passif, mais qu'il met en jeu des mécanismes actifs dans certains réseaux de neurones.

On oublie, mais l'information est-elle pour autant effacée de notre mémoire? Sur la question de savoir si la mémoire est indélébile, deux écoles s'affrontent:

1. Celle qui considère que les traces mnésiques, ou mnémoniques, restent stockées de façon permanente en mémoire. On peut toujours les récupérer par des moyens détournés (l'hypnose ou la psychothérapie, par exemple). Sigmund Freud, l'inventeur de la psychanalyse, et le sens commun sont plutôt de cet avis. On oublierait ainsi volontairement certains souvenirs pour les enfouir au plus profond de notre être. Des

expériences récentes, publiées en 2016 par l'équipe de Susumu Tonegawa au MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), à Boston, semblent aller dans ce sens. La mémoire épisodique est la première affectée au début de la maladie d'Alzheimer. Sur des modèles de souris transgéniques développant les symptômes précoces de cette pathologie, Tonegawa a montré que la stimulation de l'hippocampe (qui, nous le verrons, joue un rôle crucial dans les phénomènes de mémorisation) entraîne la récupération de ce type de mémoire, prouvant ainsi qu'elle n'était pas perdue à jamais.

2. Celle qui considère que certaines traces disparaissent naturellement avec le temps. Des études sur l'animal montrent que les réorganisations synaptiques cessent à terme si les synapses néoformées ne sont pas stimulées et la disparition de cette trace mnésique entraînerait l'oubli.

Tout dépend en fait de l'encodage du souvenir et de son contexte émotionnel. En clair, les deux hypothèses sont possibles selon les circonstances. Les informations que nous acquérons quotidiennement modifient nos souvenirs anciens. Les souvenirs peuvent alors être restructurés, modifiés et pour-quoi pas, oubliés.

Des chercheurs américains soutiennent que nous retenons : 10 % de ce qu'on lit, 20 % de ce qu'on lit et écoute, 30 % de ce que l'on voit, 50 % de ce que l'on voit et écoute (le « *regarde-moi quand je te parle!* » aurait donc du sens...), 70 % de ce que l'on dit, 90 % de ce que l'on fait.

Cependant, certains souvenirs sont presque indélébiles, comme les traumatismes avec leur cortège d'émotions négatives qui resurgiront brutalement suite à un « amorçage » particulier (des circonstances ou un lieu ou un individu qui vous renvoie à cette situation) en particulier dans les syndromes de stress post-traumatiques, de plus en plus fréquents dans les sociétés

modernes et les automatismes comportementaux qui se sont élaborés sur de grandes périodes. Par exemple, pour rentrer chez vous en voiture, vous avez l'habitude de passer par le Panthéon (ou tout autre lieu!); eh bien!, lorsque, pour une fois, vous devez passer par un autre chemin pour prendre votre fille à l'école, la probabilité pour que vous fassiez demi-tour est forte.

Mais où sont donc cachées les mémoires?

On sait maintenant que la mémoire est distribuée dans un grand nombre d'aires cérébrales, contrairement à ce que l'on pensait auparavant.

Le cerveau est en effet composé de plusieurs parties qui ont chacune des rôles plus ou moins spécifiques. D'abord les deux hémisphères cérébraux qui se divisent en plusieurs lobes: frontal (en avant), pariétal (derrière le frontal), occipital (à l'arrière), temporal (au-dessous) et insulaire (derrière le temporal).

On distingue ensuite le cervelet qui sert de GPS dans le contrôle des mouvements, le tronc cérébral qui contrôle les fonctions vitales de l'organisme, l'hypophyse qui joue un rôle fondamental dans la production des hormones, le système limbique (vaste zone cérébrale constituée entre autres par l'hippocampe, l'hypothalamus, le thalamus, le striatum...) qui intervient dans de nombreuses fonctions dont les émotions.

Alors lesquelles de ces aires sont impliquées dans la mémorisation? Cela dépend de quelle mémoire on parle!

- *La mémoire de travail* implique l'action de plusieurs aires corticales en fonction de la nature du stimulus sensoriel. De nombreuses expériences ont été réalisées dans la reconnaissance visuelle car ces voies sont bien connues et il

est relativement facile de les étudier chez l'animal et l'humain. Il en ressort que les neurones des aires visuelles restent actifs quand le stimulus a disparu. Ceci laisse présager que lorsque la mémoire de travail est en marche, les neurones incriminés dans le codage sensoriel du stimulus sont également activés. Seraient-ils analogues aux systèmes esclaves de Baddeley et Hitch évoqués plus haut? L'hippocampe est, quant à lui, une structure cérébrale indispensable à la mémoire de travail. Car c'est par lui que transitent les informations, notamment sensorielles, avant d'être transférées et stockées dans les aires corticales. Des expériences dites de reconnaissance différée chez le singe macaque (où l'animal ne doit plus simplement se souvenir du matériel qu'on lui a présenté, mais le reconnaître comme ayant déjà été vu lors d'une séquence antérieure et prédéfinie par l'expérimentateur) ont permis de montrer le rôle des lobes préfrontaux dans la mémorisation des tâches visuelles. Correspondraient-ils à l'administrateur central des mêmes Baddeley et Hitch? Il en va de même pour les zones (ou aires) dites motrices du cortex cérébral, cette «bandelette» du cortex située de part et d'autre du cortex frontal et pariétal, mise en jeu lors de tâches complexes telles que la planification de nos actes ou le contrôle de nos mouvements. Quand on prépare une action, les stratégies sont construites et conservées en mémoire: c'est le fameux «*Attention! Prêt? Partez!*» lors d'un départ du 100 m, ou des ordres que l'on donne avant l'entrée en mêlée au rugby. Cette zone motrice reste active jusqu'au moment où le mouvement est initié. La mémoire de travail joue un grand rôle chez les enfants dans le cadre des apprentissages scolaires. Souvent, un enfant qui a des troubles de la mémoire de travail, aura des difficultés dans l'application de consignes données oralement, il hésitera à lever la main,

semblera inattentif... Des troubles apparaissent aussi dans le cas de traumatismes crâniens ou diverses pathologies comme l'épilepsie ou des maladies neurodégénératives. On observe aussi une perturbation majeure de la mémoire de travail chez les individus atteints de maladie d'Alzheimer.

- *La mémoire procédurale* conserve les informations du type «savoir-faire», difficilement modifiables et dont l'acquisition est progressive. Elle se fait automatiquement. Étant inconsciente, elle nous permet de faire deux choses en même temps, marcher et parler par exemple. Les ordinateurs ne savent pas encore faire cela! La mémoire procédurale est particulièrement sollicitée chez les artistes ou les sportifs de manière à acquérir des procédures parfaites. Dans les syndromes amnésiques, cette mémoire non-déclarative est plus résistante que les autres. La façon de faire du vélo ne s'oublie pas. Cette mémoire est relativement préservée dans la maladie d'Alzheimer. Les régions cérébrales responsables sont variées et concernent les régions motrices et associatives (aires concernées par le traitement de données complexes) comme le cortex frontal et pariétal, les amygdales, le cervelet et le striatum.

- *La mémoire émotionnelle* fait jouer un rôle majeur au système limbique. Elle peut être aussi bien déclarative que non-déclarative. On peut avoir peur des guêpes. Toutefois, les crises de panique ou l'anxiété peuvent apparaître sans que l'on puisse en donner la raison. La région clé pour la mémoire émotionnelle est l'amygdale: en effet une lésion dans cette région provoque une perturbation notable de la mémoire émotionnelle, mais pas des autres mémoires. Les animaux restent indifférents dans des situations qui provoquent habituellement une grande frayeur. Ils restent toujours placides et dociles. Chez l'humain, une lésion de l'amygdale survenue au début de la vie entraîne un déficit d'expressions de peur, de

colère, de surprise et de dégoût. L'activation de cette structure serait exagérée chez les sujets anxieux.

- *La mémoire déclarative*, qui permet de se représenter le monde et de relier les «événements entre eux», implique en particulier le cortex temporal. Les connaissances à son sujet ont beaucoup progressé grâce aux expériences de stimulation cérébrale, réalisées par le neurochirurgien Wilder Penfield au cours de la première moitié du ^{xx}e siècle. Certains patients décrivaient des souvenirs d'une grande précision quand une partie de leur cortex temporal était stimulée. Rappelons aussi le cas de H.M. chez qui le neurochirurgien William Scoville a excisé une bonne partie des lobes temporaux internes : la mémoire déclarative était pratiquement inexistante chez ce patient. Il était incapable, nous l'avons vu, de stocker de nouvelles informations. Par exemple, chaque jour, H.M. devait faire des tests comme celui de la tour de Hanoï (il s'agit de déplacer des disques de tailles différentes enfilés sur trois tiges sans qu'aucun disque plus grand ne recouvre un disque plus petit). À chaque fois qu'on lui présentait ce jeu, il ne se souvenait pas de l'avoir déjà vu (mémoire déclarative), mais cela ne l'empêchait pas de s'améliorer (mémoire procédurale). Les études sur ce patient ont amené à plusieurs conclusions sur la mémoire sémantique :

1. Il faut plusieurs années pour que le souvenir sémantique s'installe de façon durable.

2. Le lobe temporal interne, par ses connexions avec les autres zones corticales, est essentiel tout au début pour que le souvenir soit organisé et stable dans le temps.

3. Quand le souvenir est stable, il est ensuite stocké dans de nombreuses autres aires corticales.

- *La mémoire spatiale*, considérée comme une mémoire déclarative, fait appel à l'hippocampe – encore lui. Il est

capable de former une représentation interne, sorte de carte Michelin (on parle de carte cognitive, en langage scientifique) de l'environnement spatial chez le rat. Chez l'humain, des activations spécifiques de l'hippocampe sont observées chez des sujets qui doivent naviguer de façon imaginaire ou lorsqu'ils doivent résoudre, dans le cadre de jeux vidéo, des jeux d'orientation dans des environnements virtuels. Perdre son sens de l'orientation est l'un des premiers symptômes de la maladie d'Alzheimer.

- *La mémoire épisodique*, autre forme de mémoire déclarative, qui est une mémoire des événements particuliers et datés (le « *where what and when* » déjà évoqué), met à contribution les lobes frontaux de l'hémisphère droit. Nous savons très bien que les animaux possèdent ce type de mémoire, même si elle est moins développée que chez nous.

Finalement, se pose une question simple: où se trouve stockée la mémoire? Certes, il y a des zones plus importantes que d'autres: l'hippocampe, notamment, qui semble être un passage préférentiel des informations vers le cortex, le cortex préfrontal et temporal, et certaines structures du système limbique pour la mémoire liée aux émotions. Sauf peut-être dans le tronc cérébral et l'hypophyse, tout semble indiquer que la trace mnésique est stockée un peu partout dans le cerveau!

Et revoilà la plasticité cérébrale!

Mais comment la mémoire est-elle stockée dans les cellules du cerveau? Après des années de recherche, tout indique que

la mémoire implique des changements durables au niveau des synapses.

Donald Hebb, nous l'avons vu, est à l'origine de la notion de plasticité cérébrale qu'il a exposée dans son ouvrage *The Organisation of Behavior*, paru en 1949. Il a postulé que l'apprentissage et la mémoire provoquaient des changements synaptiques et a développé ce que l'on nomme aujourd'hui la synapse de Hebb : c'est un type particulier de synapse qui se modifie au cours du temps et qui présente des propriétés remarquables : coopérativité (les neurones en contact se renforcent mutuellement), sélectivité (ce phénomène ne se produit qu'à certaines synapses) et associativité. En particulier, Hebb postule que les neurones qui déchargent ensemble forment des associations ou circuits préférentiels. « *Chacune des deux cellules ou chacun de deux groupes ou assemblées de cellules qui sont actifs en même temps, auront tendance à s'associer, de sorte que l'activité de l'un facilite l'activité de l'autre.* » C'est le concept de la double trace. Dans le système mémoriel, par exemple, quand vous pensez à une rose, tous les composants sensoriels (visuels, olfactifs, cognitifs...) seront rappelés en même temps. En revanche, les synapses qui ne sont pas excitées agissent de moins en moins sur les neurones post-synaptiques. Cette intuition de Hebb a reçu beaucoup plus tard une confirmation éclatante lors de l'étude des mécanismes cellulaires et moléculaires mis en jeu dans les phénomènes d'apprentissage et de mémoire.

L'aplysie, encore elle, a été longtemps la chouchoute des chercheurs dans ce domaine car elle possède un répertoire assez simple de comportements. L'apprentissage qui a été le plus étudié par l'équipe d'Eric Kandel (prix Nobel de médecine en 2000) chez cet animal est celui de la rétraction de la branchie. Lorsque l'on touche le siphon de l'animal avec

un pinceau, ou si l'on envoie un petit jet d'eau sur celui-ci, on provoque un repliement des branchies. Ce comportement est destiné à les protéger. Le circuit mis en jeu est très simple. Le jet d'eau provoque l'activation d'un groupe de neurones sensoriels qui émettent des influx nerveux. Ceux-ci entraînent la libération d'un neurotransmetteur, ici le glutamate, au niveau des terminaisons présynaptiques. Ce neurotransmetteur active tout un groupe de neurones post-synaptiques, les motoneurones, qui à leur tour vont émettre des influx nerveux et déclencher la contraction des muscles des branchies.

Si l'on répète cette expérience plusieurs fois de suite, on s'aperçoit que l'amplitude du réflexe diminue. On dit qu'il y a habituation. L'habituation à court terme peut être considérée comme faisant partie de la mémoire à court terme. L'équipe de Kandel a montré que ce phénomène était dû à une diminution progressive de la libération de glutamate par les terminaisons des neurones sensoriels. Celle-ci est accompagnée de la modification de synapses préexistantes (dans leur nombre, leur structure...).

Si à un moment, entre deux jets d'eau, on applique un petit choc électrique sur la tête ou la queue de l'animal, on réactive ce réflexe de rétraction des branchies et son amplitude et sa durée augmentent à nouveau. En fait, les neurones sensibles à la douleur (nociceptifs), une fois « électrocutés », vont balancer des quantités et des quantités, non pas de glutamate mais d'un autre neurotransmetteur, la sérotonine, sur les neurones sensoriels. Si l'expérimentateur, qui ne manque jamais d'imagination (contrairement à un ordinateur!), envoie un jet d'eau sur le siphon pile au moment du choc électrique, la durée du réflexe de rétraction peut atteindre plusieurs semaines. Cela devient de la mémoire à long terme pour cet animal!

L'équipe de Kandel a ensuite étudié ce phénomène dans une boîte de culture contenant un seul neurone sensoriel établissant un contact synaptique avec un seul motoneurone! Elle a ainsi pu réaliser des expériences au niveau biochimique et moléculaire, en mimant «l'électrocution» du neurone sensoriel par des applications de sérotonine. Les chercheurs ont mis en évidence la formation de nouvelles connexions entre ces deux neurones, formation qui est associée à l'activation de plusieurs gènes (dont les gènes CREB) et à une augmentation du nombre de récepteurs au glutamate présents sur le motoneurone. Les changements synaptiques à long terme impliquent donc la formation de nouvelles connexions provoquée par l'activation de gènes et la synthèse de protéines.

Un autre modèle pour l'étude de la mémoire est le phénomène, appelé de façon barbare, «potentialisation à long terme» (PLT), qui implique là encore des synapses. En 1974, Timothy Bliss et Terje Lomo ont eu l'idée d'implanter des électrodes dans le cerveau d'un lapin pour stimuler une synapse particulière de son hippocampe. Cette stimulation par des chocs électriques répétés à basse fréquence (une stimulation toutes les 10 secondes) et appelés «chocs tests», provoque dans les neurones postsynaptiques une réponse stable, qui ne varie pas en amplitude. En revanche, l'application d'une courte salve de petits chocs électriques à haute fréquence (100 par seconde) pendant une seconde déclenche une augmentation de la réponse aux chocs tests, qui peut durer plusieurs semaines. C'est ce que l'on appelle une potentialisation. Ces observations furent le point de départ d'une recherche intense sur les mécanismes cellulaires et moléculaires de ce phénomène. À l'heure actuelle, c'est le plus bel exemple de processus élémentaire qui pourrait sous-tendre la mémorisation.

La PLT a principalement lieu dans l'hippocampe, le cortex et d'autres aires cérébrales impliquées dans diverses formes de mémoire. Les changements induits entraînent non seulement des modifications au niveau des épines dendritiques des neurones, mais aussi un véritable « réveil de synapses silencieuses » qui incorporent de nouveaux récepteurs, les rendant ainsi aptes à répondre au neuromédiateur libéré. Le tout est ensuite complété par une série de réactions moléculaires qui, grâce à la synthèse de nouvelles protéines, stabilisent ces changements essentiels à la formation de la mémoire à long terme. De plus, les recherches menées chez des souris génétiquement modifiées montrent que des altérations de gènes spécifiques qui codent pour un type de récepteurs particulier au glutamate (le récepteur NMDA) et/ou pour une famille de gènes (comme CREB) peuvent radicalement affecter la capacité d'expression de la PLT et la mémoire dans certaines régions du cerveau.

Évidemment chez l'humain, ce type d'expériences est difficilement réalisable. De manière indirecte, des phénomènes analogues ont été mis en évidence. Dans la maladie d'Alzheimer qui est caractérisée par des symptômes précoces de troubles de la mémoire, on observe aussi une atrophie de l'hippocampe, mais ce n'est, pour le moment, qu'une corrélation.

Comment relier les phénomènes élémentaires de plasticité synaptique que nous avons successivement décrits et les observations comportementales ? C'est l'objet de la neurophysiologie moderne qui réussit un véritable tour de force technique et conceptuel. Des électrodes ou des groupes d'électrodes sont implantés de manière permanente dans différentes régions du cerveau d'un animal. Après une période d'habituation au dispositif, ces animaux réalisent des comportements ou des apprentissages (comme se diriger dans un labyrinthe très simple en T ou

en Y et prendre une décision : aller à droite ou à gauche, là où se trouve la nourriture par exemple). Les enregistrements de l'activité électrique de neurones isolés ou de groupes de neurones dans différentes régions du cerveau sont réalisés pendant les différentes tâches ou apprentissage et on essaye de comprendre comment ces décharges et leurs modifications sont corrélées au comportement. Le fonctionnement de réseaux neuronaux ou de types de neurones impliqués dans tel ou tel comportement peut alors être étudié : par exemple la prise de décision, simple comme nous l'avons décrite ou plus compliquée (en condition d'incertitude). Dans le cas de la navigation dans l'espace, on a pu ainsi montrer que des neurones spécialisés, les cellules de lieu (*place cells*) et les cellules de grille (*grid cells*), sont mis en jeu, constituant un véritable GPS neuronal. Par ailleurs, les neurobiologistes tentent de comprendre les phénomènes de plasticité synaptique qui sous-tendent les changements d'activité de ces réseaux de neurones. Ainsi progressivement, en combinant plusieurs techniques se crée un lien explicatif entre les différents niveaux étudiés, de la synapse à la mémoire et *vice-versa*.

Que conclure de ce qui précède? Nous ne connaissons encore que très peu de choses sur les mécanismes cellulaires et moléculaires mis en jeu dans des processus fondamentaux tels que la mémoire et l'apprentissage. Mais tout le monde s'accorde actuellement pour penser que les phénomènes de mémorisation reposent sur la plasticité des circuits de notre cerveau, c'est-à-dire la capacité des neurones à modifier positivement ou négativement l'efficacité synaptique, à former de nouvelles connexions ou à en faire disparaître. Le cerveau est en perpétuel réarrangement dynamique sous l'influence de l'environnement, auquel il doit s'adapter, mais aussi du vécu de chacun. « *Nous sommes qui nous sommes à cause de ce que nous avons appris et*

de ce dont nous nous souvenons», conclut très justement Eric Kandel. C'est pour cela que le cerveau de chacun est unique.

Face à l'extraordinaire complexité du cerveau et à sa dynamique permanente, l'intelligence artificielle est hors course. L'ordinateur ne traitera, et même d'une manière remarquable, que ce que l'Homme aura bien voulu lui fournir comme données. Il pourra même « apprendre », comme nous l'avons vu. Il pourra être plus performant que l'Homme dans certaines tâches. En revanche, ce qui manque aux machines, « *c'est la capacité à apprendre des tâches qui impliquent non seulement d'apprendre à représenter le monde, mais aussi à se remémorer, à raisonner, à prédire et à planifier* », dit Yann LeCun. Et surtout, il leur manque le sens commun, estime-t-il. Alors d'où viendra le progrès en intelligence artificielle ? De l'apprentissage non supervisé ? De l'apprentissage par renforcement ? Pour cet expert du *deep learning* : « *En vérité, nous n'en savons rien.* » De là, à faire acquérir aux machines toutes les grandes fonctions cérébrales et à les rendre « uniques »...

Et la conscience dans tout ça ?

Les phénomènes d'apprentissage et de mémorisation sont à la base des grandes fonctions cérébrales telles le langage, les émotions, le comportement, ainsi que les fonctions cognitives les plus élaborées comme la conscience et la pensée. C'est l'ensemble de ces fonctions qui construit la personnalité d'un individu. D'un point de vue historique, Phineas Gage est un cas d'école illustrant le lien entre fonctions cérébrales et personnalité.

« *Docteur, il y a du travail pour vous !* » C'est ainsi que Phineas Gage accueillit le médecin accouru pour le soigner après un

accident de chantier. Qu'était-il arrivé, au juste à Phineas Gage, 25 ans, chef d'une équipe de la *Rutland & Burlington Railroad*, dont la tâche était de construire des voies ferrées dans le Vermont, aux États-Unis. Le 13 septembre 1848, il prépare des explosifs pour faire sauter une roche : la spécialité de Gage. Avec sa barre de fer de six kilos pour un mètre dix, il lui faut remplir un mélange de poudre et de sable dans une cavité du sol. Mais distrait, il commence à bourrer la poudre avec la barre de fer, alors que son aide n'a pas encore versé le sable. La barre touche la roche et... BAAAM! La poudre explose! La barre de fer s'envole des mains de Gage, pénètre dans sa joue gauche, traverse l'avant du cerveau et ressort en haut du crâne pour atterrir à une trentaine de mètres de là, dans un cortège de bouts de cervelle. Gage, projeté sur le dos, est pris de convulsions, puis s'immobilise, conscient. Son cerveau a beau avoir été littéralement transpercé, il n'est pas mort! « La tête transpercée par une barre de fer », titra l'article du journal *Boston Medical and Surgical Journal*. Gage est transporté allongé dans un char à bœufs vers un hôtel situé à quelques kilomètres de lieu de l'accident où un médecin l'examine.

Après deux mois de convalescence, Phineas Gage se rétablit, physiquement en tout cas, car s'il était capable de soutenir une conversation et de retravailler, son comportement avait profondément changé. Selon ses amis et ses connaissances, dans une célébriissime formule rapportée par John M. Harlow, le médecin qui le suivait, « *Gage n'est plus Gage* ». Jadis consciencieux, poli, plein de bon sens, le voici décrit comme irrévérencieux, vulgaire, irascible, imprévisible, prenant des décisions irrationnelles. Ce cas d'école montra pour la première fois que des lésions neuronales peuvent modifier le comportement d'un individu. Cette corrélation entre une lésion cérébrale et une modification profonde de la personnalité n'accéda à la célébrité

que cent cinquante ans plus tard, grâce à la redécouverte par Hanna et Antonio Damasio du rôle du cortex orbito-frontal (celui qui avait été transpercé) dans les rapports sociaux, et sa vulgarisation dans un best-seller ayant pour titre, dans l'édition française, *L'Erreur de Descartes* (1995).

La conscience de soi est la première étape du développement de la personnalité. Une définition simple consiste à formuler que la conscience est la connaissance, la représentation mentale que chacun a de sa propre existence et du monde qui l'entoure. Mais il s'agit là d'un vaste sujet qui dépasse largement le cadre de ce livre ! Simplement, essayons de présenter quelques éléments en lien avec ce qui a été écrit précédemment*.

Nous avons vu que chacun construit son propre souvenir d'un événement et que ce souvenir peut différer d'un individu à l'autre. L'audition de témoins d'une agression, par exemple, est révélatrice à ce sujet. Les organes sensoriels sont des processeurs non conscients. Les informations sont capturées, stockées et travaillées. On entend, on voit, on comprend, puis on synthétise toutes ces informations pour en faire une trace mnésique dont on peut ensuite se souvenir. Mais où s'arrête le traitement de l'information, sa mise en mémoire, et où commence la prise de conscience ?

Les techniques d'imagerie (dont l'IRM) et l'implantation d'électrodes dans et sur le cortex ont permis d'avancer des hypothèses. Nous avons vu dans le chapitre 2 que le réseau neuronal est spontanément actif. Du fait de cette activité

* Si vous voulez en savoir plus sur le sujet, consultez, entre autres, les livres de Stanislas Dehaene (*Le Code de la conscience*, Odile Jacob, 2014) ou celui de Lionel Naccache (*L'Homme réseau-nable*, Odile Jacob, 2015).

permanente, le cerveau émet un très faible courant électrique, même en état de sommeil. Grâce à de petites électrodes placées sur le cuir chevelu et reliées à un électroencéphalographe (EEG), le rythme de ces pulsations électriques peut se traduire en forme d'ondes appelées ondes cérébrales. L'intensité de l'activité cérébrale se manifeste par la fréquence de ces ondes qui est calculée en hertz (un hertz égale une ondulation par seconde). Lors de différentes tâches, de mémorisation en particulier, diverses régions du cerveau sont, nous l'avons vu, mises en jeu, ce qui se traduit par une modification de la fréquence des ondes cérébrales. La magnétoencéphalographie (MEG) est une autre technique qui mesure les champs magnétiques induits par l'activité électrique des neurones et permet de réaliser des cartes d'activation cérébrale.

Ces techniques d'imagerie et d'encéphalographie ont été utilisées par l'équipe de Stanislas Dehaene et Jean-Pierre Changeux. Elles ont permis de mettre en évidence deux modes de traitement d'une information, l'un inconscient, l'autre conscient. Un stimulus visuel, comme l'apparition d'un mot tel que « chaise » ou « piano » est présenté très rapidement à plusieurs sujets, pendant environ 50 à 70 millisecondes. Le mot « chaise » est clairement visible. En revanche, le mot « piano » est recouvert par des « masques » constitués de figures géométriques (carrés, losanges) qui rendent ce mot plus ou moins bien caché. Comme la présentation de l'image est très rapide, le mot « chaise » peut être « vu », mais le mot « piano » peut ne « pas être vu ». On compare les cartes d'activation cérébrales obtenues par IRM et par MEG selon que les participants déclarent avoir vu ou non le mot en question. On constate que les zones corticales activées sont différentes dans les deux cas. Cela signifie que le mot « piano » a été malgré tout perçu mais de manière inconsciente.

L'inconscient est rapide et n'utilise que des circuits spécialisés et bien délimités dans le cerveau. Le mode conscient, lui, a besoin de temps. Les chemins pris sont ainsi différents. Tout d'abord, une onde cérébrale naît dans le cortex occipital entre 100 et 200 millisecondes après le stimulus, que le mot ait été « vu » ou « non vu ». Puis, le cerveau se comporte de deux manières diamétralement opposées, signant les deux types de traitement. Si ce traitement reste inconscient mais mémorisé, et le mot déclaré « non vu », l'onde cérébrale s'efface vers 400 millisecondes après le stimulus. À l'inverse, lorsque le mot est déclaré « vu », et le traitement conscient, 300 millisecondes après l'apparition du stimulus, une intense onde d'électricité enregistrée par MEG parcourt le cerveau de l'arrière vers l'avant en se propageant vers les lobes frontaux. Une troisième signature de la conscience se manifeste par une longue activité de haute fréquence proche de l'activité gamma (40 hertz). Ces ondes gamma apparaissent dans chaque partie du cerveau lors de la résolution de problèmes, de tâches complexes ou d'une attention soutenue. Enfin, et ce serait là une quatrième signature de la conscience, il y a une synchronisation massive des signaux électromagnétiques du cortex que l'on peut détecter par des enregistrements simultanés à différents sites du cerveau associés à des techniques sophistiquées de traitement du signal (telles que la fonction de cohérence ou les ondelettes de Morlet) : les neurones appartenant à des régions cérébrales très éloignées se mettent à décharger dans la même bande de fréquence. On voit que pour une expérience aussi simple, le traitement conscient est bien compliqué et mobilise plusieurs structures dans le cerveau. On n'ose imaginer ce que cela doit être pour des tâches plus compliquées ! Pour Stanislas Dehaene, « *la conscience est une opération computationnelle, c'est un calcul* ». Les machines, pour lui, pourraient donc avoir une

conscience, mais encore faudrait-il leur donner les instructions nécessaires pour pouvoir faire ce type de calcul. Aujourd'hui, ces expériences sont particulièrement intéressantes, mais elles ne font que décrire certaines structures mises en jeu dans le mode conscient. Elles ne donnent pas encore d'informations sur les processus cellulaires et moléculaires qui pourraient expliquer le passage du mode inconscient au mode conscient. Il y a encore du pain sur la planche avant de pouvoir rendre les machines conscientes!

*Conscience de soi et conscience de l'autre
dans l'imaginaire transhumaniste*

Bien sûr, la conscience au sens large va bien au-delà des « *neurosciences de la conscience* » tel que cela a été décrit dans les expériences de Stanislas Dehaene et Jean-Pierre Changeux. Elle mobilise un certain nombre d'informations nécessaires à la définition de stratégies de survie et à la prise de décision. La conscience engendre aussi des comportements de type social, comme l'empathie par lesquels on comprend intuitivement ce que ressent autrui sans forcément l'approuver.

Les neurones de l'empathie existent-ils? En 1990, chez le singe, l'équipe de Giacomo Rizzolati a mis en évidence un type particulier de neurones impliqués dans un acte moteur. Cette découverte s'est faite fortuitement lors d'expériences réalisées avec des singes sur lesquels étaient implantées des électrodes dans le cortex moteur, reliées à un haut-parleur. À chaque fois qu'un singe faisait un mouvement, les neurones moteurs émettaient des potentiels d'action et on entendait alors crépiter les neurones: toc, toc, toc... Cette approche expérimentale est très classique chez ces animaux. Tandis qu'un chercheur travaillait

avec un singe en face de lui, il attrapa une pomme placée sur la table. Et là, oh! surprise, il entendit le haut-parleur crépiter alors que le singe ne faisait aucun mouvement. Giacomo Rizzolati a appelé ces neurones les « neurones miroirs ». Ils permettraient de se voir agir à la place de l'autre, comme dans un miroir. Ce type de neurones aurait été retrouvé chez l'Homme. Très vite ce concept a été repris, en particulier par les philosophes. Les neurones miroirs seraient à la base de nos conduites d'imitation, de l'altruisme, de l'empathie... et des anomalies de leur fonctionnement seraient impliquées dans diverses pathologies comme l'autisme ou la schizophrénie. Bref, les neurones miroirs... de nos illusions et de nos rêves! Les comportements individuels et collectifs se traduisent par des échanges d'idées. C'est pourquoi le neuropsychiatre Boris Cyrulnik, lors d'une émission de radio en 2013, met en garde contre l'utilisation excessive de nos moyens de communication (téléphone, mails...) qui empêcheraient selon lui la stimulation de nos neurones miroirs et nous priveraient de « l'autre ».

Est-ce que l'altérité et le lien social existent dans la vie imaginée par les transhumanistes? Certes les *bots* (contraction de « robots », qu'ils soient « conversationnels – *chatbots*, collaboratifs – *cobots*, ou en réseaux – *botnets*) font déjà partie de notre quotidien. Mais toutes ces machines programmées pour interagir avec l'Homme pourront-elles être capables de créer des interactions sociales et/ou émotionnelles entre humains et robots? De nombreux chercheurs essayent de comprendre et modéliser l'empathie humaine. Un robot tel Nao ou Pepper peut reconnaître dans la voix l'humeur et les émotions de l'humain et adapter son comportement en conséquence, d'où l'idée envisagée de l'utiliser par exemple comme un véritable coach pour senior. Mais un robot n'est pas un humain et la voix n'est pas tout dans la communication. Il y a des domaines

qui ne sont pas modélisables, comme le bon sens, le sens critique, l'humour ou l'analyse de la pensée d'autrui. En tout cas pour longtemps encore, à une échelle de temps non déterminée. Il est clair qu'inventer des robots qui se rapprochent de plus en plus des êtres humains reste un défi quasiment insurmontable et que télécharger l'esprit de quelqu'un de vivant dans un robot, un avatar, voire dans un hologramme, est une chimère et nous avons décrit les obstacles pour longtemps insurmontables qui s'opposent à leur réalisation. La création d'un être « algorithmique » et désincarné et cependant pourvu d'une identité précise et singulière est selon nous une voie sans issue.

Une analyse partagée par d'autres experts venant de disciplines différentes: Jean-Baptiste Mouret, spécialiste de la robotique, chercheur à l'Institut des systèmes intelligents et de robotiques (Isir) puis à l'Institut national de recherche en informatique et en automatique (Inria), remarque: « *On a du mal à construire une machine capable de marcher en ligne droite, alors lui donner du sens commun, lui offrir la capacité d'interpréter les signaux, les intentions, pour prendre les meilleures décisions...* » Pour François Berger, neuro-oncologue, « *le transhumanisme est un concept scientifiquement et éthiquement erroné: l'homme libre qui pense, aime et crée n'est pas un ordinateur qui bat un joueur de go* ». Jean-Michel Besnier, professeur de philosophie à la Sorbonne, enfonce le clou: « *La vie intérieure, on ne sait pas ce que c'est. L'intelligence artificielle a donc fini par dépouiller la notion de conscience de la notion d'intériorité, et l'a définie simplement en termes de comportement: on peut l'imiter chez les machines.* »

Garder à jamais dans une mémoire dématérialisée le cerveau d'un être donné, par exemple le sien, est donc un rêve agréable et fascinant, mais ce n'est qu'un rêve pour très

longtemps encore, et même pour toujours. Désincarner le cerveau n'est pas possible.

Que signifierait en outre cette intelligence dématérialisée? On dit souvent que l'Homme est un être de chair; eh bien!, le cerveau est aussi de chair. La désincarnation du vivant peut-elle reproduire le vivant? Même si elle en reproduisait un jour les performances, est-il besoin d'être un grand penseur pour réaliser l'incomplétude de la réalisation? Comme le souligne Jean-Gabriel Ganascia, chercheur en intelligence artificielle, un paradoxe se crée: des ingénieurs et scientifiques se réclamant du matérialisme le plus dur, défendent un dualisme absolu, avec l'idée que l'esprit pourrait exister sans substrat biologique, sans cerveau!

Un objectif en apparence plus réaliste serait de partir de la machine merveilleuse faite de chair et de sang et sélectionnée par l'évolution darwinienne pendant des millions d'années, à savoir l'*Homo sapiens* du ^{xxi}e siècle et d'essayer de l'améliorer en augmentant tout ou partie de ses performances, en particulier mentales ou sensorielles. Cette idée plus modeste, mais déjà très difficile à mettre en pratique, consiste à créer un « Homme augmenté ».

*Alors, l'Homme augmenté,
c'est pour quand et pour qui?*

Les transhumanistes assurent que les capacités mentales de l'être humain seront démultipliées. C'est le rêve de l'Homme augmenté que rendraient possible les progrès des nanosciences, des connaissances en biologie, des sciences cognitives et de l'intelligence artificielle (les fameuses technologies NBIC). Cet Homme augmenté n'est pas l'être prolongé par des prothèses

(lunettes, prothèses auditives, exosquelettes, etc.) chez qui on a simplement essayé, et depuis toujours, d'aider à compenser un déficit et se maintenir au plus près de la norme de l'humain en bonne santé. Bien au-delà, l'Homme augmenté devra ou devrait posséder des qualités et des performances qui dépasseront les capacités naturelles données aux humains.

Non seulement cet Homme aura une acuité visuelle cent ou mille fois supérieure à la normale, mais il pourra, s'il en a envie ou s'il en a besoin (et s'il en a les moyens financiers!), acquérir des propriétés nouvelles, telles que la sensibilité aux ondes sonores (l'écholocation des dauphins ou des chauves-souris) ou aux champs magnétiques et/ou électriques. On nous promet donc un être hybride, à la fois « bionique » (par imitation des performances d'autres espèces animales) et « cyborg » (par acquisition des propriétés des robots). Équipé d'un exosquelette intelligent, doté de puces performantes dans le cerveau, convenablement traité par des psychostimulants, voire ayant bénéficié d'injections intra-cérébrales de gènes modifiés introduits grâce à des virus modifiés, ce super-Homme deviendra plus intelligent, plus conscient, plus créatif, plus empathique. Il pourra aussi effacer les mauvais souvenirs pour ne garder que les plus agréables. Ces technologies pourront aussi être utilisées pour le cerveau malade.

Dans les pensées des futurologues débridés, l'Homme augmenté ressemble beaucoup au soldat combattant du futur, ou en possède certaines des capacités, il est bardé de carapaces intelligentes, de caméras et de lunettes surpuissantes, y compris la nuit (sans compter un outil type smartphone super-amélioré et des moyens de self-défense électronique). Ce surhomme simplement sur-outillé est programmé à brève échéance, tandis que, à terme, la « création » d'un être ressemblant à celui que nous venons de décrire n'est pas improbable.

Mais le cerveau de ce robot-humain sera-t-il augmenté? Ray Kurzweil assure que « *dès les années 2030, nous allons grâce à l'hybridation de nos cerveaux avec des composants électroniques, disposer d'un pouvoir démiurgique. La majorité de nos pensées ne seront plus biologiques, mais émaneront d'une machine ou d'un nuage artificiel en réseau* ». Quant à Elon Musk, le patron de Tesla, il a lancé son entreprise *Neuralink* dans le but d'augmenter le cerveau humain en lui ajoutant, par l'intermédiaire de puces, une intelligence artificielle. Nous en doutons ou en tout cas nous soumettons à la critique et au calendrier de la science quotidienne, souvent harassante, pleine de déceptions et de résultats négatifs, ce rêve de surpuissance enfantine ou infantile!

Les travaux pour tenter d'augmenter les aptitudes humaines, en particulier cognitives, grâce à la mise au point d'implants, se multiplient pourtant. À l'université de Californie du Sud, aux États-Unis, l'ingénieur et neurobiologiste Theodore Berger développe depuis plus de vingt ans, des puces qui restaureraient la mémoire à long terme. Testées chez le rat et le singe, elles étaient à l'essai chez des individus ayant subi des lésions cérébrales altérant les facultés mnésiques. Berger était aussi le directeur scientifique de *Kernel*, une start-up fondée par Bryan Johnson (lui-même fondateur de *Braintree*, vendue pour la bagatelle de 800 millions de dollars à eBay!). L'objectif de *Kernel* était de créer des implants pour améliorer la mémoire à long terme. Était, car au bout de six mois, Johnson est arrivé à la conclusion que le projet était trop ambitieux. Dommage pour les transhumanistes!

Une autre start-up, *OpnWatr* (*Open Water*), se propose également de lire et écrire dans le cerveau. Cette société a été fondée par Mary Lou Jepsen pourvue d'un curriculum vitae impressionnant et qui est passée par Google, Facebook... le

must. Basée sur l'utilisation de rayons lumineux à infra-rouges, la technique utilisée a au moins le mérite de ne pas être invasive. Car les apprentis sorciers du transhumanisme ne doutent pas un seul instant de leur réussite et n'imaginent pas que manipuler le cerveau ou plus spécifiquement certains réseaux de neurones puisse entraîner des dysfonctionnements inattendus, créant ainsi de nouvelles pathologies, comme des crises d'épilepsie répétées! Mais l'enjeu de ces travaux ne se limite pas à ça. Ils visent avant tout à reproduire le fonctionnement du cerveau: « *Quand nous en serons capables, nous pourrons en faire des copies fonctionnelles avec d'autres matériaux* », explique Marvin Minsk. Ce chercheur du MIT, spécialiste de l'intelligence artificielle, se pose comme l'un des grands théoriciens du téléchargement de l'esprit.

*Notre singularité n'est pas reproductible
dans une machine*

Pour «télécharger» danièle tritsch ou jean mariani (mais pas un être générique mariatritsch ou tritschriani!), il faudrait d'abord avoir élucidé les différences interindividuelles subtiles, mais réelles entre les cerveaux de deux êtres différents. Or, la biologie n'a actuellement rien à dire sur l'individuation ou la singularité du cerveau qui soutient nos différences individuelles. Les neurosciences n'ont pas les outils théoriques et surtout expérimentaux pour capturer, identifier ces différences biologiques et fonctionnelles dans des cerveaux qui semblent, même dans le détail des connexions, obéir à un patron d'organisation univoque. Le paradoxe est là: au sein d'une espèce comme la nôtre, le déterminisme biologique doit permettre la reproduction précise entre les générations d'une organisation très homogène, telle que le cerveau. Car nous accomplissons tous de

manière homologue des gestes répétitifs et quasi identiques et nous éprouvons des sentiments ou avons des pensées qui peuvent se ressembler. Mais à l'intérieur de cette enveloppe commune, une infinité de sentiments et même d'actions existent qui font de nous des individus uniques, surtout sur le parcours d'une vie entière! Nous sommes tous très semblables dans notre manière de fonctionner et d'agir. Mais nous sommes tous singuliers et uniques, au sens de la singularité du soi (du *self*) et non de la singularité des mathématiciens, un concept très mal réutilisé par certains transhumanistes et Ray Kurzweil en premier, comme nous l'avons vu dans le chapitre 1. Les biologistes savent de mieux en mieux décrire ce qui est commun: ils étudient des groupes de souris ou de vers de terre supposés génétiquement identiques et cependant mesurent des paramètres cérébraux qui peuvent varier d'un animal à un autre. Ils peuvent calculer des moyennes et les comparer à celles d'un groupe de souris différentes, par exemple pour tel ou tel gène, mais ils ne savent pas élucider ce qui sous-tend cette variabilité inter-individuelle qui s'inscrit de plus dans un parcours de vie où de multiples événements différents, même chez le simple vers *C. elegans*, créent un certain degré d'individuation. Les neuroscientifiques pensent toujours que le substratum anatomique et fonctionnel de cette singularité cérébrale se niche dans de subtiles mais complexes variations des réseaux de synapses. Des avancées technologiques récentes font apparaître un niveau encore plus vertigineux de complexité et de variabilité cellulaire. D'une manière générale et jusqu'à présent, les différents types ou classes de neurones sont définis sur des bases anatomiques (forme, lieu où ils se trouvent, structures auxquelles ils appartiennent) et leurs rôles fonctionnels (motricité, vision, mémoire...). Ainsi, par exemple, les cellules de Purkinje du cervelet, en forme d'espallier de vigne, et les neurones CA1 de l'hippocampe, en forme

de pyramide, jouent un rôle essentiel dans les processus de mémorisation. Des études à différents niveaux d'analyse de l'expression de gènes au niveau de neurones individuels (un véritable exploit technique), ont été réalisées par le laboratoire de Fred Gage au Salk Institute en Californie du Sud. Les résultats montrent que chaque neurone est différent de son voisin! De ces travaux, il faut donc penser que chacun des cents milliards de neurones qui constituent notre cerveau doit être considéré comme unique... C'est dantesque! Or ce qui intéresse Oriane Dioux, c'est de télécharger sur une puce son propre cerveau et toutes ses capacités et non pas celui d'un monsieur X moyen qui aurait perdu tout son *self*; l'obstacle lié à l'intelligence artificielle reste immense, mais n'est rien comparé à l'obstacle issu de l'exquise variabilité biologique que nous venons d'énoncer! Courage messieurs et mesdames les transhumanistes! Malgré l'argent qui coule à flots, de Google en particulier, vous risquez de vous casser les dents sur cette complexité.

2045, c'est l'année où les transhumanistes nous promettent ce grand chambardement et c'est demain. Aurons-nous compris le fonctionnement du cerveau humain et dans toutes ses composantes à cette date? Certainement pas! Ce chapitre et le précédent ont illustré la complexité du fonctionnement du cerveau. Nous savons beaucoup mais il y a encore tellement de choses à déchiffrer et ce à tous les niveaux: génétique, biochimique, cellulaire, réseaux, comportements, fonctions... et c'est apprendre et comprendre qui est enthousiasmant, et non pas délirer sur des fantasmes. Alors quand? Dans 100, 200 ans? Probablement jamais. Et puis deux questions fondamentales se posent: quels sont les risques de telles manipulations et les problèmes moraux et éthiques associés? Quel serait le programme idéal (s'il existe!) pour l'avenir de l'humanité?

Le bien vivre ensemble consiste-t-il à étendre à tout le monde ce qui est pour l'instant réservé aux militaires au combat, c'est-à-dire augmenter les performances (endurance, rapidité, prise de décisions, etc.) ? Le bien-être, voire le bonheur, de l'homme et de la femme futurs ne repose-t-il pas sur des valeurs qualitatives comme le goût pour les œuvres créatrices (la réflexion, l'art...), la convivialité, les émotions même fugaces, s'abandonner à la séduction réciproque, vivre une sexualité assumée, etc. ? Cette dimension qualitative symbolique et culturelle représente depuis toujours le privilège des humains sur les animaux et peut-être que le prix à payer pour la sauver est que persiste du fragile et du mortel en l'humain. À l'Homme simplement augmenté ou « boosté », on pourrait préférer « l'Homme amélioré » ; cela pose d'ailleurs un problème d'ambiguïté linguistique car en anglais (langue ultra-prédominante des scientifiques) *enhanced* signifie à la fois « augmenté » et « amélioré », ce qui n'est pas forcément la même chose !

Finalement, que faut-il retenir ?

L'identité correspond à la conscience que l'on a de soi, une représentation et une entité que l'on parvient progressivement à dégager de l'ensemble de ses propres comportements et de ses sentiments. Elle forge en partie la personnalité, les caractéristiques ou traits d'un individu que l'entourage perçoit. Toutes deux, identité et personnalité, se construisent selon les événements que l'on mémorise, plus ou moins bien en fonction des émotions qui leur sont associées. La mémoire est une étape incontournable dans la construction de la conscience et de l'identité d'un individu. Elle « conserve » des informations autant qu'elle les « sélectionne » ; et c'est en partie au travers du

ÇA VA PAS LA TÊTE!

filtre des émotions que s'opère ce tri pour aboutir à une représentation consciente cohérente de soi, du monde et de son propre et singulier rapport au monde que l'on peut appeler le phénomène d'individuation. La mémoire, propre à chacun, représente aussi notre relation au temps qui passe : le passé, le présent, mais aussi le futur, avec la faculté de se projeter dans l'avenir. Pour rendre le phénomène encore plus complexe, l'individuation elle-même change avec le temps qui passe dans notre vie. L'adolescent de 14-15 ans est-il le même que le jeune homme de 20 ans avec ses rêves et désirs pour la vie qui s'annonce et que le jeune retraité dont le cerveau est riche de l'expérience passée, mais aussi de certaines désillusions ?

C'est pourquoi le cerveau de chaque individu est unique et que l'intelligence artificielle, à supposer qu'elle y arrive un jour, a encore beaucoup de chemin à parcourir pour mettre en œuvre un outil aussi compliqué, subtil, performant et changeant que le cerveau humain. Quant à transférer notre esprit depuis le cerveau vers une machine afin d'aboutir à une vie éternelle débarrassée d'un cerveau encombrant et vieillissant, il s'agit d'un fantasme de quelques mégalomanes qui a pour but d'abolir la mort de quelques privilégiés. Cela pose également quelques problèmes éthiques !

CHAPITRE 4

L'Homme préservé, oui mais combien de temps ?

Nous sommes en 2315, Juliette s'apprête à fêter son anniversaire, elle a 300 ans demain ! Elle est née en 2015, confirmant à posteriori les prédictions que le médecin et journaliste Laurent Alexandre avait faites à cette époque avec l'assurance qu'on lui connaît. Avec quelques amies, un peu plus jeunes mais guère plus, elles ont décidé de faire une grande fête. Peut-être même danseront-elles un peu. Elle a invité quelques copains et copines, plus jeunes. Juliette s'occupe de la décoration, Caroline des gâteaux et Martine des boissons. Elles sont encore en forme, même si quelques petits maux les tourmentent un peu. Juliette se sent un peu « lente » à côté de Martine, de 50 ans sa cadette, mais elle est très fière de son visage, à peine quelques rides. Caroline s'occupe encore un peu de son potager. Et puis Juliette a plein de projets : avec Caroline, elle va écrire un livre et elle a repéré un garçon qui

est un peu plus jeune qu'elle et qui l'attire beaucoup. Elle se sent très cougar ces derniers temps!

Est-ce de la science-fiction? Et si les transhumanistes avaient raison? « Vivre 300 ans, ce sera un jour possible », titre *l'Express* en 2016, commentant le livre du philosophe Luc Ferry *La Révolution transhumaniste*. « *L'homme qui vivra 1 000 ans est déjà né* », proclame Laurent Alexandre, apôtre de ce courant d'idées et ajoutant ainsi d'un coup 700 ans aux prédictions les plus optimistes. « *La mort de la mort* » est annoncée.

Faut-il vraiment croire à toutes ces prophéties? Et si la fontaine de Jouvence et le rêve de l'immortalité devenaient plus que des mythes? Il est toujours permis de rêver, mais essayons d'avoir un avis « objectif » quitte à balayer ces élucubrations!

Y a-t-il une limite à l'espérance de vie?

La vie se déroule en trois phases distinctes : le développement, qui est le temps de la croissance, la reproduction, qui est celui de la fertilité, seule à intervenir dans l'évolution biologique, et la sénescence, qui est le temps physiologique aboutissant à la mort, en tout cas à la mort non accidentelle. Le vieillissement, ou sénescence, est un processus naturel qui entraîne une dégradation, plus ou moins lente selon les espèces, des fonctions d'un organisme.

Trois schémas différents de la sénescence s'observent dans la nature :

– La sénescence rapide, qui se caractérise par une reproduction unique et un déclin accéléré après la maturité sexuelle, comme c'est le cas pour le saumon ou la pieuvre.

– La sénescence graduelle, qui s'accompagne d'une diminution progressive du potentiel de fertilité, telle qu'elle est observée dans la plupart des espèces comme les mammifères (dont nous) et les oiseaux.

– La sénescence négligeable, qui est associée à une fertilité croissante après la maturité, et cela presque jusqu'à la mort. C'est le propre des tortues, des crustacés et de certains poissons.

Au total, les différences de longévité sont très grandes entre les espèces, allant de quelques heures à quelques jours pour les éphémères, à plus de deux ans chez la souris, plus de 100 ans chez l'humain et supérieures à 200 ans chez certaines tortues des Galápagos.

Dans l'espèce humaine, l'espérance de vie à la naissance et l'espérance de vie à 65 ans ont considérablement augmenté. La première grâce à la diminution de la mortalité infantile et l'amélioration des conditions d'hygiène depuis le début du ^{xx}e siècle, la seconde par la diminution plus récente, grâce aux progrès de la médecine, de la morbidité chez la personne âgée – qui peut d'ailleurs vivre cette période de la vie sans incapacités majeures. On est loin de la description faite par Shakespeare du dernier âge de la vie dans *Comme il vous plaira* où il dépeint le septième et dernier âge de l'existence comme « *un état d'oubli profond où l'homme se trouve sans dents, sans yeux, sans goût, sans rien* ».

L'allongement de la durée de vie maximale, qui est d'abord apparu dans les pays développés ayant un bon système de santé, va rapidement, mais inégalement, gagner les pays en voie de développement à forte croissance comme la Chine. Mais même lorsque l'espérance de vie moyenne était beaucoup plus basse, autour de 40 ans par exemple, il y a toujours eu des sujets qui vivaient très vieux: ainsi l'écrivain Bernard Le Bouyer de Fontenelle est-il mort à 100 ans en 1757 d'une « *impossibilité d'être* » et Voltaire à 84 ans en 1778. La longévité a continué à

s'allonger régulièrement, environ un trimestre par an, ce qui est considérable. En France, en 2000, elle atteignait 78 ans chez les hommes et 82 ans chez les femmes; en 2016 elle est respectivement de 79,4 ans et 85,4 ans, l'écart étant lié à des différences multiples, hormonales et immunitaires notamment, mais aussi sociologiques. Si cette évolution se poursuit, en 2070, la longévité devrait atteindre 90 ans pour les hommes et 93 ans pour les femmes. Cependant, des études fondées sur l'analyse de données démographiques, publiées en 2016 dans la célèbre revue *Nature*, semblent indiquer qu'il existe une limite à la durée de vie dans notre espèce. Par exemple, en 1980 le nombre de personnes les plus âgées a atteint un pic. Depuis cette date, il est en diminution et personne n'a battu le record de Jeanne Calment décédée à 122 ans et 164 jours en 1997. Or, si des limites biologiques n'existaient pas, ce nombre aurait dû augmenter. Aux États-Unis, l'espérance de vie a pour la première fois reculé en 2015, de 0,1 an par rapport à 2014. Ce recul est attribué à une augmentation de la mortalité résultant de diverses pathologies dont la maladie d'Alzheimer. L'espérance de vie a également reculé en Russie, mais dans ce pays il semble que l'alcool consommé soit en cause! A-t-on atteint un plateau qui pourrait se situer autour de 115 ans selon les travaux du généticien néerlandais Jan Vijg en 2017?

L'hypothèse d'une limite supérieure à l'espérance de vie reste cependant controversée dans le milieu médical et scientifique et bien entendu pour les transhumanistes, dont certains nient même son existence.

Pister les mystères de la longévité

La longévité dépend très généralement de deux types de facteurs: les facteurs génétiques appelés «gérontogènes» et

les facteurs environnementaux. Dans une même espèce, les facteurs génétiques individuels interviennent, comme le montre la comparaison entre jumeaux monozygotes (vrais jumeaux) et dizygotes (faux jumeaux), la différence d'âge au décès du second jumeau étant plus grande chez les dizygotes. Les facteurs liés à l'environnement jouent également un rôle très important.

Cette espérance de vie, si possible « en santé » comme disent les chercheurs québécois et que l'on pourrait traduire dans la langue française par « vieillissement enchanté », est régulée aussi bien par l'action d'un certain nombre de ces gérontogènes que par l'action de l'environnement, et en particulier l'alimentation. Quels sont donc ces gènes et ces facteurs qui rendent un organisme simple (le petit ver *C. elegans*) ou complexe (l'humain) capable de vivre longtemps?

C'est grâce à l'essor récent de la génétique et de la biologie du vieillissement (une discipline toute jeune!) que l'on a pu comprendre les principaux phénomènes et mécanismes du vieillissement au niveau cellulaire et moléculaire. Mais une question fondamentale se pose : les mécanismes qui permettent à une cellule de vivre longtemps sont-ils les mêmes que ceux qui font vivre un organisme entier longtemps? Pour y répondre, il est essentiel de confronter ces deux niveaux d'étude, à savoir la longévité de la cellule et la longévité de l'organisme entier.

Toute cellule est le siège de milliers de réactions biochimiques qui mettent en jeu de très nombreuses molécules essentielles au bon fonctionnement de l'organisme. C'est ce que l'on appelle le métabolisme. Tout le monde a entendu parler, par exemple, du métabolisme des glucides (au travers d'un message du type « *surtout ne pas manger trop de sucres rapides* »), des lipides (« *attention aux bons et aux mauvais acides gras* ») et des acides aminés, les briques des protéines.

À chaque glucide, ou toute autre molécule, correspond une «voie métabolique» (un ensemble de réactions pour en assurer la production). Les différentes voies métaboliques forment des réseaux particulièrement enchevêtrés et ramifiés – on pourrait même dire «emmêlés» – le long desquels les molécules sont produites et transformées. Ceux qui se sont adonnés un jour aux joies de la pêche à la ligne comprendront ce que veut dire «emmêlé», à quel point ces réseaux peuvent être des casse-tête très complexes. D'autant plus qu'ils doivent être finement régulés car l'environnement des cellules se modifie en permanence. Plongeons dans ce joli sac de nœuds pour mettre le doigt sur les gènes qui sont les «chefs d'orchestre» des voies métaboliques capables d'agir sur la longévité de façon concertée et harmonieuse dans tout l'organisme.

La première et la plus connue des voies métaboliques est celle dite de l'insuline, une hormone. En 1993, la biologiste américaine Cynthia Kenyon a, la première, identifié un gène capable d'augmenter la durée de vie de notre star des labos, *C. elegans*: le gène daf-2. En inhibant son activité, elle parvint à doubler la durée de vie du ver. Pas mal! Cette découverte et celles qui ont suivi ont permis à Cynthia Kenyon d'être embauchée par Calico, une entreprise de Google créée en 2013, dont le but annoncé est de repousser les limites de l'espérance de vie en combattant le vieillissement et les maladies associées. On ne sait pas grand-chose de Calico, sauf qu'elle a recruté Cynthia Kenyon! À la suite de cette découverte, tout le réseau de gènes impliqués dans cette première voie a été identifié: son activation permet l'entrée dans le noyau de la cellule du gène daf-16 qui stimule l'expression de gènes s'opposant au processus de vieillissement – l'homologue de daf-16 chez l'humain est le gène FOXO-3 qui joue un rôle similaire.

Mais où est l'insuline dans tout ça? En fait, daf-2 est l'équivalent chez *C. elegans* du récepteur de l'insuline (une protéine de la membrane cellulaire qui lie l'insuline) chez l'Homme, d'où le nom de cette voie de signalisation. On la retrouve quasiment inchangée chez de nombreuses espèces, de la drosophile aux mammifères dont la souris et l'Homme, même si elle se complexifie chez ces derniers. L'ensemble des gènes de cette voie a depuis été découvert, ainsi que leurs cibles dans les cellules.

Des chercheurs du *Buck Institute for Research on Aging*, basé en Californie, sont allés encore plus loin en travaillant toujours sur le même ver. L'équipe de Brian Kennedy avait déjà réussi à augmenter de 30 % l'espérance de vie de cet animal en agissant sur la voie de l'insuline, mais aussi en intervenant uniquement sur l'enzyme mTOR (de l'anglais *mammalian target of rapamycin*, en français « cible de l'antibiotique rapamycine chez les mammifères »), une enzyme qui participe à plusieurs voies de signalisation incluant celle de l'insuline. En agissant simultanément sur ces deux voies – celle de l'insuline et celle de mTOR –, le résultat a été exponentiel : le ver a vu son espérance de vie multipliée par cinq. Soit l'équivalent d'une vie de 500 ans environ pour notre espèce ! Et les transhumanistes d'y trouver là la preuve qu'ils ont raison, la « mort de la mort » ou presque est annoncée puisqu'il suffit de bloquer daf-2 et d'absorber de la rapamycine et le tour est joué ! Sauf que personne ne dira le contraire, le ver, ce n'est pas l'Homme, même si la rapamycine est aussi capable d'augmenter la longévité d'un mammifère. Et s'il était aussi simple d'allonger l'espérance de vie, ça se saurait ! Car la rapamycine, on la connaît depuis 1964 lorsqu'elle a été isolée à partir d'échantillons de sols prélevés sur l'île de Pâques, dans le Pacifique. Elle a certes des propriétés immunosuppressives (en clair, elle inhibe les réactions du système immunitaire) qui se révèlent

intéressantes pour éviter tout rejet dans le cas de greffes, mais rien de plus spectaculaire chez l'Homme.

Il existe une autre voie métabolique importante dans la longévité et dont on parle régulièrement: celle de la restriction calorique. Un secret pour vivre plus longtemps serait de manger moins, nous disent certains médias. Et pour preuve: les vieillards de l'île japonaise d'Okinawa battent des records de longévité grâce à un régime alimentaire pauvre en calories (ce qui en japonais se conçoit comme le *Hara Hachi Bun me*, littéralement «la règle du ventre repu à 80 %»). À l'exact opposé de la malbouffe qui engraisse les États-Unis mais pas que. Or il est vrai que l'on peut augmenter expérimentalement la longévité en réduisant de 30 % à 40 % l'apport calorique, sans créer de carence évidemment, que ce soit chez la levure, les vers, les souris ou les primates. Il semblerait que dans l'île d'Okinawa des habitudes de vie et de régime comparables aient pu persister et pourrait expliquer le nombre élevé de centenaires en bonne forme. Mais la généralisation d'une restriction calorique n'est pas vraiment envisageable chez l'Homme si l'on songe aux obstacles considérables qu'entraîne l'observance à long terme d'un simple régime modéré!

L'idée est plutôt est de trouver des molécules qui miment l'effet de cette restriction calorique. Les gènes impliqués sont nombreux: on peut citer une famille de molécules appelées sirtuines qui régulent le métabolisme de la graisse et du glucose. D'ailleurs un nouveau régime est apparu: le «régime sirtuine». Il repose sur la consommation d'aliments qui interfèrent avec ces molécules, comme le vin, le chocolat... et le chou (ça aurait été trop beau!). Pourquoi ces aliments? Parce qu'ils renferment du resvératrol, une molécule qui active les gènes sirtuines. Boire du vin rouge, qui contient le fameux resvératrol, serait bénéfique car une fois réactivés, ces gènes donnent un «coup de jeune» aux

mitochondries, ces mini-batteries cellulaires qui s'épuisent avec le temps. Le problème est qu'il faudrait boire du vin en grande quantité, plusieurs litres par jour, pour ingérer ce qu'il faut de resvératrol! Les essais de supplémentation par la molécule pure ne semblent cependant pas concluants. La voie du métabolisme de la mitochondrie est d'ailleurs elle aussi intéressante. Quand on abaisse le niveau de certains gènes mitochondriaux, on augmente la durée de vie du ver nématode ou de la drosophile. Prometteuse ici aussi chez le ver et la drosophile, cette piste n'a pas encore reçu de confirmation chez les mammifères et à fortiori l'humain.

Un autre moyen d'agir pour trouver la fontaine de Jouvence serait de « taper » sur les tissus reproducteurs! Car les hormones sexuelles sont intimement liées à la voie de la restriction calorique. Des études menées du ^{xiv}^e au ^{xx}^e siècle sur les eunuques nord-coréens ont montré que leur espérance de vie est bien plus importante que la moyenne. Par ailleurs, la suppression des tissus reproducteurs augmente notablement la durée de vie de la drosophile ou du ver nématode : plusieurs gènes interviennent, dont *nhr-80*, découvert par le biologiste Hugo Aguilaniu qui travaillait encore récemment sur ce sujet en France. Tiens les transhumanistes n'ont pas pensé à cela : pour vivre plus vieux, vivons castrés!

Évidemment, il a été tentant de voir si les hommes (ou plutôt les femmes!) ayant vécu très longtemps avaient des variants spécifiques de certains de ces gérontogènes et en quelle quantité. En 2014, le « club des supercentenaires » (plus de 110 ans) comptait dans le monde 77 femmes et 2 hommes ayant dépassé 110 ans, selon le *Gerontology Research Group* (Californie, États-Unis). Ces « superseniors » cacheraient-ils dans leurs gènes le secret de longue vie? La même année, une étude publiée dans la revue *Plos One* menée par l'université de

Stanford (Californie) a livré les résultats de l'analyse du génome de dix-sept d'entre eux. Et... déception! Le séquençage n'a révélé aucune variation spécifique liée à leur extrême longévité. *« Cette recherche des gènes de la longévité n'a pas beaucoup de sens actuellement, explique Jean-Marie Robine (dans un article de Sciences et Avenir en 2015), démographe à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm) et professeur à l'École pratique des hautes études (Paris). Jeanne Calment, comme les autres supercentenaires, avait probablement une combinaison exceptionnelle de gènes. Mais la puissance des analyses actuelles n'est pas suffisante pour la découvrir. Quand bien même nous la trouverions, qu'en faire? Les individus de plus de 110 ans sont trop peu nombreux pour en tirer une vérité statistique. »*

À la recherche de l'élixir de jouvence

En plus des gérontogènes, quels sont les mécanismes qui permettent à une cellule (levure, bactérie, cellule humaine en culture...) de vivre longtemps? Pour faire simple, sous l'effet du temps, toute une série de phénomènes intriqués se mettent en place. Une des grandes découvertes de la biologie du vieillissement est que ces phénomènes sont communs à toutes les cellules, aussi bien celles du cœur, du foie et du rein que les neurones. Très schématiquement, ces mécanismes sont de deux types: les phénomènes qui protègent la cellule et ceux qui la détériorent.

Il existe des phénomènes protecteurs des cellules, mais leur efficacité va malheureusement se dégrader au cours du temps. Parmi ces mécanismes, on peut citer ceux qui assurent le maintien de protéines en bon état de fonctionnement ou au contraire ceux qui éliminent des protéines qui vieillissent mal. Dans les cellules, de toutes petites usines de plusieurs centaines

de protéines, appelées «protéasomes», se chargent d'éliminer les «vieilles» protéines. Le problème est que ces protéasomes eux aussi vieillissent et leur efficacité pour digérer les vieilles protéines baisse avec le temps. Il existe aussi des phénomènes d'autophagie qui favorisent le «recyclage» du contenu cellulaire. Dans la plupart des situations, l'autophagie est bénéfique pour la cellule car elle en permet la survie, mais si elle se développe trop, elle peut provoquer sa mort. Autres phénomènes protecteurs de la cellule, des enzymes spécialisées, comme la célèbre PARP, qui permettent de réparer les doubles brins de l'ADN des lésions induites par de nombreux facteurs, dont les radicaux libres (voir plus bas) : ces lésions peuvent bloquer ou rendre très anormale la réplication (ou synthèse) de l'ADN.

Les phénomènes qui détériorent la cellule correspondent, eux, à une augmentation avec le temps de processus toxiques ou délétères. Et ils sont nombreux ! Voici les principaux.

1. Au cours de la vie, la plupart de nos organes sont « remis à neuf » en quelque sorte, grâce à la multiplication cellulaire (ou division !) qui est donc un processus fondamental. Dès 1965, un précurseur, l'Américain Leonard Hayflick, a montré qu'au bout de cinquante divisions environ, toute cellule ou presque mise en culture cesse de se multiplier. Cet arrêt caractérise l'état de sénescence, qui peut conduire à un état de quiescence, de « repos » cellulaire, mais ces cellules peuvent continuer à vieillir. Elles sont alors absorbées et détruites, digérées par des cellules du système immunitaire, les macrophages. Ce phénomène, découvert en 1904 par le grand chercheur de l'Institut Pasteur Elie Metchnikoff, s'appelle la phagocytose. Le mot a eu tel succès qu'il a été repris dans le langage commun : Google a phagocyté presque tous ses concurrents, par exemple.

Mais avec l'âge, ce système de nettoyage devient moins efficace, les cellules sénescents s'accumulent et sécrètent des molécules multiples qui créent des inflammations chroniques, souvent associées à des maladies liées à l'âge (on parle de l'inflammasome). Récemment, une équipe de chercheurs américains de la Mayo Clinic (Minnesota, États-Unis) a découvert une cure de jeunesse capable de prolonger de 30 % l'espérance de vie des souris ! Il suffit d'éliminer les cellules sénescents, par un tour de passe-passe génétique. Et les résultats de l'étude ne s'arrêtent pas là, puisque si les rongeurs vivent plus longtemps, ils vivent aussi en meilleure santé. Les souris traitées sont moins touchées par les maladies cardiaques, leurs reins sont mieux préservés, les cancers apparaissent aussi plus tard. Les manipulations génétiques utilisées dans cette expérience ne se pratiquent pas chez l'humain. Mais on espère la mise au point d'une nouvelle classe de médicaments dits sénolytiques, pour diminuer le nombre de cellules sénescents. Et ça peut marcher... du moins chez la souris. Certaines cellules sénescents résistent toutefois : celles situées dans certains organes tels que le foie ou le côlon, par exemple. Reste à savoir pourquoi, et cela les scientifiques ne le savent pas. En tout cas pas encore.

Aux risques de décevoir les transhumanistes, la quête de la jeunesse éternelle ne devrait donc pas se terminer de sitôt. D'autant que la destruction des cellules vieillissantes ne freine pas le déclin des performances motrices, de la mémoire ou de la force musculaire. Peut-être qu'il existe plusieurs types de cellules sénescents ou qu'elles n'interviennent pas dans ces fonctions.

2. Autre progrès fondateur : la découverte du rôle des télomères et de la télomérase dans le maintien de l'intégrité du génome, le contrôle du vieillissement et la prolifération cellulaire. Cette découverte a valu en 2009 le prix Nobel de médecine à Elizabeth Blackburn, Carol Greider et Jack Szostak.

Les télomères sont des séquences répétées de l'ADN placées à l'extrémité des chromosomes et qui protègent ceux-ci de la dégradation. Mais à chaque division cellulaire, ils sont raccourcis. Quand leur longueur atteint un seuil limite, c'est fini. La cellule arrête de se diviser et entre en sénescence. Mais le phénomène n'est pas inéluctable grâce à la télomérase! Cette enzyme se charge de reconstituer l'extrémité des chromosomes, quoique de moins en moins efficacement avec l'âge. Et en 2011, des chercheurs de Harvard, ont réussi à inverser le processus de vieillissement en modifiant l'activité de cette enzyme. Mais l'activité mal contrôlée de la télomérase peut induire des divisions cellulaires anormales, conduisant à des cellules immortelles dont la production peut entraîner des cancers associés au vieillissement.

Parmi les phénomènes qui détériorent la cellule, il y a aussi le «stress oxydatif», c'est-à-dire la production des célèbres radicaux libres (les «espèces réactives de l'oxygène») qui, à petites doses, sont indispensables au bon fonctionnement de la cellule, car ils interviennent comme activateurs de certaines voies métaboliques, mais dont l'excès devient toxique; cet excès peut être dû à une surproduction ou au contraire à une baisse des mécanismes d'élimination des radicaux libres. Certes, il existe des anti-oxydants, dont les plus connus (vitamines C et E) sont apportés par l'alimentation, mais aussi des enzymes anti-oxydantes qui ont besoin d'oligo-éléments comme le fer, le zinc pour dégommer les radicaux libres. Mais avec le temps, les rides apparaissent, signe qu'un stress oxydatif excessif est à l'œuvre malgré les efforts pour arrêter le processus, dont l'utilisation des crèmes anti-âge!

3. Un autre phénomène essentiel est l'inflammation, dont l'intensité augmente au cours du vieillissement et dont l'étude a été révolutionnée par la découverte des molécules médiatrices de l'inflammation, en particulier la famille des cytokines ou interleukines inflammatoires. Avec le temps,

l'inflammation chronique provoque une dégradation du cartilage, des vaisseaux sanguins et du cerveau bien sûr, à l'origine de nombreuses maladies. Il faut consommer des omega-3, puissants anti-inflammatoires, pour ralentir leur attaque. Mais à l'évidence ça ne suffit pas!

4. Enfin, les cellules peuvent se suicider! C'est la mort cellulaire qui existe sous différentes formes, dont l'autophagie déjà évoquée et l'apoptose (aussi appelée « mort cellulaire programmée»). Le suicide cellulaire est un phénomène naturel et physiologique au cours du développement de l'embryon puis du fœtus, qui, dans une harmonie parfaite, régule et ajuste dans les différents tissus le nombre de cellules issues de la prolifération des cellules immatures. Avec le temps, la prolifération s'essouffle et l'apoptose gagne du terrain. Le gène Myc, pour ne citer que lui, est un des nombreux gènes qui jouent un rôle dans la division cellulaire et l'apoptose. En 2015, des chercheurs de l'université Brown, aux États-Unis, ont permis à des souris de gagner 10 à 20 % d'espérance de vie et de vieillir plus lentement en neutralisant le gène Myc. De plus, ces souris n'ont montré aucun signe d'ostéoporose (en raison d'un manque de sels minéraux, les os se fragilisent et se cassent plus facilement, en particulier chez les femmes ménopausées) ni de fibrose cardiaque (les fibres cardiaques se transforment et perdent leurs propriétés) et avaient un taux de cholestérol plus bas que les souris non modifiées. Elles étaient également plus adroites et en général plus actives. La même année, une équipe de l'université Harvard, toujours aux États-Unis, a réussi à redonner des muscles et des artères de souris à une souris décatie! Comme si une personne de 60 ans retrouvait d'un coup la vitalité et la musculature de ses 20 ans! Le rêve quoi! Mais là encore, la transposition à l'humain est encore très très loin d'être effective.

Que conclure de ce qui précède? La vie de la cellule résulte d'un équilibre délicat entre effets protecteurs et délétères et, avec le temps, les effets délétères gagnent du terrain. Les études évoquées montrent, s'il en était besoin, que le vieillissement met en jeu de nombreux gènes, protéines, processus biologiques... On ne pourra pas stopper ou ralentir le vieillissement en jouant sur une seule molécule. Cela aurait été trop simple. Tous les processus génétiques et métaboliques mis en jeu sont liés et tirer sur un seul fil ne suffit pas à tout changer et à stopper le vieillissement, voire revenir en arrière, même s'il existe une convergence entre les phénomènes élémentaires (cellulaires) et ceux qui agissent dans l'organisme entier. En attendant la mise au point d'un hypothétique élixir de jouvence à partir de tous ces travaux, mieux vaut jouer sur d'autres leviers pour augmenter ses chances de vivre vieux et en bonne santé. « *Un quart des déterminants d'une grande longévité sont liés à des caractères héréditaires* » (contre lesquels, on ne peut rien ou pas grand chose) rappelle Thomas Perls, du *Boston Medical Center*, un des leaders de l'étude des gérontogènes. À contrario, les trois quarts des facteurs de longévité sont liés à l'environnement et au mode de vie, l'alimentation par exemple, que nous avons évoquée à propos de la restriction calorique. À bon entendeur...

*Ralentir le vieillissement...
pour vivre vieux et en bonne santé*

Augmenter la durée de vie, c'est bien, mais encore faut-il ralentir le vieillissement. Car vivre 300 ou 1 000 ans n'a de sens que si l'on est en forme et sans troubles importants physiologiques et cognitifs. L'indicateur que tout le monde privilégie maintenant est celui de l'espérance de vie en bonne santé. En

effet, l'augmentation de la longévité engendre de nombreux problèmes aussi bien médicaux que de santé publique. Elle accroît la fréquence des maladies chroniques de toutes sortes – cardiovasculaires, cancers, maladies rénales et maladies dégénératives du système nerveux, etc. – et leur association souvent chez un même patient que l'on dit alors porteur de «comorbidités». L'augmentation de la longévité conduit aussi à réévaluer les politiques publiques avec d'importantes conséquences économiques pour la société et des conséquences individuelles dramatiques pour certains sujets qui perdent leur autonomie et deviennent dépendants.

Notre corps change tandis que l'âge avance et généralement son fonctionnement n'évolue pas en bien! Certains, et non des moindres comme le Général de Gaulle, ont même affirmé que le vieillissement était un naufrage! En fait, ce qui caractérise l'avancée en âge, ce sont les grandes différences qui apparaissent entre les individus. Certes, le déclin des performances physiques ou intellectuelles est inéluctable, en particulier dans le très grand âge, même si certains individus conservent des qualités physiques et intellectuelles remarquables. On citera par exemple l'agilité intellectuelle exceptionnelle du philosophe Edgar Morin qui, à 96 ans, publie encore des livres et débat brillamment en public, et les capacités physiques tout aussi remarquables du cycliste Robert Marchand, né en 1911, auteur de nombreux exploits cyclistes et recordman de l'heure à vélo avec ses 27 km parcourus en 2014 à 102 ans et 22,5 km en janvier 2017 à presque 106 ans! Mais même des octogénaires et des nonagénaires alertes et brillants sont souvent bardés de lunettes, d'appareils auditifs ou autres prothèses sensorielles. Nos capteurs sensoriels déclinent de façon marquée avec l'âge. En particulier la vision et l'audition. Les entrées d'informations s'en trouvent donc restreintes, ce qui isole un peu plus la

personne âgée. Le vieillissement des organes sensoriels entrave donc la perception correcte des stimuli du monde extérieur et aura des répercussions sur l'état cognitif de la personne âgée.

« *T'as mal où ?* »

« *Tiens, il (elle) a pris un coup de vieux !* » Nous avons tous fait cette sympathique réflexion en retrouvant un ami, un parent, une relation perdue de vue depuis un certain temps. Et d'ailleurs, un sujet de conversation récurrent chez les personnes d'un certain âge, disons au-delà d'environ 60 ans, c'est d'évoquer leurs petits maux. N'avez-vous jamais été témoin d'un tel dialogue ? Vous êtes tranquillement assis à une terrasse de café, deux charmantes dames d'un certain âge, mais en bonne forme apparente, papotent entre elles ; vous les entendez dialoguer sans réellement écouter leur conversation ; après les petits enfants, les voyages, invariablement arrive le : « *T'as mal où ?* ».

Pour l'instant, et sans même parler de pathologies, le vieillissement de l'individu est inéluctable et touche tout le monde, même si les manifestations du vieillissement sont très hétérogènes d'un individu à l'autre.

Diabète, arthrose, rhumatismes, ostéoporose, troubles de la vue, de l'audition, perte légère de mémoire, diabète associé à un surpoids et à un excès de « mauvais » cholestérol... les petits maux sont nombreux et variés et parfois pas si petits que ça car ils peuvent se compliquer et aboutir à de véritables maladies diverses liées à l'âge. Notons que parfois les opinions ou même les dogmes peuvent changer en fonction d'études successives : ainsi le rôle du cholestérol dans l'athérosclérose et les maladies cardiovasculaires est maintenant quelque peu

réévalué... ainsi que la surconsommation des médicaments qui en abaissent le taux dans le sang (les statines).

Certains organes, comme l'œil, fonctionnent de manière optimale pendant 20 à 30 ans, puis déclinent d'années en années. Nombre d'entre nous avons une excellente vue étant jeune, puis la presbytie est apparue ou la myopie ou l'astigmatisme ou l'hypermétropie, et souvent plusieurs à la fois... Sept adultes sur dix portent des lunettes et il se vend environ une monture de lunettes toutes les deux secondes! Le port des lunettes et/ou lentilles augmente avec l'âge (et donc avec l'apparition des troubles visuels), concerne 25 % des moins de 20 ans, pour atteindre six quadragénaires sur dix et neuf personnes sur dix après 50 ans. Le problème de la sécheresse oculaire touche aussi particulièrement les personnes âgées. En l'absence de larmes, la surface de l'œil n'est pas protégée et devient donc vulnérable. Cela entraîne une irritation chronique qui peut provoquer des lésions de la cornée. La cataracte, le glaucome sont aussi des affections invalidantes de l'œil, dont la fréquence augmente avec l'âge.

Du côté de l'oreille, la perte progressive de l'audition, ou presbyacousie, est un dérèglement chronique très commun chez les personnes âgées. Plus de la moitié des personnes à 60 ans en souffriraient, à 70 ans ce sont 65 % et à 80 ans, 81 %.

Autre désagrément courant, une mauvaise circulation sanguine dans les veines entraîne la sensation de jambes lourdes. Les membres paraissent pesants, les personnes sont sensibles à la fatigue et souffrent de crampes, de picotements ou d'œdèmes. La tonicité des veines baisse avec l'âge et cause une insuffisance veineuse, fréquente chez les personnes âgées.

Genou, hanche, épaule, main, colonne cervicale ou lombaire... sont quant à eux sujets à l'arthrose. 80 % des personnes qui souffrent de cette affection douloureuse ont plus de 65 ans. L'hérédité mais aussi le surpoids favorisent

l'arthrose. C'est une maladie des articulations. Avec l'âge, le cartilage qui permet le glissement des surfaces osseuses les unes sur les autres se modifie, perdant de son épaisseur et de sa souplesse. En général, la gêne quotidienne est faible. Mais lors de poussées inflammatoires, qui correspondent à la destruction de petits morceaux de cartilage, la douleur peut être vive. À cause de l'arthrose du genou ou de la hanche, s'accroupir, se relever, enfiler ses bas ou ses chaussettes deviennent difficiles.

Les chutes des personnes âgées, qui constituent la première cause de mortalité chez les plus de 65 ans, sont un sujet de santé publique majeur dont les causes peuvent être multiples – mécaniques, liées à un malaise, ou spontanées d'origine neurologique ou non. Chaque année, près de 12 000 personnes en décèdent soit plus de 20 % de mortalité à un an, ce qui est considérable. On compte environ 50 000 fractures du col du fémur par an en France !

Sans parler de la ménopause, de l'andropause, du vieillissement immunitaire... La liste n'est pas exhaustive. Pris individuellement, ces troubles liés à l'âge ne sont pas tous graves, mais tous peuvent affecter durablement la qualité de la vie. Les progrès de la médecine ont permis de les prendre en charge et de les corriger au mieux, même si ce n'est pas complètement. Un problème cependant préoccupant est que ces maux sont souvent associés chez une même personne âgée et peuvent s'aggraver et conduire à un état dit polypathologique. L'association de ces petits maux qui peuvent devenir des maladies chroniques associées entre elles (les co-morbidités) est en fait fréquente. À partir d'un article paru dans la revue britannique *Lancet* en 2011 et qui a marqué les esprits des spécialistes du vieillissement, on peut retenir un chiffre simple : sur un quart de la population écossaise (soit 2 millions de personnes tout de même !), 60 % des sujets âgés de plus de 60 ans présentent plus de trois affections

chroniques, peu graves pour certaines mais plus sérieuses pour d'autres! Bien sûr, l'organe auquel nous nous intéressons le plus dans ce livre, le cerveau, n'est pas épargné par le vieillissement même lorsqu'il est exempt de toute maladie neurodégénérative.

Le cerveau aussi vieillit

Eh oui!, le cerveau n'échappe pas non plus au vieillissement. L'inflammation, les radicaux libres ou les changements hormonaux sont tous des mécanismes associés au vieillissement du tissu cérébral. Celui-ci est également soumis à l'influence néfaste de facteurs qui lui sont extérieurs, mais retentissent sur lui, comme les maladies cardiovasculaires, les traumatismes crâniens, un mauvais mode de vie ou un stress chronique.

La diminution de la masse cérébrale est une première conséquence du passage du temps sur le cerveau. On parle d'une perte de poids et de volume moyen d'environ 2 % par décennie à partir de 15-20 ans environ. Avec, bien sûr, des exceptions. Aujourd'hui, on ne pense plus que c'est la perte naturelle de plusieurs dizaines de milliers de neurones par jour au sein de la matière grise, qui serait la cause de la perte de volume et de poids. L'atrophie semble résulter principalement d'une perte de volume des neurones, de leurs dendrites et d'une perte de synapses, et non d'une mort neuronale proprement dite. De plus, ces altérations entraînent une baisse significative de la quantité de certains neurotransmetteurs, comme la dopamine, ce qui entraîne des problèmes cognitifs plus ou moins importants. La réduction du volume cérébral, lorsqu'elle est manifeste, ne touche pas non plus toutes les régions du cerveau uniformément. Le lobe temporal médial, où se situe

l'hippocampe, ainsi que le lobe frontal, deux structures importantes pour la mémoire, sont particulièrement touchés.

À côté de la matière grise, la substance blanche (la myéline qui entoure les nerfs) s'abîme elle aussi. L'utilisation de techniques d'imagerie spéciales montre la dégénérescence des fibres nerveuses avec des lésions de leur gaine de myéline : cet amincissement des faisceaux d'axones est largement réparti dans les profondeurs des lobes frontaux, temporaux, pariétaux, ainsi que dans le corps calleux qui relie les deux hémisphères du cerveau.

Ces anomalies ont évidemment des conséquences sur le plan fonctionnel : le vieillissement des systèmes moteurs peut entraîner des troubles des mouvements, de la marche et de l'équilibre, favorisant la chute. Si l'on essaye de corrélérer toutes ces anomalies et les performances des sujets aux tests cognitifs, il semble que l'intégrité des connexions entre les neurones (par les synapses) soit plus déterminante pour les performances d'un cerveau âgé que l'état des corps cellulaires des neurones dans sa matière grise. Il ne faut pas oublier aussi que le sommeil se modifie avec l'âge ; sa durée se réduit et il est déstructuré. La faute en est notamment à la diminution de sécrétion de l'hormone mélatonine qui contribue à mettre le bazar dans les rythmes circadiens des sujets âgés. L'évolution avec l'âge des structures neuro-hormonales (par exemple l'hypothalamus et l'hypophyse qui contiennent à la fois des neurones et sécrètent des hormones) entraîne aussi une modification de la gestion par le cerveau des stress aiguës ou répétés et chroniques.

La plasticité cérébrale se maintient, on l'a vu, au moins en partie jusqu'à des âges très avancés, et des mécanismes de compensation sont donc possibles dans le cerveau. Mais les tâches motrices ou cognitives sont alors souvent prises en charge par des voies neuronales alternatives, généralement moins efficaces, d'où un ralentissement de certaines de nos

fonctions. Plusieurs études montrent cependant que, dans leur ensemble, nos capacités cognitives ne présentent pas de déclin importants jusqu'au début de la soixantaine. Et même après, chez les personnes en bonne santé, les performances diminuent, mais très lentement et de manière inégale ; en tout cas plusieurs capacités cognitives comme le langage (vocabulaire, syntaxe...) demeurent relativement intactes et d'autres s'amélioreraient même avec l'âge (vocabulaire, compréhension, culture générale, capacité d'intuition...).

Parmi les fonctions qui déclinent, la mémoire est l'une des plus souvent citée. Mais nous avons vu au chapitre 3 que la mémoire est un phénomène complexe sous-tendu par plusieurs mécanismes, et tous ne sont pas également affectés par le vieillissement. L'une des formes les plus précocement atteintes est la mémoire dite épisodique, celle qui permet de retenir le « quoi, quand et comment ». La mémoire de travail, celle qui permet de se souvenir durant quelques secondes d'un numéro de téléphone ou de suivre le fil d'une conversation, est aussi fréquemment affectée par l'âge. La vitesse de traitement plus lente semble faire disparaître des informations de la mémoire de travail avant même qu'elles n'aient pu être consolidées dans la mémoire à long terme. Cette baisse de la mémoire de travail pourrait donc également expliquer, du moins en partie, l'oubli à plus long terme de nouvelles informations. L'étape de récupération des données (la résurgence d'un souvenir) est parfois aussi affectée, ce qui explique le phénomène du « mot sur le bout de la langue ». En revanche, la mémoire implicite (ou non déclarative), celle des conditionnements et des apprentissages moteurs, serait moins affectée par le vieillissement, de même que la mémoire sémantique des connaissances fréquemment utilisées durant toute la vie. Enfin, les troubles de l'attention sont fréquents chez les personnes âgées.

Mais l'essentiel à retenir est peut-être que les répercussions fonctionnelles du vieillissement varient énormément d'un individu à l'autre. Le déclin intellectuel n'est donc pas inéluctable, et s'il y a un déclin, il est souvent léger, n'interfère pas avec la vie quotidienne, et n'est pas forcément le début d'une démence. De plus, aux phénomènes naturels de compensation cérébrale, permis par la plasticité du cerveau, peuvent s'ajouter des moyens de compensation externe (calendriers, listes et autres trucs mnémotechniques). Sans parler de la sagesse qui viendrait en vieillissant (enfin, chez certains!), c'est-à-dire la capacité de prendre de bonnes décisions dans les domaines où nous avons accumulé beaucoup de connaissances spécialisées. Notons cependant que pour l'informatique ou les smartphones par exemple, il est peut-être sage d'avoir quand même un adolescent sous la main...

*Quand le corps va mal,
le cerveau peut souffrir beaucoup*

Le bon état du cerveau est bien évidemment soumis à l'influence néfaste de maladies dues à l'atteinte d'autres organes, comme les maladies cardiovasculaires, les maladies hépatiques ou rénales, les maladies infectieuses. On parle souvent dans ces cas-là d'encéphalopathie. C'est une pathologie qui touche l'encéphale, partie du système nerveux situé dans la boîte crânienne (en gros les hémisphères cérébraux, le cervelet et le tronc cérébral). Elle peut être une complication neurologique d'une maladie chronique, comme l'encéphalopathie hépatique qui apparaît lors de l'évolution d'une cirrhose du foie. Il en va de même quand les reins fonctionnent très mal. Dans le cas d'une insuffisance rénale, les reins sont incapables d'éliminer

les déchets, en particulier azotés, et ne contrôlent plus la concentration dans le sang de différents électrolytes (sodium, potassium). L'augmentation anormale du taux d'urée (un déchet azoté) dans le sang est particulièrement toxique et entraîne des atteintes du cerveau avec délire, confusion et agitation. L'encéphalopathie peut aussi survenir après diverses intoxications médicamenteuses ou toxiques et par atteinte virale (herpès, grippe, rubéole ou encore la varicelle) dont les conséquences sont souvent graves chez les personnes âgées.

Au très grand âge, les choses se gâtent

Lorsque le très grand âge arrive (80-90 ans selon les individus), les petits maux peuvent devenir grands. Il existe là encore une très grande variabilité et susceptibilité entre individus, mais d'une manière générale très peu de personnes aussi âgées sont vraiment encore en forme, et ceci sans développer une maladie grave.

Les grands séniors sont fragiles. Cette fragilité est devenue d'ailleurs un concept important qui définit un état de santé « intermédiaire » chez les personnes âgées chez qui des stress variés peuvent déclencher ou aggraver des pathologies diverses, aiguës ou chroniques. Un exemple de stress est une infection virale comme la grippe ou un épisode de chaleur excessive. La vulnérabilité liée à l'âge a été particulièrement mise en exergue lors de la canicule de l'été 2003 qui a provoqué 15 000 décès en quelques semaines. Quant à la dénutrition, elle touche une personne âgée sur dix à domicile et une sur deux à l'hôpital. Plusieurs facteurs se combinent pour favoriser l'apparition d'une situation de dénutrition chez

la personne âgée: le manque d'activité physique, l'altération du goût, les problèmes bucco-dentaires, la polymédication...

Dès l'âge de 50 ans, la quantité mais aussi la force des muscles commencent à diminuer. Nous perdons près de 50 % de celle-ci entre 30 et 80 ans. Lorsque les pertes de masse, de force et de fonction musculaires deviennent trop importantes, la sarcopénie (dystrophie musculaire liée à l'âge) se met en place. Cette pathologie affaiblit le muscle, accroît considérablement les risques de chutes et de perte d'autonomie, et altère la qualité de vie. En France, la sarcopénie touche 15 % des personnes de plus de 45 ans et, à partir de 75 ans environ, 25 % des femmes et 55 % des hommes. Cette maladie se traduit dans un premier temps par des difficultés à effectuer des choses simples, comme porter ses provisions, monter les escaliers ou faire de longues marches. Il s'ensuit souvent une faiblesse généralisée, facteur de chutes et donc de fractures. Cette maladie est donc un problème de santé publique.

Vieillir n'est guère réjouissant. C'est pour l'instant inévitable. Évidemment, on ne peut s'empêcher de rêver, non comme les transhumanistes à une jeunesse éternelle, mais au moins à une vie où l'individu reste autonome le plus longtemps possible, aussi bien sur le plan moteur que cognitif jusqu'à une fin de vie la plus digne possible.

Les ordinateurs également vieillissent

Pour les transhumanistes, si le cerveau vieillit mal ou peut même présenter une pathologie terrible comme la maladie d'Alzheimer ou tout simplement risque de s'éteindre à jamais avec le décès de l'individu, il y a une solution simple: les progrès de l'informatique et de l'intelligence artificielle

permettront, à n'en pas douter et en s'y prenant à temps, de s'affranchir de ces petits ennuis puisqu'il sera aisé bientôt (mais quand au fait? demain, dans un an, dans un siècle...? ah bon on ne sait pas!) de sauvegarder l'ensemble d'un cerveau humain dans une puce informatique sophistiquée et de stocker quelque part toute cette information.

Ce projet (si tant est que le mot projet au sens où les vrais scientifiques l'utilisent s'applique ici) se heurte à de très nombreux obstacles que nous avons déjà évoqués, mais il y en a un auquel il faut aussi penser: les ordinateurs vieillissent également et les procédés de stockage de l'information aussi!

Là encore, il faut savoir de quoi on parle: des transistors, des supports pour l'enregistrement et le stockage des données, des systèmes d'exploitation qui permettent aux logiciels de fonctionner (Windows, Mac OS, Linux...), des logiciels (Word, Excel...) qui servent à travailler concrètement, des machines (ordinateurs avec écrans, claviers, souris...)?

À priori, la durée de vie d'un transistor peut être très grande, et, sans atteindre l'éternité, pourrait s'étaler sur plusieurs dizaines d'années. Tout dépend des conditions d'utilisation et de stockage. En théorie, on pourrait faire des miracles en utilisant des disques à couche en or, en employant des nouveaux verres ou de l'ADN de synthèse. Mais ces procédés n'ont pas encore atteint l'ère industrielle.

Les supports (disques durs, disquettes, CD, bandes magnétiques, clés USB...) ont, quant à eux, une durée de vie de quelques années, excédant rarement la décennie. Mais le cloud peut permettre de rêver. Les transhumanistes y songent sans doute; une nouvelle manière d'envoyer son cerveau au ciel mais pour une éternité toute relative!

Les systèmes d'exploitation, parlons-en! Essayez d'ouvrir un document produit sous Word 95 avec un PC équipé

de Word 2007. Un message d'erreur vous avertit de l'échec de la manipulation. Là encore, vous avez intérêt à avoir un jeune sous la main. Et avec Windows 10, c'est perdu d'avance!

Les différents composants d'un PC ne vieillissent pas tous à la même vitesse. Le ventilateur et le disque dur sont souvent les premiers à lâcher (le disque dur doit être bien ventilé en permanence). Ces petites machines sont, comme les humains, sensibles à l'environnement: température trop élevée, humidité, lumière solaire, poussière, champs électromagnétiques, surtension, fumée de tabac (tiens, quelque chose de vraiment commun avec l'Homme!)...

En fait, la technologie vieillit mal et notamment la technologie informatique. Les machines deviennent vite obsolètes. Pourquoi cette obsolescence qui est le plus souvent programmée? Mais simplement à cause du profit! Un produit dont la longévité serait excellente rallongerait son cycle de remplacement et espacerait donc dans le temps le moment où le consommateur devra s'en procurer un neuf. Il est facile de comprendre que les GAFA, Microsoft et autres développeurs ne vont pas se saborder avec des machines super-résistantes. Les transhumanistes devront avoir de puissants lobbyistes avec eux s'ils ne veulent pas rester en carafe à un moment ou à un autre!

Et que dire de la perte brutale des données sous l'effet d'un virus, des spams, phishing, arnaques en tout genre? Ah! la vie d'une machine non plus n'est pas toute rose! Les transhumanistes devraient y songer.

Bien vieillir, que faut-il faire? L'Homme préservé

Si la médecine a fait de très grands progrès concernant les petits maux qui viennent avec l'âge, la prévention reste une

valeur sûre, avec un retentissement potentiellement bénéfique sur le cerveau.

Pour préserver le cerveau tout au long de la vie et en l'absence de toute maladie neurodégénérative, nul besoin des illuminations et des rêves transhumanistes ! Il suffit de respecter un certain nombre de règles simples déjà connues de tous et pour certaines popularisées par des auteurs médiatiques tel Michel Cymes. Le fait nouveau très important est que ces « recettes » simples ont été évaluées maintenant de manière rigoureuse comme étant de véritables « médicaments » par des études sur un grand nombre de sujets, avec une méthodologie identique à celle de véritables « essais thérapeutiques » sur les plans épidémiologique et statistique.

Les principales règles sont les suivantes :

1. Supprimer ou traiter ce que l'on pourrait appeler les principaux « bourreaux du cerveau » dont nous donnerons plusieurs exemples : le tabac bien sûr, véritable drogue dure toxique pour de multiples organes, mais aussi l'hypertension artérielle et le diabète. Ce sont des affections qui, à long terme, peuvent endommager notre cerveau, aussi bien les vaisseaux qui le nourrissent que les cellules (neurones, glies) qui le composent. Or leur dépistage est aisé par des examens simples : la prise de tension artérielle chez son médecin généraliste après dix minutes de repos allongé ; ou des tests biologiques simples comme la mesure du taux de sucres dans le sang (la glycémie) spontané ou après une stimulation (le test d'hyperglycémie provoquée). Le diabète comme l'obésité (en particulier abdominale) et la sédentarité conduisent à une insulino-résistance (les cellules deviennent moins sensibles à l'insuline, l'hormone qui régule la glycémie) et ce que l'on appelle maintenant un syndrome métabolique. De plus, lorsque l'on vieillit la masse musculaire corporelle fond, nous l'avons vu, mais le tissu grasseux tend lui à augmenter car le métabolisme

corporel et la combustion des graisses diminuent et l'inflammation s'accroît. Au contraire, les centenaires, eux, n'ont pas ou peu d'insulino-résistance, car leur organisme a su, lui, s'adapter progressivement, grâce à une bonne hygiène de vie. Le syndrome métabolique favorise un certain nombre de maladies, en particulier cardio-vasculaires, l'accident vasculaire cérébral (AVC), voire peut-être aussi d'autres maladies graves comme certains cancers ou la maladie d'Alzheimer. Or l'hypertension artérielle et le diabète sont dépistables simplement et il existe des traitements efficaces qui préviennent la survenue de leurs terribles conséquences.

2. Le cerveau, il faut aussi bien le nourrir. Notamment avec le fameux régime méditerranéen ou régime crétois; des chercheurs ont analysé les résultats de dix-huit études scientifiques menées entre 2000 et 2015, autrement dit ils ont réalisé une synthèse (on dit une méta-analyse) de ces travaux sur des sujets de tous âges. Il en ressort que le régime méditerranéen protège notre cœur et réduit le risque de cancer. Il garderait aussi le cerveau en bonne santé selon une étude australienne (relayée par le site grand public health.com). Le déclin cognitif est ralenti (l'attention, le langage, le raisonnement, la vision et la représentation dans l'espace), et le risque de développer une maladie d'Alzheimer serait réduit. Fait intéressant, ces effets positifs ont été observés chez les consommateurs du monde entier. Ainsi, même les non-habitants de la région méditerranéenne bénéficient des bienfaits du régime. Il n'y a donc rien d'un miracle. Une alimentation saine, une bonne hygiène de vie et l'environnement de vie restent des facteurs indispensables pour optimiser sa santé. Les nutritionnistes conseillent d'intégrer les protéines végétales dans notre cuisine quotidienne, de diminuer la consommation de viande rouge et de produits laitiers, de consommer du poisson gras (sardines, maquereaux...), des légumes et des fruits frais, ainsi que de l'huile d'olive et des graines et oléagineux. La diète

méditerranéenne est désormais classée au patrimoine immatériel de l'humanité par l'Unesco depuis 2010!

3. Il faut aussi reposer son cerveau, en d'autres termes bien dormir. Le sommeil est une phase très importante du fonctionnement du cerveau ; il fait l'objet d'intenses recherches et on sait maintenant qu'il joue un rôle essentiel dans le maintien en bonne santé non seulement de l'individu mais plus précisément de son cerveau. Au fur et à mesure de la vie d'une personne, son sommeil évolue. Un cycle du sommeil d'un adulte en bonne santé est composé de deux phases : le sommeil lent, avec un stade de sommeil profond, et le sommeil paradoxal. Au-delà de 65 ans, la qualité et la durée du sommeil profond diminuent peu à peu. La période d'endormissement s'allonge, les réveils sont plus fréquents durant la nuit et fragmentent le sommeil. En effet, le rythme biologique tend à changer au cours de la vie. La production d'hormones (mélatonine, hormone de croissance et autres) diminue, provoquant un déphasage de cycles du sommeil.

Une personne âgée aura généralement plus de mal à se rendormir qu'un jeune adulte et se tourne fréquemment vers le corps médical pour demander de l'aide. La réponse est trop souvent une prescription de somnifères. Près d'un tiers des personnes de 65 ans et plus en consomment de façon chronique, ce qui n'est pas sans risque sur leur santé. Il faut lutter contre cette prescription exagérée, en particulier de benzodiazépines (telles le fameux Stilnox et bien d'autres) qui créent de la dépendance, deviennent inefficaces et même dangereuses jusqu'à augmenter peut-être le risque de démence chez les sujets âgés. Il faut aussi privilégier d'autres techniques (relaxation, luminothérapie, etc.). Des travaux récents ont également montré qu'un sommeil de qualité pourrait jouer un rôle dans l'élimination pendant cette période de la charge en protéine

amyloïde dans le cerveau (une des protéines qui serait en cause dans la maladie d'Alzheimer).

Une nouvelle étude, réalisée en Italie, a mis en exergue les dangers du manque de sommeil sur le cerveau. Une partie des synapses sont littéralement dévorées par les astrocytes à cause du manque de sommeil. Le conseil est simple : le plus souvent une hygiène de vie saine peut suffire à améliorer la qualité du sommeil, comme une activité physique régulière ou une alimentation équilibrée. Il convient aussi de déterminer quelle est la quantité de sommeil optimale pour un individu donné car elle peut varier beaucoup entre les individus.

Enfin, il existe des troubles du sommeil particuliers, les apnées du sommeil où le sujet (souvent un ronfleur) s'arrête de respirer plusieurs secondes ou dizaines de secondes, parfois 15 à 30 fois par heure, ce qui diminue de manière brutale et répétée le taux d'oxygène dans le sang : on parle d'hypoxie intermittente, qui favorise la fatigue et la somnolence le jour d'après, accroît le risque d'accident de voiture, par exemple, et qui à long terme favorise les défaillances cardiaques, les AVC, le déclin cognitif et peut-être la maladie d'Alzheimer. Or, ces apnées sont curables, en particulier à l'aide d'un appareil qui assure une ventilation en pression positive la nuit. Certes, ce n'est pas très agréable mais efficace ! Il est donc essentiel de les dépister au moindre doute par des examens spécialisés puisque l'on peut les traiter.

4. Si l'on veut garder avec le plus de chances possibles un cerveau en bon état tout au long de la vie, il y a d'autres facteurs préventifs qui sont importants et généralement déjà bien connus : les effets de l'activité physique régulière, pas forcément intensive mais adaptée, par exemple de la marche régulière de 30 à 40 minutes plusieurs fois par semaine, combinée à de l'exercice physique parfois plus intensif

(musculature avec des poids ou exercices multiples utilisant le poids du corps qui portent le nom savant de calisthénie, etc.). Ce qui est nouveau, c'est que l'on a compris que l'exercice physique avait un effet favorable sur les vaisseaux et le flux sanguin, mais aussi déclenchait la synthèse de molécules miracles comme les facteurs de croissance, dans les muscles et dans le cerveau; ces molécules aux noms mystérieux (NGF, BDNF, etc.) protègent les neurones en s'opposant à leur mort, à l'atrophie des dendrites et à la perte des synapses. Bref, elles maintiennent le système en bon état. L'exercice physique varié tout au long de la vie est donc indispensable.

5. Bien sûr, il faut aussi garder le plus longtemps possible une activité intellectuelle (ce qui ne signifie pas forcément qu'il faille se laisser prendre par tous les jeux de stimulation cognitive proposés dans les médias); il faut surtout garder l'envie de réaliser des projets quels qu'ils soient et de se faire plaisir en les accomplissant; il faut avoir un tempérament optimiste, bref «aimer la vie avec enthousiasme». L'action bénéfique du lien social et de l'insertion dans des groupes est plus compliquée à déterminer et à contrôler, mais on sait maintenant, par des études sérieuses (on dit «en double aveugle» dans le jargon médical), qu'ils jouent un rôle clé dans le maintien le plus longtemps possible d'un cerveau en bon état.

Fait intéressant, des résultats obtenus par plusieurs laboratoires et en particulier celui d'Elizabeth Blackburn, prix Nobel de médecine et actuelle présidente du *Salk Institute* à San Diego, montrent que beaucoup de mesures préventives que nous avons citées (l'exercice physique, une alimentation équilibrée, la réduction ou le contrôle de certains stress, au besoin même par la méditation) peuvent rallonger les télomères ou au moins diminuer leur raccourcissement: ce serait donc un des mécanismes par lesquels agissent ces différentes

mesures pour ralentir les effets du vieillissement, à condition de les pratiquer sur le long terme*.

Ainsi, il peut paraître relativement aisé de maintenir un cerveau en bonne santé, de le préserver par des méthodes assez simples et issues de la sagesse humaine. Plusieurs d'entre elles ont un effet bénéfique direct sur le cerveau, mais aussi de façon indirecte sur d'autres organes de notre corps humain, dont la dégradation retentirait sur le cerveau car notre corps n'est pas une simple valise d'organes fonctionnant indépendamment, ils sont profondément reliés entre eux.

Néanmoins, deux questions se posent :

– Respecter toutes ces règles hygiéno-diététiques à long terme, n'est-ce pas très difficile? C'est là une des limites. On le voit bien dans le cas des individus qui suivent un régime. Certes, ils perdent du poids mais le reprennent le plus souvent aussi vite faute de pouvoir tenir longtemps leurs bonnes résolutions.

– Ces différentes règles sont sûrement efficaces (au moins pour ralentir le déclin) pour un cerveau qui ne présente pas de lésions neurodégénératives. Mais peut-on aussi rêver d'un cerveau encore plus performant? C'est tout le problème de l'Homme augmenté et nous en avons discuté les limites au chapitre 3. Les mesures que nous avons évoquées ont-elles la même efficacité sur un cerveau malade et peuvent-elles, là encore, freiner la dégradation, voire réparer le cerveau? Ou bien faut-il d'autres techniques et existent-elles, ou existeront-elles et dans un délai raisonnable? C'est tout le problème de l'Homme réparé. Dans tous les cas, un humain ne peut être totalement préservé que si

* Elizabeth Blackburn et Elissa Epel ont présenté ces recherches dans *The Telomere Effect: A Revolutionary Approach to Living Younger, Healthier, Longer*, Orion Spring, 2017.

ÇA VA PAS LA TÊTE!

son cerveau est lui-même préservé: faut-il laisser vivre en réanimation des sujets dont on peut maintenir les fonctions vitales, mais dont le cerveau est irrémédiablement détérioré, tel le général et chef d'État israélien Ariel Sharon qui a été plongé dans le coma pendant huit ans, avant de mourir en 2014?

Finalement, que faut-il retenir?

D'abord, il faut remarquer qu'un homme ou une femme âgé de 60 ans possède maintenant la forme physique et intellectuelle d'un individu de 40 ans au XIX^e siècle. Ce fait est dû sans aucun doute aux progrès de la médecine et à la prévention de tous ordres: informations, vaccinations, dépistage, accès aux soins... Et il n'y a aucune raison pour que cela ne continue pas. Il y a donc un progrès constant de l'espérance de vie. Le tout est de savoir si la courbe est linéaire ou si l'on a atteint ou atteindra un plateau prochainement.

Cet allongement de la vie résulte des avancées indéniables de la médecine, de la recherche en biologie et des biotechnologies. Répartis dans les plus grands laboratoires du monde, de nombreux scientifiques travaillent sur le «vieillissement en santé». On l'a vu, Jeanne Calment, décédée en 1997 à l'âge de 122 ans, demeure la doyenne de l'humanité. Son cas de longévité deviendra-t-il chose commune dans les décennies à venir? Il n'est pas interdit de rêver, c'est même très bon pour le cerveau! Mais est-ce que la petite fille qui vivra 300 ou 1 000 ans est déjà née? Certainement pas. Pour l'instant, et sans doute pour longtemps encore, voire toujours, le vieillissement, même en santé, est inéluctable. La fontaine de Jouvence des transhumanistes n'est qu'un fantasme bien loin de la réalité biologique et médicale. Sans compter que le cerveau peut lui aussi tomber malade!

CHAPITRE 5

Pour l'instant, on soigne mais on ne guérit pas

Il y a 50 ans, on disait « *Oncle Albert perd la tête docteur* » ou « *il devient gâteux* » ! C'est l'âge, répondait-on. Dans 50 ans, lorsque Louis parlera de ses petits maux à Léon, ce ne sera plus de son arthrose ou de ses insomnies... Et il ne sera plus obligé de parler fort pour que celui-ci l'entende. Non, il lui dira que le docteur a remplacé son implant sous la peau pour éviter de développer la maladie d'Alzheimer. Ce petit bout de plastique va libérer de nouveaux anticorps qui empêcheront ces fameuses protéines (bêta-amyloïdes, tau...) à l'origine des plaques toxiques de s'accumuler. Une sorte de vaccination. Léon lui, beaucoup plus anxieux, se sera fait implanter une puce dans le cortex pour éviter les crises d'angoisses. Il en dira le plus grand bien à Louis. Ils discuteront des premiers implants Alzheimer ou Parkinson qui donnent des résultats prometteurs. Etc. C'est ce que nous prédisent les transhumanistes. En effet, dans un

demi-siècle, on connaîtra sans problème les causes de toutes les maladies du cerveau et on saura toutes les soigner! On pourra même ressusciter les morts! La réalité est tout autre, à la fois triste et terrifiante: les progrès dans la connaissance du cerveau depuis 80 ans n'ont conduit qu'à très peu de retombées pour les traitements des maladies du cerveau, à l'exception de quelques rares succès récents.

*Des maladies du cerveau excessivement variées
et complexes*

Aujourd'hui, le cerveau, ce petit bijou, peut encore tomber malade ou subir un traumatisme. Les maladies ou accidents qui le frappent sont à l'origine de handicaps moteurs ou/et cognitifs dont les conséquences personnelles mais aussi familiales et sociétales peuvent être dramatiques. Alzheimer, épilepsie, Parkinson, sclérose en plaques, sclérose latérale amyotrophique (SLA ou maladie de Charcot), chorée de Huntington, dépression... forment un ensemble de maladies très hétérogène. Au niveau mondial, les chiffres donnent le vertige. En 2016, un rapport de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) affirme que près d'un milliard de personnes dans le monde sont affectées par une maladie du cerveau. En France, on estime qu'une personne sur deux est touchée directement ou indirectement. La maladie d'Alzheimer est la plus fréquente, avec plus de 850 000 personnes concernées. L'épilepsie est la deuxième pathologie neurologique, avec près de 600 000 patients, dont 100 000 enfants. Plus de 150 000 personnes ont développé une maladie de Parkinson et plus de 100 000 personnes sont affectées par la sclérose en plaques. Les accidents vasculaires cérébraux (AVC) représentent la première cause de handicap

moteur et cognitif chez l'adulte. On compte environ 130 000 cas nouveaux par an en France et, dans plus de la moitié des cas, les patients ne peuvent reprendre leur activité professionnelle. Certaines de ces maladies, mais pas toutes, sont associées au vieillissement. Du fait de l'allongement de l'espérance de vie, elles deviendront bientôt une des premières causes de mortalité dans l'Hexagone et dans le monde.

Les maladies qui touchent le cerveau, et donc les neurones et les cellules gliales, sont très variées dans leur mode d'expression. Longtemps réputées incurables, elles bénéficient depuis une dizaine d'années d'une gamme de nouveaux traitements qui contribuent à améliorer la qualité de vie et de survie des malades, sans toutefois les guérir vraiment ou de façon exceptionnelle. Il ne s'agit pas de faire ici un catalogue de toutes les pathologies affectant le cerveau, ce serait trop déprimant !

Même si cette classification est controversée, deux grandes catégories de pathologies peuvent être distinguées :

- Les maladies neurologiques sont des maladies qui touchent aussi bien le système nerveux central que périphérique : accidents vasculaires cérébraux (ou AVC), épilepsies, scléroses en plaques... Les maladies neurodégénératives (maladie d'Alzheimer, Parkinson, maladie de Charcot, chorée de Huntington...) sont des maladies neurologiques qui entraînent la dégénérescence puis la mort des neurones du cerveau.

- Les maladies psychiatriques, qui vont de la simple crise d'angoisse à la dépression, jusqu'aux psychoses plus graves telles l'autisme, la schizophrénie, les troubles bipolaires...

Dans la plupart des cas, les origines sont multifactorielles. C'est une des raisons pour lesquelles les prédictions des transhumanistes sont terriblement simplistes. Des facteurs génétiques se conjuguent avec des facteurs environnementaux

ÇA VA PAS LA TÊTE!

et/ou liés à l'histoire de vie du patient pour entraîner une maladie neurologique ou psychiatrique. Nous avons vu dans le chapitre précédent que lorsqu'un organe va mal (par exemple le rein ou le foie), le cerveau va mal. En outre, il y a des causes de maladies neurologiques qui sont liées à une atteinte directe de la boîte crânienne ou des artères qui nourrissent le cerveau.

Certaines pathologies neurologiques résultent d'un accident

Il faut d'abord distinguer les pathologies du cerveau qui résultent d'un accident. De nos jours, la probabilité pour qu'une barre de fer pénètre dans le cerveau est faible (souvenez-vous de Phineas Gage que nous avons rencontré dans le chapitre 3). En revanche, chaque année dans le monde, cinquante millions d'individus sont blessés, ou deviennent invalides à la suite de traumatismes causés par des accidents de la circulation, avec une grande fréquence de traumatismes crâniens et de la moelle épinière. Pour les transhumanistes, il n'y aura plus d'accident de voitures car celles-ci seront toutes autonomes avec une sécurité de conduite quasi-absolue, ce qui reste à démontrer. Mais on pourra toujours tomber d'une échelle ou glisser dans l'escalier!

La seconde grande catégorie d'accidents cérébraux est l'accident vasculaire cérébral souvent dénommé AVC. Appelé autrefois apoplexie, l'AVC est lié à un dysfonctionnement de l'irrigation sanguine cérébrale. Dans 80 % des cas, l'AVC résulte de l'obstruction (accident vasculaire ischémique) d'une artère cérébrale par un caillot sanguin qui s'est formé dans le cerveau (c'est la thrombose) ou qui vient d'ailleurs et a été transporté par le réseau sanguin (on parle

alors d'embolie). Dans 20 % des cas, il s'agit d'une rupture d'un vaisseau sanguin dans le cerveau, là où se situe éventuellement un anévrisme (dilatation anormale d'une artère entraînant la formation d'une poche), provoquant une hémorragie: c'est l'accident vasculaire hémorragique. Dans les deux cas, il en résulte un appauvrissement, voire une privation d'oxygène et de glucose, ce qui provoque à très court terme (quelques minutes) la détérioration puis, plus tard, la mort des cellules nerveuses dans la zone concernée.

Certaines structures du cerveau sont plus vulnérables que d'autres à la privation d'oxygène: l'hippocampe, le cortex (toutes deux, nous l'avons vu, jouent un rôle essentiel dans la mémoire) et le striatum (impliqué dans l'activité motrice) sont les structures les plus sensibles. Selon l'importance et l'endroit où a lieu l'AVC, les symptômes peuvent être différents: ce peut être des vomissements, des maux de tête, des troubles du langage, ou aphasie, une paralysie d'un membre, voire de toute une moitié du corps (la tristement célèbre hémiplegie, soit à droite avec aphasie, qui correspond à une atteinte de l'hémisphère cérébral gauche, soit à gauche avec atteinte de l'hémisphère droit mais sans aphasie).

Les séquelles sont plus ou moins importantes. La récupération dépend beaucoup de la rapidité de la prise en charge et l'évolution des déficits est individuelle. Avec une même lésion touchant la zone du langage, l'aphasie ne sera pas la même selon que l'on est droitier, gaucher ou ambidextre. Le cerveau, grâce à sa plasticité, va essayer de faire la même chose qu'avant l'accident, avec les neurones survivants, en réorganisant le réseau neuronal. On peut donc observer une certaine récupération mais, bien sûr, tout dépend de l'importance de la lésion. Compte tenu de son origine, les causes d'un AVC ne sont donc pas dues à une

maladie proprement dite du cerveau, mais à des problèmes d'hypertension, d'athérosclérose, de malformation vasculaire (angiome, anévrisme, etc.).

Pour d'autres pathologies, l'origine est génétique

La maladie la mieux connue pour son origine génétique est la chorée de Huntington. La prévalence de cette maladie est de l'ordre de 5 à 7 cas sur 100 000 personnes. C'est un médecin de famille américain, George Huntington, qui en 1872 a décrit pour la première fois la maladie qui portera son nom. Les patients atteints de cette maladie ont des mouvements complètement désordonnés, qui partent dans tous les sens, exécutant ce que l'on appelait parfois la danse de Saint-Guy. On les a longtemps crus fous ou possédés par le démon. Il s'agit en fait d'une maladie génétique. Nous savons tous que l'ADN est formé de gènes, et que chaque gène code pour une protéine spécifique. Dans le cas de cette maladie, le gène qui sert à fabriquer la protéine appelée « huntingtine » comporte une erreur. On dit qu'il est muté. Cette protéine joue un rôle dans le développement cérébral et affecte la morphologie neuronale à l'âge adulte. L'anomalie génétique conduit à la production d'une protéine plus grande que la normale. Mais c'est suffisant pour entraîner une atrophie cérébrale au niveau du striatum, structure du cerveau qui s'occupe des fonctions motrices, et plus tard du cortex cérébral. Il en résulte des difficultés motrices (les mouvements anormaux, mais aussi des troubles de l'équilibre, de la déglutition, des difficultés pour articuler...), des troubles cognitifs (perte d'initiative, désintérêt, troubles du comportement...) et parfois des troubles psychiatriques (dépression, irritabilité, anxiété...).

Après plusieurs années, ces symptômes s'aggravent, conduisant à la perte d'autonomie du patient et au décès. Il n'existe à l'heure actuelle aucun traitement pour guérir cette maladie qui est héréditaire. Le diagnostic génétique est possible dans les familles de patients, y compris chez des porteurs sains qui développeront plus tard cliniquement la maladie (c'est le diagnostic pré-symptomatique), ce qui pose des problèmes multiples, psychologiques, éthiques, etc., en l'absence de traitement, parce que l'annonce implique toute la famille à partir d'un cas et qu'elle peut aussi retentir sur le désir d'enfant.

Une autre maladie héréditaire qui touche le cerveau est la maladie de Friedreich. Elle est due à une anomalie d'un autre gène, celui de la frataxine, qui induit une altération du métabolisme énergétique de la cellule nerveuse. C'est une maladie rare (1 cas pour 50 000 individus) qui débute habituellement dès l'enfance ou l'adolescence. Elle se manifeste principalement par des troubles de l'équilibre (ou ataxie) et de la coordination des mouvements, une maladie cardiaque et parfois un diabète. Certaines formes de la maladie de Charcot-Marie-Tooth (à ne pas confondre avec la SLA, sclérose latérale amyotrophique ou maladie de Charcot, qui s'attaque aux neurones moteurs du cerveau et de la moelle épinière), qui touche les nerfs périphériques entraînant des troubles de la marche, sont également héréditaires et sont transmises par le chromosome X. Il ne s'agit là que d'un exemple d'un groupe de maladies, les ataxies héréditaires dites spino-cérébelleuses ayant de multiples origines génétiques.

*Lorsque l'activité électrique du cerveau se dérègle,
c'est la crise!*

Nous avons vu dans le chapitre 2 toute l'importance du signal électrique – le potentiel d'action ou influx nerveux – dans le cerveau, que cette activité soit spontanée ou provoquée par un stimulus. Le potentiel d'action est d'intensité et d'organisation très variable selon les individus. Lors d'une tâche donnée, de nombreux neurones sont sollicités et émettent des potentiels d'action en même temps: il y a synchronisation. Cette activité est précisément contrôlée et adaptée chez les sujets «normaux». Chez les personnes atteintes d'épilepsie, les crises résultent d'une décharge électrique anormale et simultanée de milliers de neurones. Ceux-ci émettent des potentiels d'action trop facilement et synchronisent anormalement leur activité, ce qui provoque une décharge électrique excessive dans les réseaux neuronaux connectés. C'est l'orage sous le crâne! Cette hyperactivité se propage dans le cerveau et produit des symptômes caractéristiques et variables selon l'origine cérébrale.

La diversité des aires cérébrales concernées explique la grande variété des symptômes: troubles du langage, troubles moteurs, sensoriels ou sensitifs, troubles de la mémoire... Il y a autant de symptômes que de points de départ potentiels dans le cerveau. Les crises peuvent prendre la forme de simples absences jusqu'à la classique crise convulsive généralisée avec émission d'urine... s'accompagnant ou non d'une altération de la conscience. L'épilepsie est une maladie complexe et multifactorielle: elle associe des terrains génétiques et des facteurs environnementaux. Mais les raisons exactes qui conduisent à ces dysfonctionnements sont encore mal connues.

Les transhumanistes pensent que les progrès dus à l'intelligence artificielle permettront à l'être humain d'utiliser plus de neurones et donc de devenir plus intelligent, au risque, non évalué, de déclencher des crises épileptiques. Mais ce n'est pas tant le nombre de neurones utilisés qui rend un individu plus intelligent que la qualité des connexions établies dans et entre différents réseaux de neurones. D'ailleurs, on peut remarquer que tous les humains ont peu ou prou à peu près le même nombre de neurones. Le premier abruti venu a autant de neurones que la personne supposée la plus intelligente (le cerveau d'Einstein pesait 1,230 kg contre 1,4-1,5 kg en moyenne). Pourtant, certains individus sont plus intelligents, d'autres le sont moins, mais développent des qualités humaines que peu possèdent.

Quand l'inflammation s'en mêle, tout va mal

L'inflammation est provoquée par un ensemble de réactions dues au système immunitaire de l'organisme en réponse à une agression subie, soit externe (infections par des bactéries ou des virus, tels que rougeole, oreillons, grippe, etc., trauma, brûlure, allergie, etc.) ou interne (cellules cancéreuses par exemple). C'est un processus universel, qui touche l'ensemble des tissus de notre corps y compris le système nerveux.

L'inflammation chronique est désormais reconnue comme une réponse à de nombreuses transformations de l'environnement. Elle est favorisée par la sédentarité, la malbouffe, la pollution, les altérations du microbiote intestinal et plus généralement notre mode de vie. Elle peut entraîner ou participer à la genèse du syndrome métabolique évoqué plus haut, avec résistance à l'insuline à l'origine d'un diabète, provoquer

surpoids ou obésité, maladies cardiovasculaires et faire le lit de pathologies ostéo-articulaires, maladies immunitaires et même troubles de l'humeur et du comportement.

Les maladies démyélinisantes, comme la sclérose en plaques, sont souvent le résultat d'une inflammation survenant à l'intérieur du cerveau. Nous l'avons vu, la démyélinisation est la destruction de la myéline, la gaine qui protège les axones des neurones. Cette destruction entraîne un ralentissement, voire un blocage de l'influx nerveux qui atteint moins vite ou même, selon l'évolution de la maladie, plus du tout, les terminaisons nerveuses. La transmission synaptique est alors totalement perturbée. L'inflammation provoque par la suite une dégénérescence des neurones (c'est pourquoi la sclérose en plaques est parfois classée dans les maladies neurodégénératives). Les symptômes de la maladie comportent des troubles moteurs, des troubles sensitifs, des troubles de l'équilibre, des troubles visuels... Tout dépend de la localisation des axones qui sont touchés. La maladie débute, le plus souvent, chez des adultes jeunes (entre 20 et 40 ans). Elle évolue par poussées plus ou moins invalidantes et plus ou moins espacées. En France, on estime à 80 000 le nombre de personnes atteintes de sclérose en plaques. Il s'agit de la deuxième cause de handicap chez les adultes jeunes, après les accidents de la route. On en ignore toujours les causes. Plusieurs hypothèses sont évoquées. À commencer par une cause auto-immune : notre système immunitaire, et en particulier les lymphocytes, reconnaîtrait les gaines de myéline comme des corps étrangers. D'accord, mais pourquoi cette erreur des lymphocytes ? Ils pourraient faire attention !

L'inflammation intracérébrale (de nos jours, on parle souvent de neuro-inflammation) peut aussi se développer parce que certaines maladies neurologiques font souffrir et

puis mourir des neurones. Cette mort des neurones excite les cellules gliales voisines et déclenche une inflammation, avec production de molécules inflammatoires comme les cytokines ou autres qui, à leur tour, vont aggraver la mort neuronale : c'est un véritable cercle vicieux !

*Quand le cerveau vieillit,
apparaissent les maladies neurodégénératives*

Les maladies neurodégénératives liées à l'âge ont toujours existé. Aujourd'hui, lorsque les premiers symptômes de perte de mémoire apparaissent, on pense tout de suite à la maladie d'Alzheimer ; et si vous avez des tremblements, à la maladie de Parkinson. Une maladie neurodégénérative est une maladie qui affecte le système nerveux central de façon de plus en plus importante au fil du temps. Il s'agit toujours de maladies chroniques, dont l'évolution s'effectue à bas bruit, c'est-à-dire lentement et silencieusement. Le plus souvent, lorsque le diagnostic est établi, la maladie est déjà en place depuis cinq à dix ans. L'âge moyen de la découverte de la maladie de Parkinson est de 50-70 ans, 10 % des cas survenant avant 40 ans. Dans notre pays, 15 % des sujets de 85 ans environ sont concernés par la maladie d'Alzheimer, et 110 000 nouveaux cas apparaissent chaque année. Le nombre de décès provoqués par la maladie d'Alzheimer a augmenté de 55 % entre 1999 et 2014 aux États-Unis. Cette augmentation est largement liée à l'accroissement de la durée de vie, la maladie pouvant apparaître tardivement y compris chez des nonagénaires !

Les causes des maladies neurodégénératives sont largement inconnues. Dans moins de 5 % des cas, elles sont d'origine génétique. En revanche, les mécanismes en jeu dans la

dégénérescence des neurones ont été largement étudiés aussi bien chez l'humain que dans des modèles animaux de ces pathologies. Les recherches ont mis en évidence des mécanismes communs : dans quasiment toutes les maladies neuro-dégénératives, on retrouve une agrégation toxique de certaines protéines. Dans l'espèce humaine, les gènes codent pour 25 à 30 000 protéines, dont chacune a un rôle bien spécifique. Une protéine, c'est un ensemble d'acides aminés qui s'ordonnent selon une séquence bien précise, mais aussi qui se replient sur eux-mêmes pour prendre une forme déterminée dans l'espace. Évidemment, c'est une complexité supplémentaire et il arrive que les repliements se fassent mal. Normalement, ces protéines déformées sont le plus souvent dégradées et éliminées par le protéasome, gigantesque assemblage de protéines. Le vieillissement, des mutations génétiques, des changements de l'environnement à l'intérieur de la cellule, le stress oxydatif, les métaux lourds... peuvent conduire à l'augmentation de la quantité de protéines mal repliées. Celles-ci vont alors s'agréger entre elles pour finir par constituer, en plusieurs étapes, des agrégats entre et à l'intérieur des cellules nerveuses, que l'on appelle plaques séniles, en tout cas pour celles de la maladie d'Alzheimer. Il s'agit de dépôts de protéines bêta-amyloïdes et tau dans la maladie d'Alzheimer, d'une agrégation de protéines prion dans des encéphalopathies spongiformes comme la maladie de Creutzfeld-Jakob, de corps de Lewy constitués par l'accumulation de la protéine alpha-synucléine dans certaines formes de la maladie de Parkinson, etc.

Si un lien a été établi entre la présence d'agrégats de protéines mal repliées et la progression de ces maladies, on ne sait pas encore si et pourquoi ces agrégats sont toxiques pour les neurones et entraînent leur mort. Et il se pourrait que ces agrégats soient la conséquence de ces pathologies et non la

cause. Ils s'accumulent aussi bien dans le milieu extracellulaire qu'à l'intérieur de la cellule (dans le cytoplasme et le noyau). Et ils existent dans quasiment toutes les maladies neurodégénératives, mais à des endroits variables du cerveau selon la pathologie. Certains chercheurs pensent que ces agrégats sont toxiques pour la cellule, d'autres au contraire estiment qu'ils seraient un « piège » chargé de protéger les cellules de la toxicité des protéines, les formes véritablement toxiques de ces agrégats correspondant alors à un état particulier (encore soluble). Tout cela pour dire que c'est compliqué, on connaît certains éléments, mais pas comment et à quel niveau ils interviennent dans les maladies neurodégénératives. De plus, les agrégats de protéines peuvent « voyager » et affecter ainsi tous les circuits neuronaux. Or, malgré tout ce que peuvent raconter les transhumanistes, on ne sait pas, et pour longtemps encore, recréer des réseaux neuronaux précis et fonctionnels qui viendraient, dans le cas présent, remplacer les circuits défectueux.

Par ailleurs, les lésions des neurones, leur souffrance entraînent de profondes modifications des cellules gliales, en particulier des astrocytes et de la microglie, qui se mettent alors à libérer en quantité anormalement élevée des molécules de l'inflammation déjà évoquées ; ces molécules « abîment » les neurones voisins qui, à leur tour, entretiennent la neuro-inflammation en un véritable cercle vicieux qui aggrave les maladies neurodégénératives.

Dans le cas de la maladie de Parkinson, les neurones touchés sont ceux qui libèrent de la dopamine. La dégénérescence de seulement quelque 200 000 à 300 000 neurones (sur la centaine de milliards qui peuplent le cerveau humain), situés dans un tout petit noyau à la base du cerveau (la substance noire compacte) est responsable des symptômes :

tremblement des extrémités au repos, lenteur des mouvements (akinésie), augmentation anormale du tonus musculaire, rigidité des membres, troubles de la marche et risque de chutes... Lorsque la maladie est diagnostiquée, près de 80 % des neurones touchés, dits dopaminergiques, sont déjà morts! Avec l'évolution de la maladie, des troubles cognitifs apparaissent.

Dans la maladie d'Alzheimer, l'atrophie neuronale touche des structures plus variées et larges : dans un premier temps, le lobe temporal interne (et notamment l'hippocampe), puis à un stade plus avancé les cortex frontaux et temporo-pariétaux. C'est pourquoi la maladie se manifeste au début par des troubles de mémoire portant essentiellement sur les faits récents, mais avec le temps, peu à peu, en fonction des régions du système nerveux atteintes par la maladie, les troubles pourront affecter la motricité, le langage, la perception, la cognition, la conscience de soi...

*Maladies psychiatriques et troubles du comportement,
la liste est longue!*

Schématiquement, alors que la neurologie traite des maladies du cerveau, celles que nous venons d'évoquer, la psychiatrie traite des maladies de la pensée. Mais la pensée résulte du fonctionnement du cerveau. Évidemment, vous aurez compris que cette distinction ne fait pas l'unanimité : nombre de maladies neurologiques débouchent sur des problèmes psychiatriques et ces troubles peuvent certainement s'expliquer par des dysfonctionnements des réseaux neuronaux. Les affections de la pensée vont de la simple anxiété à la dépression réactionnelle, qui arrive à la suite d'un traumatisme comme

un deuil, jusqu'aux psychoses les plus graves telles que les schizophrénies, l'autisme, la dépression bipolaire, les troubles alimentaires, les phobies, les troubles obsessionnels compulsifs (TOC)...

Les troubles psychiatriques affecteront une personne sur quatre dans le monde à un moment donné de leur vie. Environ 450 millions en souffrent actuellement. Ils sont responsables d'une forte mortalité par suicide, et d'une importante morbidité : baisse de productivité, mauvaise qualité de vie et handicap. La dépression représente la maladie mentale la plus fréquente puisque l'on estime que 5 à 15 % de la population française risque de faire un épisode dépressif au cours de sa vie. Elle est présente à tous les âges de la vie. Notons au passage que la France est la championne mondiale de la consommation d'antidépresseurs et de psychotropes en général, avec des risques de surdosage, d'hallucinations, de chutes, etc. ! Les schizophrénies touchent, quant à elles, 21 millions d'individus dans le monde, soit environ 7 personnes sur 1 000. On dénombre 600 000 cas en France. Enfin, l'autisme touche 1 personne sur 150 dans le monde, en France 430 000 personnes sont diagnostiquées dont 25 % d'enfants.

Les troubles liés aux maladies psychiatriques se manifestent de très nombreuses façons et à des âges différents. Dans la majorité des cas de schizophrénie, les premiers symptômes apparaissent dès l'âge de 15-20 ans et se développent de manière progressive. Il arrive aussi que le début des troubles soit brutal, avec des bouffées délirantes qu'il est parfois bien difficile de contrôler par les neuroleptiques. Cette maladie est considérée comme étant parmi les plus sévères des maladies psychiatriques. Elle est caractérisée par des épisodes hallucinatoires, des délires et troubles de la pensée. Certaines maladies psychiatriques se mettent en place plus précocement, lors du

ÇA VA PAS LA TÊTE!

développement du cerveau. L'autisme en est un exemple. La maladie apparaît au cours de l'enfance et persiste à l'âge adulte. Elle peut prendre des formes diverses. Les troubles du spectre des syndromes autistiques, comme on dit maintenant, se manifestent par des altérations dans la capacité à établir des interactions sociales et à communiquer, ainsi que par des troubles du comportement.

On ne connaît pas les causes de chacune de ces maladies mentales. Il est désormais bien établi qu'elles ont une origine multifactorielle, avec une forte implication de facteurs génétiques et des influences environnementales très diverses qui sont encore mal comprises. On évoque aussi bien des causes biologiques, psychologiques, environnementales ou sociales.

La chirurgie reste exceptionnelle

Aujourd'hui on soigne et on accompagne, mais on ne guérit ni répare un cerveau malade ou que très rarement. Parmi les outils actuellement utilisés pour soigner le cerveau malade, il y a la chirurgie.

On est loin du temps où on pratiquait la lobotomie! Cette technique a en effet connu un immense succès dans les années 1950, en particulier aux États Unis, et ceci en grande partie pour des problèmes de coût. La technique consistait à enfoncer une fine spatule tranchante de chaque côté de la partie antérieure du crâne, en général par les orbites, et d'imprimer à cette spatule un mouvement de va-et-vient qui permettait de déconnecter les lobes frontaux du reste du cerveau. Certes, c'était assez efficace pour certains patients particulièrement agités et/ou agressifs qui devenaient ensuite doux comme des agneaux. Le neuropsychiatre américain Walter

Freeman, à la demande d'asiles d'aliénés et autres institutions, pratiquait la lobotomie «à la chaîne», sous une anesthésie qui résultait parfois seulement d'un électrochoc fait au préalable. Les séquelles étaient souvent irréversibles, et altéraient pour le moins la personnalité du patient... À partir de la fin des années 1960-1970 – marquées notamment par le film *Vol au-dessus d'un nid de coucou* (1975), dans lequel le réalisateur Milos Forman met en scène une rébellion dans un hôpital psychiatrique – cette pratique a été progressivement abandonnée.

Aujourd'hui, les seules excisions qui sont pratiquées se font dans le cas des épilepsies résistantes aux médicaments, afin d'enlever les «foyers» épileptiques. Grâce aux techniques d'imagerie et d'enregistrement de l'activité électrique du cerveau, on peut déterminer avec précision où se trouvent ces foyers et les opérations se font dans des conditions de contrôle très rigoureuses. Une autre méthode chirurgicale, la stimulation cérébrale profonde a été mise au point, par exemple, dans des indications spécifiques de la maladie de Parkinson et récemment étendue à des troubles psychiatriques particuliers comme les troubles obsessionnels compulsifs (TOC) graves et résistants aux médicaments. L'opération consiste à implanter symétriquement deux petites électrodes dans une structure cérébrale très précise (le noyau subthalamique) de chaque côté du cerveau. Les électrodes sont ensuite reliées à une pile placée sous la peau du patient qui peut régler lui-même l'intensité de la stimulation et même l'arrêter si nécessaire. Les effets de cette méthode sont spectaculaires. Il s'agit cependant d'une opération délicate et pour laquelle seulement 10 à 15 % des patients parkinsoniens sont éligibles ; actuellement on implante en France à peu près mille patients par an, sur environ 150 000 malades.

*Les « outils » les plus communément utilisés
sont les médicaments*

Les outils pharmacologiques ont permis des avancées majeures dans la compréhension du fonctionnement du système nerveux ces trente dernières années. L'une des plus grandes découvertes dans l'étude du fonctionnement du système nerveux est celle d'une toxine appelée la tétrodoxine. On connaît cette toxine depuis le début du xx^e siècle. On la trouve dans les viscères du fugu, un poisson très prisé au Japon, mais pas à déguster dans n'importe quel restaurant! Il faut en effet savoir le préparer car la moindre trace de toxine peut être fatale. C'est en 1964 que Toshio Narahashi montra que cette toxine bloque, à de très faibles doses, l'émission du potentiel d'action *via* des protéines qui laissent passer les ions sodium, stoppant ainsi l'influx nerveux. Du fait de leur rôle essentiel dans l'excitabilité du réseau neuronal, les protéines par lesquelles passent ces ions sont devenues la cible de nombreux médicaments: antiépileptiques, analgésiques, anesthésiques, ou encore plusieurs médicaments utilisés dans les maladies psychiatriques, appelés psychotropes.

En 1950 est arrivé le premier neuroleptique, la chlorpromazine (un bloquant d'une classe des récepteurs à la dopamine), synthétisé par Rhône-Poulenc qui, en 1951, fut d'abord utilisé, avec un mélange d'anesthésiques, à des fins chirurgicales par le médecin militaire et neurobiologiste Henri Laborit. Un an plus tard, Jean Delay et Pierre Deniker, à l'hôpital Sainte-Anne de Paris, commencèrent à employer la chlorpromazine chez des patients psychotiques qui présentaient des hallucinations, des délires et des psychoses. Ce fut le début de la psychopharmacologie. Tous les médicaments psychotropes, et ils sont très nombreux, agissent sur des protéines situées

au niveau des synapses. Les benzodiazépines et les somnifères interviennent sur un récepteur particulier (γ -amino-butyrique). Son activation par le GABA, un neurotransmetteur libéré au niveau de la synapse, entraîne normalement une diminution, voire un arrêt de l'émission des potentiels d'action : c'est le récepteur principal de l'inhibition dans le cerveau, processus dont nous avons parlé dans le chapitre 2. Les neuroleptiques, utilisés dans le traitement des psychoses, agissent essentiellement sur les récepteurs à la dopamine. En effet, la dopamine intervient à la fois au niveau de structures impliquées dans le système de récompense (*cf.* chapitre 2), mais aussi dans des fonctions motrices.

Les antidépresseurs, prescrits dans le traitement de la dépression bien sûr, mais aussi dans les troubles dus à l'anxiété et les TOC, opèrent sur ce que l'on appelle les « transporteurs ». Lorsqu'il est libéré dans l'espace synaptique, entre deux neurones, un neuromédiateur se lie, on l'a vu, sur ses récepteurs à la surface du neurone postsynaptique. Mais il faut que son action ait une durée limitée. Il va donc être ou dégradé ou, et c'est le plus souvent le cas dans le cerveau, capturé à nouveau par les terminaisons présynaptiques pour être réutilisé. Les protéines qui assurent ce travail s'appellent des transporteurs. Si on les bloque avec une substance quelconque, le neuromédiateur va rester plus longtemps dans l'espace synaptique et donc avoir une durée d'action plus longue. Les antidépresseurs sont pour la plupart des inhibiteurs des transporteurs à la dopamine ou à la sérotonine. C'est aussi le cas de certaines drogues addictives comme la cocaïne. Dans le cas de la maladie de Parkinson par exemple qui, rappelons-le, est due à la mort des neurones qui synthétisent et libèrent de la dopamine, on préfère utiliser de la L-DOPA, un précurseur de la synthèse de la dopamine. Mais il s'agit

finallement d'une simple supplémentation d'une substance manquante et non d'un traitement de la cause elle-même de la maladie (ou traitement dit étiologique).

L'ennui est que ces médicaments induisent beaucoup d'effets secondaires. C'est le problème majeur de la pharmacologie. Il est dû au fait que, même lorsque l'on dispose d'un médicament très spécifique d'une protéine donnée, celle-ci est largement distribuée dans le cerveau et même dans tout l'organisme. Dans les épilepsies, par exemple, il suffirait que l'on bloque les potentiels d'action de la région malade par de la tétrodontoxine pour qu'il n'y ait pas de crises. Malheureusement, cela entraînerait la mort du patient par arrêt respiratoire ou cardiaque avant ! Car les protéines cibles de la tétrodontoxine ne se trouvent pas uniquement dans la région malade. Les neuroleptiques, et toutes les drogues psychotropes d'une manière générale, sont peu spécifiques d'une pathologie donnée. Par exemple, la L-Dopa administrée pendant des années entraîne chez un nombre significatif de patients des mouvements anormaux, ou dyskinésies, qui sont extrêmement gênants.

Depuis une vingtaine d'années, les laboratoires pharmaceutiques ont malheureusement peu à peu désinvesti le développement de médicaments destinés à traiter les maladies du cerveau. Il faut dire que la procédure de validation d'un médicament est très lourde. Dans la phase préclinique, il faut choisir à la fois la cible et la molécule à envoyer sur la cible, et évidemment mesurer et maîtriser ensuite la toxicité potentielle de ladite molécule sur un certain nombre de cellules (à l'aide de cultures de cellules par exemple) et de modèles animaux. C'est de la recherche « presque » fondamentale. Si tout semble positif, les essais cliniques, qui comportent trois à quatre phases, sont lancés.

– La phase I est une phase très critique. La molécule en lice est testée sur des volontaires sains de manière à s'assurer de son absence de toxicité. Un des problèmes est que dans cette phase, on fait appel à des sujets jeunes. Or les paramètres physiologiques entre un sujet jeune et un sujet âgé ne sont pas les mêmes. Et hélas!, des accidents peuvent arriver. En janvier 2015, un essai clinique mené à Rennes par le centre de recherche Biotrial pour le compte du laboratoire Bial a ainsi été interrompu à la suite du décès d'un participant volontaire. Évidemment, ce type d'accident n'incite guère les laboratoires pharmaceutiques à développer de nouveaux médicaments. En outre, les règles sont de plus en plus rigoureuses. L'aspirine, par exemple, est un médicament qui a été découvert il y a près de deux millénaires à partir de l'écorce de saule et qui était déjà utilisé par les Égyptiens et les Sumériens. Mais si aujourd'hui on développait l'aspirine comme médicament antidouleur, on s'apercevrait qu'elle peut provoquer des hémorragies... Pas sûr que l'aspirine passerait la phase I aujourd'hui!

– La phase II est celle où l'on détermine la posologie optimale sur une population limitée de patients.

– La phase III est celle du test à grande échelle. La molécule est testée sur des milliers de personnes représentatifs de la population de malades auxquels ce médicament est destiné. Des essais comparatifs sont réalisés: le médicament en développement est comparé à un traitement efficace déjà commercialisé ou, dans certains cas, à un placebo, c'est-à-dire un traitement sans activité pharmacologique. C'est à l'issue de cette phase que les résultats sont soumis aux autorités réglementaires de santé pour l'obtention de commercialisation en Europe, aux États-Unis et dans le monde entier.

– Enfin, la phase IV, réalisée elle aussi sur des milliers de personnes, permet d'évaluer dans des conditions réelles

l'efficacité du médicament, tout au long de sa commercialisation et détecter des effets secondaires rares.

Tout ce processus prend beaucoup de temps (en moyenne 8 à 10 ans) et demande beaucoup d'argent (en moyenne un milliard d'euros pour un médicament) alors que la réussite n'est pas assurée.

Une raison supplémentaire du désintérêt relatif des grandes entreprises de l'industrie pharmaceutique pour les médicaments candidats dans les maladies neurodégénératives est en effet lié aux échecs cinglants et aux déconvenues (très coûteuses, des centaines de millions d'euros) auxquels ont abouti leurs tentatives. Par exemple, pour protéger les neurones survivants lors d'un AVC, des centaines de molécules ont montré une efficacité réelle sur des modèles animaux, mais, à notre connaissance, aucune n'a pu passer en clinique. Seules solutions envisageables, la destruction du caillot sanguin, ou thrombus (on parle de médicaments anti-thrombolytiques, comme l'activateur tissulaire du plasminogène), par la voie intra-veineuse ou, plus difficile, intra-artérielle, ou encore la thromboendarterectomie (qui consiste à enlever une plaque d'athérome ou un caillot dans la carotide) dans des cas favorables pris au tout début. Quand il est trop tard pour de tels traitements, il ne reste que l'admission en unités de soins intensifs, suivie, en fonction des séquelles, de la meilleure rééducation neurologique possible.

Quant à la maladie de Parkinson, il n'existe actuellement aucun traitement des causes malgré des études intensives sur celles-ci. C'est aussi le cas pour la sclérose latérale amyotrophique (l'espérance de vie des patients reste limitée à 3 à 5 ans).

Enfin, l'ensemble des essais thérapeutiques dans la maladie d'Alzheimer a abouti à des échecs cuisants: médicaments

anti-inflammatoires au long cours, ou médicaments luttant contre l'accumulation des protéines toxiques (la « vaccination » visant à éliminer les dépôts de protéine bêta-amyloïde dans le cerveau avait pourtant suscité de très grands espoirs, mais elle a été momentanément arrêtée en raison de la survenue imprévue d'encéphalites chez certains patients traités). Le sentiment d'échec est tel qu'il a conduit en partie à une remise en cause des hypothèses sur les mécanismes de la maladie : est-ce vraiment la protéine bêta-amyloïde qui joue un rôle clef dans le développement de la maladie ou bien l'accumulation de cellules sénescents par exemple ? C'est dire que le chemin est encore très long vers un traitement efficace. Dans ces conditions, les médecins explorent de nouvelles voies, dites non médicamenteuses, telles que les stimulations électriques ou magnétiques transcrâniennes, avec des objectifs plus limités et encore lointains, dans l'espoir de ralentir l'évolution des démences.

On accompagne le patient : la remédiation cognitive

Devant les difficultés à trouver des médicaments efficaces, la prise en charge doit être la plus précoce possible. Elle consiste à aider le patient dans sa vie quotidienne, mais aussi à tenter de ralentir la progression de la maladie par des moyens autres que les médicaments. La remédiation cognitive (ou rééducation cognitive) est un processus d'apprentissage dont le but est de soutenir les capacités cognitives affaiblies, mais aussi de récupérer certaines fonctions compensatoires grâce à la mise en place de nouvelles stratégies. Ces méthodes ciblent les fonctions qui mettent en jeu l'attention, la concentration, la mémoire, le langage, les capacités visio-spatiales, la planification, le contrôle

de son comportement... On propose par exemple aux patients des outils pour résoudre des problèmes complexes: planifier une matinée de courses, se rendre d'un lieu à un autre, assumer des responsabilités professionnelles, scolaires ou universitaires. Ce travail apporte au patient plus de confiance en soi et en ses capacités intellectuelles, et le plus souvent il s'agit d'activités ludiques et valorisantes. Si des exercices papier-crayon sont le plus souvent proposés, les *serious games* sur ordinateur ou tablette ont fait leur apparition, avec un certain succès.

En conclusion, il faut reconnaître que l'on se trouve bien démuni pour soigner les maladies du système nerveux. D'autant que pour une même maladie, les symptômes peuvent être très variables d'un individu à l'autre, selon la région du cerveau qui est touchée. Sauf dans des cas très spécifiques, comme la chirurgie pour certaines épilepsies, il n'y a guère que les traitements par des médicaments qui sont utilisés. Certains marchent bien: il y a eu par exemple une série de médicaments actifs dans le traitement de la sclérose en plaques, grâce plutôt aux progrès de l'immunologie et de la lutte contre l'inflammation qu'à ceux des neurosciences et à la compréhension du cerveau. Un des autres (mais rares) domaines où de nouveaux médicaments efficaces sont apparus, c'est dans le traitement de la migraine. Enfin, dans de rares cas d'AVC pris au tout début, l'administration dans les premières heures d'un médicament pour tenter de détruire le caillot sanguin (les médicaments anti-thrombolytiques dont nous avons parlé plus haut) peut bloquer le développement d'un processus qui aurait conduit à une paralysie de type hémiplegie.

Mais lorsque les symptômes sont trop complexes ou que la maladie est trop avancée, les traitements sont inefficaces ou mal adaptés, avec des effets secondaires comme nous l'avons

vu pour la L-Dopa. Néanmoins, la recherche progresse. Lentement certes mais elle progresse. Les avancées se traduisent par une amélioration de la prise en charge des patients : diagnostic, prévention, traitement et réhabilitation. Mais tous ne réagissent pas de la même manière à un même traitement. C'est pour cela qu'il est indispensable de comprendre précisément l'évolution de la maladie pour chacun, non seulement la partie visible, ce que le patient exprime, mais également la partie invisible, c'est-à-dire au niveau cellulaire, au niveau des circuits neuronaux et des mécanismes de compensation.

Si l'on arrive à ce degré de compréhension, on pourra alors s'attaquer plus directement à chacun des troubles et à chacun des profils évolutifs : c'est ce qu'on appelle la médecine 4P : Prédictive, Préventive, Personnalisée et Participative, que l'on décrit plus simplement maintenant comme la médecine de Précision. Il faudra adapter la prise en charge des patients, par des approches ciblées sur les mécanismes de leur pathologie, en utilisant plus finement les moyens thérapeutiques. Ceci est d'autant plus important qu'il s'agira de maladies neurologiques chroniques. Une telle médecine nécessitera de plus en plus la participation active du patient seul et/ou au sein d'associations qui seront amenées à jouer un rôle de plus en plus important. Catherine Tourette-Turgis a créé récemment à l'université Pierre-et-Marie-Curie (Paris VI), « l'Université des patients » avec une formation diplômante qui reconnaît le patient comme expert de sa propre maladie. Le futur est une médecine adaptée au profil de chaque patient. Là encore, on est bien loin des rêves des transhumanistes !

Où l'on retrouve l'Homme réparé

De nouveaux dispositifs technologiques se sont développés depuis plusieurs années : le recueil de toute une série de paramètres simplement sur son smartphone (ce que les Anglo-saxons appellent la *quantified health*) est déjà couramment utilisé et peut servir à suivre en continu certaines pathologies ou certaines actions préventives comme l'activité physique par exemple. La miniaturisation de ces dispositifs, grâce à l'emploi croissant des nanotechnologies, permet leur utilisation au domicile du patient par la création, par exemple, de véritables mini-laboratoires sur puces électroniques assurant de très nombreux dosages à partir d'une goutte de sang et même certaines mesures transcutanées. Mais d'autres dispositifs peuvent ou pourront aussi être employés à des fins thérapeutiques, voire implantés dans le corps, transformant ainsi l'individu en une véritable « interface corps-machine » : un cas simple et déjà appliqué est celui des implants cochléaires ou des pacemakers cardiaques qui rendent de réels services, respectivement en cas de perte d'audition sévère ou de troubles graves du rythme cardiaque. Un exemple spectaculaire est le projet développé en France par la société Carmat qui consiste à installer un cœur entièrement artificiel dans le thorax du patient. Ce n'est pas sans soulever des questions éthiques. De tels objets non seulement « réparent » le corps, mais ils créent un nouveau mode de pratique qui peut influencer le ressenti du sujet dans son rapport au monde extérieur et à lui-même, de manière consciente ou inconsciente. Ceci peut, entre autres, entraîner l'apparition de symptômes non prévus, que le progrès technologique s'autorise pourtant à légitimer. Le problème devient particulièrement aigu pour les futurs implants cérébraux qui créent une

véritable « interface cerveau-machine » et sont tant désirés par les transhumanistes.

Alors, le cerveau réparé pour de vrai, que peut-on réellement envisager ? Protéger les neurones des agressions diverses, les réparer, les empêcher de mourir, greffer de nouveaux neurones ou induire de nouveaux neurones fonctionnels à partir de cellules souches... Mais aussi, et ce n'est pas le moindre problème, rétablir des connexions fonctionnelles. Actuellement, au moins sur des modèles animaux, on sait faire repousser certains axones afin qu'ils reforment des synapses sur des cellules cibles ; mais le vrai défi est que les synapses se reconstituent sur les bonnes cibles de façon à ce que la fonction perdue, motrice, cognitive, ou les deux, soit restaurée et si possible entièrement l

Pour ce faire, à quel niveau peut-on agir : au niveau des gènes, des cellules, des réseaux de neurones ou/et au niveau du comportement des individus ? Tous, mon capitaine ! Il existe de très nombreuses techniques de thérapie génique et cellulaire. Nous n'évoquerons que les plus récentes qui, à l'heure actuelle, ne sont qu'en phase expérimentale.

Agir au niveau des gènes

Le concept de thérapie génique date des années 1950, mais il s'est réellement concrétisé dans les années 1990 avec les premiers essais conduits chez l'humain. Cette technique consiste à délivrer aux cellules malades à cause d'un gène défectueux (à l'aide de virus rendus inoffensifs qui servent de « transporteurs »), un gène fonctionnel qui le remplace, ou un gène à action thérapeutique qui est capable de faire taire

le gène atteint afin qu'il ne produise plus de protéines anormales; dans ce dernier but, on utilise parfois non l'ADN du gène, mais l'intermédiaire entre le gène et la protéine, l'acide ribonucléique ou ARN, pour rendre silencieux le gène par une manipulation astucieuse dite de l'ARN interférant. Des stratégies thérapeutiques fondées sur l'utilisation d'ARN interférant sont en cours de développement; récemment un de ces « candidats médicaments » a été créé par la firme Biogen et semble-t-il utilisé avec un certain succès dans une maladie génétique orpheline (c'est-à-dire rare) chez l'enfant, l'atrophie musculaire spinale. Des essais du même type sont en cours dans une myopathie, la maladie de Duchenne qui provoque une dégénérescence progressive des muscles de l'organisme.

Récemment, une découverte faite par l'Américaine Jennifer Doudna et la Française Emmanuelle Charpentier a mis la communauté scientifique et médicale en émoi. D'ailleurs, ces deux biologistes avouent elles-mêmes être un peu dépassées par les événements. On ne parle plus que de ça: CRISPR (attention quand vous le prononcez, dites Crispeur, sinon votre interlocuteur va se demander pourquoi vous faites la grimace et vous risquez de postillonner!), acronyme de *Clustered regularly interspaced short palindromic repeats*, ou « Courtes répétitions palindromiques groupées et régulièrement espacées » en français. Mais vous pouvez oublier aussi bien l'acronyme anglais que français, on risquerait de vous demander des détails! Pourquoi cette technique a-t-elle provoqué un tel engouement dans la communauté scientifique? Parce qu'elle est simplissime: elle permet de corriger ou « réécrire » le génome d'un organisme vivant. C'est aussi simple que de faire des copier-coller dans Word. Même un enfant lorsqu'il fait des découpages y arriverait! CRISPR-Cas9, c'est son nom complet, est aussi surnommé le couteau suisse de la biologie. Comment ça marche? Casp9

(caspase 9) est une enzyme qui coupe le bout de gène défectueux ou indésirable. Et CRISPR est un petit brin d'ARN qui sert de guide à Casp9 pour couper là où il faut. Il n'y a plus qu'à remplacer le gène défectueux. Pas plus compliqué que ça! Quand on sait que de nombreuses maladies ont une origine génétique, on comprend que cette découverte mette le monde de la médecine sens dessus dessous. Des chercheurs chinois, à Canton, se sont engouffrés les premiers dans la brèche ouverte: ils ont corrigé, sur des embryons humains en culture (*in vitro*), un gène porteur d'une grave maladie du sang. Récemment, une équipe de l'université d'Oregon, aux États-Unis, est parvenue à corriger, toujours *in vitro*, un gène entraînant une grave maladie cardiaque, la cardiomyopathie obstructive. Mais il est plus facile de faire de telles manipulations sur des cellules embryonnaires en culture que dans un organisme entier, ce qui ne serait pas sans poser, là encore, quelques problèmes éthiques! Et depuis cette découverte, certains travaux semblent montrer que la technique n'est pas aussi si précise que cela. Elle aurait tendance à ne pas toujours couper là où il faut... Cette imprécision sera sûrement corrigée, mais en attendant... affaire à suivre. Ce ne sera probablement pas le remède miracle attendu par les transhumanistes.

Les cellules souches ou la médecine régénérative

Les transhumanistes en parlent et en espèrent beaucoup. Dans chaque organisme, il existe des cellules appelées cellules souches car elles peuvent donner naissance à différents types de cellules spécialisées (cardiaques, de la peau, musculaires, osseuses...). On envisage de les greffer au niveau d'un organe afin d'en restaurer le bon fonctionnement. C'est une méthode prometteuse de thérapie cellulaire. Il existe différents

types de cellules souches, mais elles ont toutes la propriété de pouvoir se renouveler indéfiniment, offrant un stock illimité de « matériel ». Certaines, les cellules souches « unipotentes », ne fournissent qu'un seul type cellulaire (foie ou peau ou cerveau, etc.). En revanche, les cellules souches dites multipotentes peuvent se différencier en un nombre limité de différents types cellulaires. Quant aux cellules souches qualifiées de « pluripotentes », elles peuvent donner naissance à plus de deux cents types cellulaires représentatifs de tous les tissus de l'organisme. Elles sont obtenues soit à partir d'un embryon de 5 à 7 jours (quand les cellules sont encore indifférenciées) ou induites artificiellement à partir de cellules adultes (déjà spécialisées). Dans ce dernier cas, véritable « retour en arrière » qualifié de reprogrammation, on les appelle des « cellules pluripotentes induites » (IPS en anglais). Deux chercheurs, l'un japonais, Shinya Yamanaka, n'était pas né lorsque le second John Gurdon, un Britannique, a commencé ses premières expériences en 1960. Ils ont obtenu tous deux le prix Nobel de médecine en 2012 pour leurs travaux sur la transformation des cellules adultes en cellules souches pluripotentes, ouvrant par là même une autoroute vers la médecine régénérative. Celle qui, les scientifiques l'espèrent, permettra un jour de remplacer les organes défaillants par de nouveaux en pleine santé.

Il reste, vous vous en doutez, quelques problèmes à résoudre. Les chercheurs savent aujourd'hui obtenir la transformation des cellules pluripotentes en plusieurs types cellulaires, comme des cellules de la rétine ou de la peau ou des neurones. Mais chaque type cellulaire est obtenu grâce à un cocktail de molécules spécifiques dont la recette est complexe et longue à mettre au point. C'est de la cuisine moléculaire cinq étoiles ! Et le cocktail nécessaire n'a pas encore été découvert pour certains types

cellulaires. Autre difficulté: lorsque les cellules souches sont prélevées chez une autre personne que le patient, des problèmes de tolérance immunitaire peuvent survenir, entraînant des rejets de greffe. Mais, progressivement, cette technique est de plus en plus appliquée. Les cellules souches hématopoïétiques, celles à l'origine de toutes les cellules du sang et qui sont issues de la moelle osseuse, sont utilisées depuis les années 1970 dans le traitement des cancers du sang. Aux classiques greffes de peau des années 1980 peuvent s'ajouter maintenant les greffes de cellules souches cutanées utilisées pour reconstituer les différentes couches de l'épiderme, en particulier chez les grands brûlés.

Et pour les cellules nerveuses? Ce n'est pas simple, encore une fois. La maladie de Parkinson pourrait bénéficier de cette technique en remplaçant les cellules perdues par de nouveaux neurones. La recherche essaye, depuis environ vingt ans, mais sans grand succès. Des résultats intéressants ont cependant été obtenus en 2016 lors d'un essai clinique visant à injecter des cellules souches directement dans le cerveau de patients souffrant de séquelles d'un accident vasculaire cérébral (AVC). Des chercheurs de l'Université Libre de Bruxelles, en collaboration avec Afsaneh Gaillard, de l'Inserm en France, sont en effet parvenus à produire en culture des neurones humains à partir de cellules souches pluripotentes. Ils ont montré qu'une fois transplantées dans le cerveau de souris, ces cellules s'y sont intégrées et ont pris leurs fonctions! En mars 2017, au Centre de biologie du développement de l'Institut Riken (Japon), des cellules de rétine obtenues à partir de cellules souches issues d'un donneur ont été transplantées dans la rétine d'un patient atteint de dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA). Il ne s'agit encore que d'un essai clinique de phase 1 : cette

opération ne visait pas à restaurer la vue chez ce patient déjà trop atteint, mais plutôt à montrer que la technique ne présentait pas un danger pour la santé.

Les cellules souches offrent donc de réels espoirs thérapeutiques pour lutter contre certains troubles du cerveau, comme d'autres organes, mais dans des délais qui sont encore délicats à apprécier et en sachant qu'il ne suffit pas de compenser la perte de neurones par des cellules remplaçantes, il faut que celles-ci puissent s'intégrer parfaitement et recréer le réseau qui permet de restaurer une fonction donnée. En revanche, elles ont immédiatement stimulé l'imaginaire de certains transhumanistes, au point même de proposer leur utilisation pour ressusciter les morts! Des chercheurs américains de la société Bioquark, menés par Ira Pastor, prétendent injecter des cellules souches et des protéines dans la moelle épinière de patients en état de mort cérébrale. La procédure inclut également une thérapie laser et des chocs électriques destinés à recréer les connexions entre les neurones. Le but de tout ça? Ni plus ni moins que ramener ces individus à la vie! Le projet, baptisé *Re-Anima*, inquiète: après un premier refus d'essai clinique en Inde, Bioquark voudrait mener des tests en Amérique du Sud. La société cherche à recruter vingt «patients», dont il est évidemment difficile d'obtenir le consentement! Le projet inquiète donc, mais surtout interroge sur la santé mentale de ses promoteurs! Une autre start-up adopte une stratégie différente mais tout aussi incertaine: la société Humai, à Los Angeles, se propose, grâce à un «savant» (?) mélange de biologie et d'intelligence artificielle, de restituer la «conscience» des individus décédés ou encore d'implanter votre personnalité et vos souvenirs dans un clone robotique. Un bel exemple de ce que peut inspirer la folie transhumaniste!

Les modèles animaux : indispensables

Il existe une pléiade de modèles animaux pour l'étude des maladies du système nerveux. Nous en avons déjà croisé quelques-uns dans les pages précédentes : le ver *C. elegans* (un modèle d'excellence entre autres pour la chorée de Huntington), la drosophile (pour des études sur le développement et le comportement), l'aplysie (pour l'apprentissage et la mémoire). Quant aux rongeurs, ils sont, depuis une cinquantaine d'années, les animaux les plus utilisés dans les laboratoires. Ils sont faciles à nourrir et à soigner, leurs activités à l'âge adulte sont riches en comportements et en outre propices aux modifications génétiques car de très nombreux gènes ont été identifiés et cartographiés chez ces animaux par plus d'un siècle de génétique classique précédant le séquençage plus récent de leur génome. De tout temps, l'Homme a opéré des modifications de gènes chez les animaux, souvent en vue de l'amélioration de la race et de la productivité. (Petite anecdote : le bichon frisé est né sous la Renaissance italienne, au xv^e siècle, du croisement entre le bichon maltais avec d'autres petits chiens comme le caniche !) L'expression des gènes de la souris est très similaire (mais pas complètement identique, c'est une donnée essentielle), à celle de l'humain. On peut ainsi fabriquer des souris transgéniques dans lesquelles les chromosomes ont été modifiés afin qu'ils contiennent des fragments d'ADN étranger et en particulier provenant de l'Homme. On peut aussi faire produire de nouvelles molécules à leurs cellules ou au contraire stopper la production de certaines. On pourrait multiplier les exemples. Les singes servent, bien souvent, de tremplin avant une application à l'espèce humaine. L'administration d'une neurotoxine, par exemple, la MPTP (de son nom entier 1-méthyl

4-phényl-1,2,3,6-tétrahydropyridine) induit la mort des neurones à dopamine dans le cerveau et donc provoque des symptômes parkinsoniens. En 1993, chez des singes rendus parkinsoniens à l'aide de cette toxine, l'équipe de Bernard Bioulac a stimulé le noyau sous-thalamique (un noyau du striatum) et a montré que l'on pouvait rétablir un état moteur normal. Ces expériences chez le singe ont permis à Alim-Louis Benabid, de l'université de Grenoble, d'appliquer à l'Homme la stimulation à haute fréquence du noyau sous-thalamique dès 1994, obtenant par inhibition des structures cérébrales profondes, la disparition des symptômes moteurs (tremblement, akinésie, rigidité) de la maladie. Ces expériences pionnières ont permis de mettre au point, avec succès, les techniques de stimulation profonde chez des patients atteints de certaines formes de la maladie de Parkinson.

Que ce soit dans le domaine de la neurologie, des troubles du comportement ou encore des atteintes des processus cognitifs, la recherche expérimentale des mécanismes neuronaux qui les sous-tendent utilise donc de très nombreux modèles animaux, analogues expérimentaux de ces maladies. Certes, ces modèles sont très imparfaits et la transposition à notre espèce reste difficile. Dans le cas de la maladie d'Alzheimer, par exemple, il n'existe pour l'instant aucun modèle animal satisfaisant. De nombreux résultats obtenus chez une souris ou un rat n'arrivent pas à être reproduits chez l'Homme. Il n'en reste pas moins que, grâce aux modèles animaux, le bilan de plus de cinquante ans est largement positif. La recherche sur ces modèles animaux doit être poursuivie pour permettre la compréhension et donc les progrès dans les différentes pathologies du système nerveux.

Enfin, il faut souligner qu'en Europe cette recherche s'effectue dans un cadre juridique et réglementaire clairement

défini et obligatoire. Elle est évaluée par des comités d'éthique selon des normes de plus en plus draconiennes. Elle s'effectue dans des structures accréditées, contrôlées, disposant d'un encadrement vétérinaire et de personnels spécialisés. Des protocoles rigoureux réduisent de manière drastique l'utilisation du nombre d'animaux et tiennent compte du bien-être animal (les animaleries sont climatisées, et en période de canicule, les animaux sont dans un environnement bien plus confortable que beaucoup de gens y compris les chercheurs des laboratoires concernés, au moins en France!).

La parabiose, une solution d'avenir?

Qu'est-ce que la parabiose? Dans le cas qui nous intéresse, il s'agit de faire communiquer la circulation sanguine entre deux animaux de même espèce. Les premières expériences datent des années 1850 afin d'étudier le développement et la physiologie des animaux. Des expériences comparables ont été refaites récemment en particulier par le laboratoire de Tony Wyss-Coray à l'université de Stanford en Californie. En pratique, vous prenez deux souris, l'une âgée, l'autre toute jeune. Elles sont ouvertes toutes les deux sur le côté et leurs veines et artères sont suturées l'une à l'autre. Après quelques jours de traitement, les paramètres vitaux de la souris âgée s'améliorent. C'est donc qu'il existe dans le sang des molécules qui permettent à tous les types cellulaires, y compris les neurones, de se sentir mieux. Malheureusement, malgré des recherches intensives par les meilleurs laboratoires américains de Harvard et de Stanford, la ou les molécules miracles n'ont pas été totalement identifiées, même si deux protéines dénommées GDF11 et TIMP2 semblent impliquées. « *Si cette quête*

est si difficile, c'est qu'il ne s'agit probablement pas d'une substance unique, mais plutôt d'un ensemble de facteurs moléculaires, chacun présent dans le sang à des doses infimes», avance dans un article du journal *Les Échos*, en 2016, Hugo Aguilaniu, chercheur au CNRS et spécialiste du domaine. Il ajoute : « *On voit difficilement comment une telle co-circulation serait praticable sur l'Homme. Et de plus, on ne sait pas si les effets constatés sont durables ou réversibles: la souris vieille retrouverait-elle son âge réel sitôt les deux systèmes sanguins déconnectés?* » Des essais de transfusions sur des souris, à la place de la parabiose, y compris sur des modèles animaux de maladie d'Alzheimer, ne sont guère concluants. Cela n'a pas empêché la start-up Alkahos, cofondée par Tony Wyss-Coray, professeur à l'université de Stanford (États-Unis) d'essayer des transfusions de plasma issu de jeunes donneurs sains sur un petit échantillon de patients atteints de maladies d'Alzheimer modérées, mais les résultats ne sont pour l'instant pas convaincants et cet essai a été critiqué. Certains pourtant s'intéressent de très près à la chose. Parmi eux, de riches milliardaires, qui ont tout sauf la jeunesse éternelle, se feraient transfuser du sang de jeunes hommes pour quelques milliers de dollars. Peter Thiel, cofondateur de PayPal, serait lui aussi très intéressé. La société californienne Ambrosia, dans le cadre d'essais cliniques privés, propose à ses clients de recevoir du sang de jeunes hommes pour quelque 8 000 dollars!

Tout cela reste hautement fantaisiste et donc moralement très discutable. Malgré l'intérêt réel à long terme de ces approches, le caractère précipité des applications à l'Homme fait penser aux vieux mythes inspirés par la valeur hautement symbolique du sang dans l'imaginaire collectif: tels le mythe du comte Dracula, le vampire immortel qui se repaît du sang de ses proies et les transforme à son tour en vampires, ou

encore l'histoire d'Élisabeth Bathory au ^{xvi}^e siècle, la « comtesse sanglante » qui se serait baignée dans le sang de ses victimes pour garder sa jeunesse.

Et l'intelligence artificielle dans tout ça ?

L'intelligence artificielle est partout dans la recherche en biologie en général, et en neurosciences en particulier. Cela va de la simple balance pour peser les drogues, à la centrifugeuse et aux appareils les plus sophistiqués comme ceux utilisés pour l'IRM (imagerie par résonance magnétique) et la TEP (tomographie par émissions de positons).

Depuis la fin du siècle dernier, les nouvelles technologies, comme le séquençage à haut débit de l'ADN, ont produit des quantités considérables de données. Le premier séquençage du génome humain, finalisé en 2001, a mobilisé de nombreux laboratoires pour un coût non négligeable et a demandé douze années de travail. Maintenant, de nombreux laboratoires possèdent leurs propres séquenceurs à haut débit et vous pouvez obtenir le séquençage de votre ADN pour moins de 1 000 euros. Les données brutes expérimentales, qui croissent de manière exponentielle, sont stockées dans des bases appelées bibliothèques qui sont accessibles aux chercheurs sur Internet. L'intelligence artificielle a apporté dans ce domaine une contribution essentielle. Elle participe également à la diffusion des connaissances. Songez que dans les années 1990, pour lire un article scientifique, il fallait soit le demander à l'auteur, soit aller en bibliothèque puis en faire une photocopie (et le plus souvent, plusieurs laboratoires se partageaient une photocopieuse). Il ne fallait ni être pressé ni stressé ! Maintenant, moyennant finances, bien sûr, il existe des sites spécialisés où

on peut trouver n'importe quel article, ainsi que des bases de données pirates comme Sci-Hub qui permettent d'obtenir un nombre colossal d'articles en seulement quelques clics et gratuitement!

Des exploits en chirurgie sont aussi réalisés grâce à l'intelligence artificielle. En 2001, une équipe de médecins dirigée par le français Jacques Marescaux effectuait avec succès, pour la première fois, une intervention chirurgicale à distance appelée *Lindbergh*. Les médecins manipulaient des manettes du robot *Zeus* depuis un bureau de New York, tandis que les bras chirurgicaux étaient implantés dans une patiente à Strasbourg! Aujourd'hui, une perceuse automatisée pilotée par ordinateur, semblable à celles utilisées pour fabriquer des pièces automobiles, peut réaliser une chirurgie crânienne en quelques minutes contre deux heures avec les procédures standards, soit cinquante fois plus rapidement! À travers des lunettes binoculaires, le chirurgien, pousse et tire dans des joysticks, manipule les bras articulés de la machine. Les mouvements sont démultipliés. Et le geste plus précis que les mains les plus habiles. Pour un peu, le chirurgien peut débiter une maladie de Parkinson, les tremblements sont plus qu'amortis. Et s'il perd ses lunettes, le robot s'arrête!

Plus spectaculaire encore est le cas de Matt Nagle. Cette ancienne star du football américain est devenue tétraplégique à 21 ans à la suite d'une bagarre. Un couteau lui sectionne la moelle épinière au niveau de la 4^e vertèbre cervicale. L'homme est paralysé du cou jusqu'aux doigts de pieds. En 2004, une interface miniaturisée (de la grosseur d'un petit cachet) est implantée à la surface de son cerveau, au niveau du cortex moteur commandant sa main et son bras dominant. Le tout est relié à un ordinateur. Le cerveau est, on l'a vu,

en continuelle activité et cette activité engendre des signaux électriques à sa surface. Tout stimulus sensoriel, mais aussi les pensées entraînent des modifications de cette activité électrique. Chez Matt, les signaux électriques émis par les neurones du cortex moteur primaire ont ainsi pu être détectés et, grâce à des algorithmes, « traduits » par l'intermédiaire d'un exosquelette en mouvements que le patient souhaitait réaliser. Matt a ainsi pu manipuler une souris d'ordinateur et choisir sa chaîne de télévision.

On pourrait citer aussi l'Américain Igor Spetic, amputé de la main droite, qui a testé en 2014 une prothèse de main bardée de capteurs reliés par des électrodes aux nerfs de son avant-bras et qui ont restauré le sens du toucher. Une vie de cyborg!

En août 2014, le président des États-Unis Barack Obama a présenté un nouveau projet de la Darpa (Agence pour les projets de recherche avancée de défense) pour le moins surprenant. Baptisé *ElectRx*, ce programme militaire, financé à hauteur d'environ 80 millions de dollars, vise à surveiller en permanence l'état du corps. Si une anomalie est détectée, de minuscules électrodes connectées sur les nerfs reliés aux organes, enverront de petites décharges afin de rétablir un fonctionnement normal. La Darpa envisage de mener les premiers tests sur l'humain avant 2020.

Mais toutes ces techniques sont lourdes et peu d'individus peuvent en bénéficier. De plus, le retour à une vie normale est loin d'être acquis. Pour que les prophéties des transhumanistes se réalisent, les techniques devraient pouvoir s'appliquer au plus grand nombre, et utilisées aussi simplement que de prendre un cachet d'aspirine. Alors, rêvons un peu. Au cours des dix dernières années, l'optogénétique a révolutionné

les neurosciences en permettant une connaissance sans précédente des circuits impliqués dans certaines pathologies cérébrales, telles que l'addiction, la dépression, les TOC et autres troubles anxieux. Comme son nom l'indique, cette technique associe thérapie génique et lumière: la thérapie génique permet de rendre les neurones sensibles à la lumière, le but étant de contrôler le fonctionnement d'un réseau de neurones spécifiques. Ainsi, grâce à la stimulation par une source lumineuse, on peut les activer ou les inhiber, donc moduler leur fonctionnement. Pour l'instant, cette technique n'est pas applicable à l'Homme. Mais lorsque l'on sait que la modulation des circuits neuronaux est à la base de tout processus cognitif et au cœur de nombreuses pathologies, on peut en effet rêver! Des essais cliniques chez l'humain sont en cours dans le cas de la rétinite pigmentaire, une maladie dans laquelle les cellules photoréceptrices de la rétine meurent progressivement. L'objectif est d'injecter dans ces cellules une protéine sensible à la lumière qui permettra de déclencher le signal électrique jusqu'au cerveau et donc aux patients de retrouver la vue. Des recherches sont également menées dans le cas des épilepsies. Mais le plus souvent, les maladies du cerveau ont leur siège dans des structures trop profondes du cerveau pour pouvoir être stimulées par la lumière. C'est donc pour l'instant inenvisageable d'espérer les traiter de cette manière.

Finalement, que faut-il retenir?

Les maladies du cerveau sont excessivement nombreuses et variées. Les origines sont le plus souvent multifactorielles, génétiques mais aussi environnementales. Il en résulte des anomalies de certaines protéines ou un défaut de

fonctionnement du réseau de neurones. Aussi minime soit-il, un dysfonctionnement peut avoir des conséquences dramatiques pour la vie de l'individu.

Aujourd'hui, malgré des avancées spectaculaires dans la recherche, on n'aperçoit que la partie émergée de l'iceberg. Le cerveau est trop complexe ! Il reste beaucoup de chemin à parcourir avant de décrypter les mécanismes cellulaires mis en jeu dans les différentes maladies qui l'affectent. Les transhumanistes pensent que l'on saura tout sur le fonctionnement du cerveau dans très peu de temps. Grâce aux connaissances en biologie et à l'intelligence artificielle, le cerveau malade n'existera plus. C'est tout à fait utopique. Même si l'on pouvait disséquer toutes les causes des pathologies et tous les mécanismes du fonctionnement cérébral, ce qui prendra un temps impossible à évaluer mais sûrement très long, il n'en reste pas moins que le cerveau, comme tout autre organe, est sensible à son environnement, et en particulier aux pesticides, aux métaux lourds, à la radioactivité, aux perturbateurs endocriniens... C'est toute la société actuelle qui doit être soignée !

Pour l'instant, on ne sait pas enrayer les maladies qui affectent le cerveau, y compris quand l'origine est bien connue et relativement simple, à l'exemple de la chorée de Huntington. On soigne seulement les symptômes. Et encore, pas toujours. Les traitements sont parfois inexistants (cas de la maladie d'Alzheimer). Lorsqu'ils existent, ils présentent des effets secondaires importants (maladie de Parkinson) ou sont lourds, comme la stimulation profonde chez les parkinsoniens, et peu d'individus peuvent en bénéficier. Enfin, le retour à une vie normale est, dans ce cas, loin d'être acquis.

Pour les transhumanistes, il sera possible d'implanter des puces dans les zones du cerveau atteintes par les maladies

ÇA VA PAS LA TÊTE!

neurodégénératives. Ils nous promettent ni plus ni moins la guérison totale, la *restitutio ad integrum*, et pour tout de suite! Mais de «l'Homme augmenté» à «l'Homme réparé», ce n'est pas un simple glissement, c'est un saut ou une bataille loin d'être gagnée s'il s'agit de vraiment rendre sa fonction à celui qui en est dépourvu et non pas de l'aider à supporter par de timides améliorations un quotidien souvent insupportable! Les lendemains qui chantent des transhumanistes contrastent avec la réalité actuelle des échecs thérapeutiques répétés dans les maladies neurodégénératives et l'espoir qu'ils suscitent est non seulement une escroquerie, mais aussi une véritable cruauté à l'égard des centaines de milliers de patients atteints. Pour que les prophéties des transhumanistes se réalisent, il faudrait trouver des techniques qui peuvent s'appliquer au plus grand nombre et que ce soit aussi simple que de prendre n'importe quel médicament courant.

Les solutions pour soigner et guérir un cerveau malade viendront de la recherche fondamentale en biologie et non pas des rêves des transhumanistes. Il faut être résolument optimiste mais aussi très patient, cela prendra du temps. Ceci rend d'autant plus nécessaire l'attribution de moyens plus importants à la recherche dite «translationnelle», conduisant à des applications médicales, mais aussi à la recherche fondamentale d'où viendront les avancées réellement «disruptives».

La recherche clinique permettra d'adapter à chaque individu un traitement approprié. L'intelligence artificielle participera bien évidemment à ce challenge. C'est un outil fantastique, indispensable aux avancées dans le traitement des pathologies du cerveau. Il faut faire confiance à l'intelligence et la créativité des humains qui est et restera bien supérieure à n'importe quelle machine.

ÉPILOGUE

Le transhumanisme : une coquille vide !

Les apôtres du transhumanisme considèrent que le prochain stade de l'évolution humaine verra l'abolition des quatre fléaux qui existent depuis l'aube des temps : le handicap, la maladie, la vieillesse et la mort. Leur but est de créer une nouvelle humanité où l'Homme sera débarrassé de son corps et des maladies qui vont avec. Il aura échappé à la grande faucheuse et sera immortel. Il sera « Dieu » ou gouverné par de nouveaux Dieux, sans doute semblables aux mégalomaniques de la Silicon Valley qui encensent le transhumanisme. D'ailleurs, pour certains, comme Yuval Noah Harari dans son dernier livre *Homo Deus*, « *l'être humain n'est qu'une immense collection d'algorithmes biochimiques* ». Peut-être ! Mais une fois que l'on a dit ça, pour aller plus loin, il faut être en mesure d'écrire ces algorithmes. Cela suppose non seulement de disposer de l'intégralité des données pouvant

rendre compte des mécanismes qui sous-tendent les fonctions supérieures du cerveau (mémoire, conscience, empathie, pensée...) et font que chaque cerveau est unique, mais aussi des outils informatiques adéquats. Pour l'instant, ni les unes ni les autres n'existent. Le transhumanisme est bel et bien une coquille vide.

Ses zélotes font fi des critiques en s'appuyant sur les immenses avancées de l'informatique en général, du Big Data et de l'intelligence artificielle en particulier. Certes, la révolution numérique et les progrès de l'IA, en croissance exponentielle, influencent déjà et influenceront encore plus dans les années à venir (quelques dizaines pour les plus pessimistes) toute l'organisation de la société et donc la vie de chaque individu. Les machines font déjà et feront encore beaucoup plus de tâches, plus vite et mieux que nous. Mais l'essence même de l'Homme est-elle reproductible, voire modifiable et même améliorable, comme ils le prétendent? Ce n'est pourtant pas «l'apprentissage supervisé» et le «*deep learning*» qui permettront de transférer notre esprit, nos pensées et notre capacité d'agir dans une machine. Il faudrait développer dans ce domaine de nouvelles approches, et ce avant 2045, pour respecter les délais annoncés par les transhumanistes!

En outre, aucun des avocats zélés du transhumanisme ne prend en compte ni les limites des connaissances actuelles de la biologie et des neurosciences ni la lenteur potentielle des avancées à venir dans ces domaines. Aucun scientifique digne de ce nom, connaissant un tant soit peu le cerveau, ne peut croire à leurs balivernes. Nous avons vu que le cerveau humain est d'une complexité rare. Ce n'est pas tant par sa connectivité proprement dite qu'il est performant, mais grâce aux réarrangements constants de ses connexions. Contrairement à la machine qui fait ce qu'on lui demande, ou qu'on lui a

appris à faire, le cerveau décide de ce qu'il veut faire, plus ou moins bien il faut le reconnaître, mais avec parfois beaucoup de talent et de créativité. De plus, il est abreuvé d'informations aléatoires en provenance de l'environnement auxquelles il s'adapte en permanence grâce à sa formidable plasticité, ce qu'une machine est bien incapable d'imiter. Et si, pour des tâches compliquées, comme jouer une partie de go, l'être humain peut être battu par un robot, ce n'est pas demain la veille qu'il se laissera anéantir par une machine aussi performante soit-elle. De plus, les recherches actuelles sur le cerveau, à l'aide de techniques de plus en plus sophistiquées, permettent certes de mieux comprendre son fonctionnement, mais révèlent en outre des niveaux de complexité insoupçonnés jusqu'à présent, par exemple que chaque neurone pris individuellement est différent de son voisin. Indubitablement, le cerveau d'*Homo sapiens* ne peut tenir dans une puce.

Les avancées de la recherche en biologie et en médecine, en particulier dans le domaine du vieillissement, sont réelles mais actuellement insuffisantes pour nous faire vivre 300 ou 1 000 ans, surtout en parfaite santé. Pour l'instant, le vieillissement est inéluctable même s'il y a des espoirs sérieux de vieillir un jour en meilleure santé, y compris en préservant son cerveau, ce qui contribuera à améliorer la longévité globale des populations. Quant aux maladies neurodégénératives, il n'est aujourd'hui pas possible de les traiter efficacement. Il y a actuellement un véritable verrou dans la recherche dite « translationnelle », sur le cerveau, celle qui conduit à des applications médicales : les progrès des cinquante dernières années permettent une bien meilleure compréhension de cet organe, mais malheureusement ils n'ont entraîné à ce jour que peu de retombées thérapeutiques.

Pour les transhumanistes, peu importe! Ils balayent toutes ces remarques du revers de la main car ils sont fondamentalement dualistes. Le dualisme a été formalisé en 1641 par René Descartes qui a été le premier à distinguer l'esprit (l'âme) du corps. Aujourd'hui, le dualisme s'oppose aux différentes formes de monismes qui affirment l'unité indivisible de l'être et auxquelles adhèrent la plupart des biologistes, et pas seulement eux d'ailleurs. La discussion de ce point sort du cadre de ce livre. Cependant, même si le téléchargement du cerveau dans une puce ou dans le cloud était possible, pourrait-on l'appliquer à chacun des quelque 10 milliards d'individus sur Terre en 2045? Certainement pas! Or, c'est bien notre individualité qui intéresse chacun d'entre nous, et en premier lieu, sans doute, les quelques milliardaires qui financent le transhumanisme!

Inéluctablement existeraient alors deux catégories d'humains: ceux qui seraient «augmentés» et ceux qui ne le seraient pas; ceux qui auraient un QI de 150 et ceux qui ne l'auraient pas; ceux qui seraient malades et ceux qui seraient en forme; ceux qui seraient immortels et la majorité des pauvres mortels! Inévitablement, de cette idéologie résulteraient une société totalitaire et une humanité divisée en sous-catégories, au mépris de l'égale valeur de tous les humains. Il y a là un fantasme prométhéen qui pose des questions éthiques considérables: même si le projet transhumaniste était crédible, il resterait profondément injustifiable en regard de la morale collective et individuelle. Bien sûr, les transhumanistes se défendent d'avoir de tels objectifs. Ils disent être sensibles aux risques liés à l'utilisation des nouvelles technologies et attentifs à ne pas favoriser les inégalités sociales, à préserver la qualité des relations humaines et de l'équilibre écologique.

Récemment, les géants du web – Google, Facebook, Microsoft et Amazon – ont conclu un partenariat visant à définir « les bonnes pratiques », notamment sur ces questions éthiques. Mais peut-on les croire, alors qu'ils distillent en même temps les espoirs les plus fous? Ne cherchent-ils pas simplement à se donner bonne conscience? En raison de ce risque, de nombreuses instances, en France ou ailleurs, réfléchissent depuis une quinzaine d'années sur ces thèmes, comme le Département de recherche éthique biomédicale du Collège des Bernardins à Paris. En 2017, un procès fictif du transhumanisme a même été organisé par des juristes, où ont été abordées les questions morales et éthiques sous-jacentes, ainsi que d'autres telles que la protection de la vie privée, la conservation des données, etc.

Sur le plan sociologique, un autre point doit nous interpellé. Comment se fait-il que les idées des transhumanistes connaissent un tel succès auprès de certains médias de masse, d'intellectuels et de politiques. Comment des individus, a priori loin d'être stupides, peuvent-ils exprimer une telle naïveté? Tous prônent le développement technologique. Mais parmi les intellectuels, ceux qui font l'opinion et ont accès aux médias, particulièrement en France, n'ont pas la culture et les connaissances scientifiques nécessaires pour percevoir le caractère erroné des fantasmes transhumanistes. Notre pays fonctionne encore sur un modèle inspiré du philosophe Jean-Paul Sartre, où un intellectuel médiatiquement reconnu est souvent un intellectuel « généraliste » et où les scientifiques sont plutôt considérés comme des experts techniques. Pour le philosophe Jean-Marie Besnier: *« Les transhumanistes ont la tentation d'opposer deux camps: celui des biotransgressifs, parmi lesquels ils se comptent, et celui des bioconservateurs, avec lesquels*

*ils ferraillent. Il convient de revoir – et même de retourner – les termes du débat.»** Il ne faut en effet pas confondre les « bio-compétents » qui connaissent la complexité des problèmes et sont prêts à les affronter avec un subtil mélange d'ambition scientifique, de persévérance et d'esprit critique, et les « bio-ignorants » pour qui les affirmations péremptoires et non prouvées tiennent lieu de résultats scientifiques et médicaux. Les premiers, auxquels nous avons la prétention d'appartenir, mettent leur passion au service de la raison et de la connaissance et les seconds, que nous critiquons, mettent leur peu de raison au service de l'irrationnel.

Soulignons aussi que derrière le mythe transhumaniste s'avance masqué un gigantesque business. Les transhumanistes sont le pur produit d'une société où les pouvoirs de l'argent, banques, multinationales industrielles, et les politiques règnent en maître. Les puissances économiques et financières que représentent les GAFA, investissent des sommes considérables dans le développement technologique, et en particulier dans l'intelligence artificielle, au point que la mobilisation des crédits privés tend à détourner la recherche publique d'objectifs plus nobles. Dès lors, le conte de fées des transhumanistes permet de donner du sens au travail des entreprises impliquées, promet un bonheur quasi-éternel aux consommateurs et flatte le narcissisme effréné de dirigeants milliardaires. Or, une recherche fondamentale forte et bien financée est une condition nécessaire (mais malheureusement pas suffisante) pour que les verrous scientifiques actuels soient levés et que de nouvelles pistes de traitement soient développées par la

* Jean-Michel Besnier, « Transhumanistes contre bioconservateurs », article disponible sur le site www.sciences-critiques.fr

LE TRANSHUMANISME: UNE COQUILLE VIDE!

recherche translationnelle fondée sur l'évidence par la preuve. Inéluctablement, elle aboutira à une meilleure compréhension du fonctionnement du cerveau et donc à un meilleur bien-être et jusqu'à un âge avancé. Ces avancées seront le fruit de recherches pluridisciplinaires où les biologistes, physiciens, chimistes et informaticiens mettront leur savoir en commun. L'intelligence artificielle a toute sa place dans ce défi enthousiasmant pour nos contemporains et nos successeurs.

La folie des humains est ailleurs que dans les croyances des transhumanistes. Les risques dus au réchauffement climatique, aux pollutions diverses, à la destruction des écosystèmes, au retour des pandémies, à la résistance aux antibiotiques, à la surpopulation associée à la pauvreté, aux inégalités et aux migrations... sont bien plus inquiétants pour notre avenir. C'est l'ensemble de ces défis et dangers que l'humanité doit affronter en s'appuyant à la fois sur la science, y compris les sciences humaines et sociales, sur la révolution numérique en marche, et, dans le domaine de la santé, sur les progrès de la biomédecine. Les décisions doivent *in fine* appartenir aux politiques démocratiquement élus par des électeurs avertis, mais la prise de décisions doit être éclairée par des collectifs d'experts auxquels le politique doit faire confiance, à condition que ces experts soient eux-mêmes accessibles au doute qui est le propre de la science!

La question est de savoir dans quel monde et dans quelle société nous voulons vivre. Dans un monde en crise, il faut bien sûr de l'espoir. Ce n'est pas évident, mais ce n'est pas une raison pour se laisser séduire par des illuminés.

Allons, le transhumanisme est une imposture. L'Homme tel que nous le connaissons, avec ses forces et ses faiblesses, a encore de beaux jours devant lui.

PETIT LEXIQUE À L'USAGE DU LECTEUR*

ADN : ADN pour Acide DésoxyriboNucléique. Cette très longue molécule est organisée en structures que l'on appelle les chromosomes*. Elle contient, entre autres, l'information génétique sous forme de gènes*.

Aire cérébrale : zone fonctionnelle du cortex*. On distingue trois grands types d'aires : les aires sensorielles, les aires motrices et les aires d'association.

Aire tegmentale ventrale : petit noyau situé dans la partie supérieure du tronc cérébral qui regroupe les neurones à dopamine* mis en jeu dans les systèmes de récompense*.

Amygdale : petite structure en forme d'amande située dans la partie antérieure du lobe* temporal du cerveau. *Voir les schémas du Cerveau**.

Apoptose : une des formes de « suicide cellulaire », un phénomène survenant au cours du développement normal et dans certaines pathologies neurodégénératives.

Astrocyte : cellule gliale* du système nerveux central*, en forme d'étoile. *Voir le schéma de Cellules gliales**.

Autophagie : mécanisme cellulaire qui consiste en la dégradation partielle du cytoplasme de la cellule en situation de survie de la cellule*.

Axone : long prolongement du neurone qui conduit l'influx nerveux* du corps cellulaire* vers la synapse*. Synonyme : **fibre nerveuse** . *Voir le schéma du Neurone**.

Barrière hémato-encéphalique : membrane qui sépare la circulation sanguine du liquide céphalo-rachidien (dans lequel baignent le cerveau* et la moelle épinière*).

* Les astérisques renvoient à la définition d'un mot.

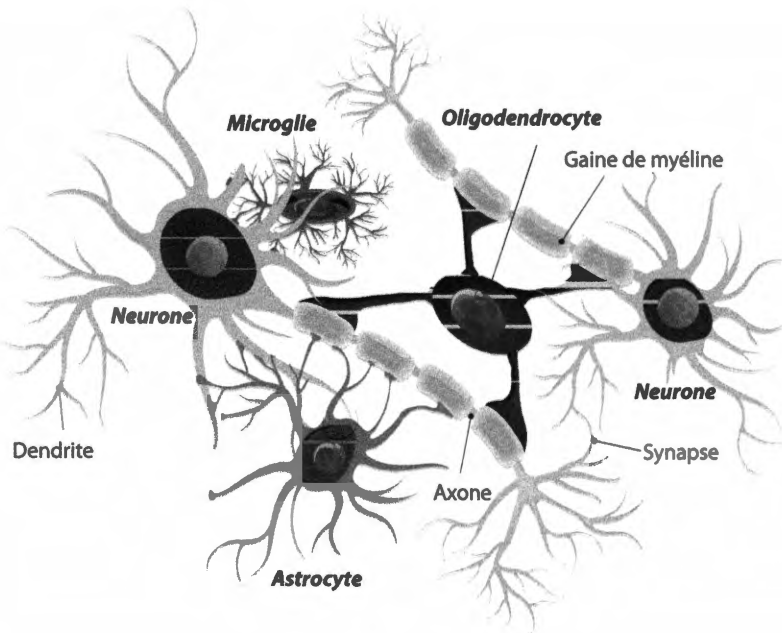
ÇA VA PAS LA TÊTE!

Quasi infranchissable, elle assure au cerveau un environnement interne très stable et le protège de composés toxiques potentiellement présents dans le sang.

Cellule: élément de base fonctionnel et structural qui compose les tissus et les organes des êtres vivants. La cellule contient un **noyau**, sorte d'enceinte de protection qui abrite, entre autres, l'ADN*. Ce noyau entouré d'une paroi percée de pores, baigne dans une sorte de liquide, le **cytoplasme**, qui contient tous les autres composants nécessaires au fonctionnement de la cellule. Le tout est délimité par une **membrane**. Le neurone* est une cellule.

Cellule de Schwann: cellule gliale* dont la principale fonction est la formation de la gaine de myéline* entourant les axones* du système nerveux périphérique*. Voir le schéma de Cellules gliales*.

Cellule gliale: cellule du système nerveux (terme qui vient de glie, glu, colle). Plus nombreuses que les neurones, les cellules gliales forment l'environnement des neurones*: elles les nourrissent et les protègent, en particulier grâce à la gaine de myéline* que certaines produisent. On distingue 4 principaux types de cellules gliales: les astrocytes*, les oligodendrocytes*, les cellules de Schwann* et la microglie*.



Neurones et cellules gliales

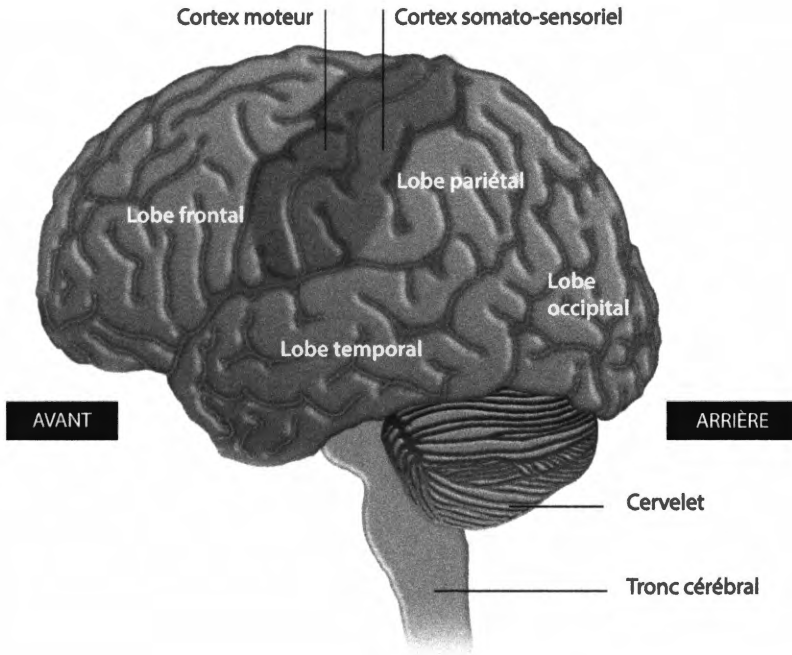
(© iStockphoto.com/itsz)

PETIT LEXIQUE À L'USAGE DU LECTEUR

Cellule nerveuse : synonyme de Neurone*.

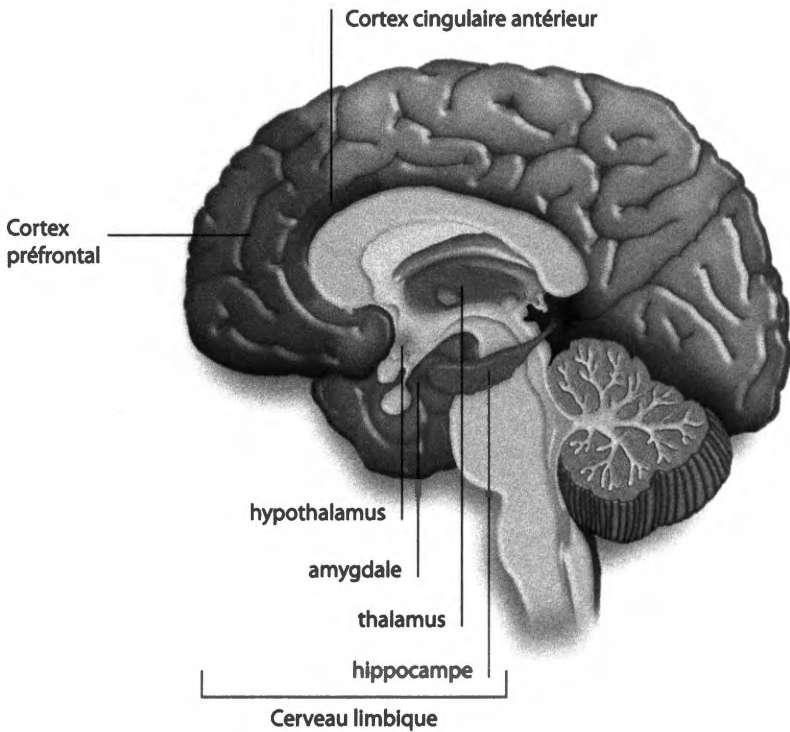
Cellule souche : cellule* capable de se différencier en d'autres types cellulaires et de se multiplier en gardant le même patrimoine génétique*.

Cerveau : c'est le « chef d'orchestre » du système nerveux central*. Protégé par la boîte crânienne, il baigne dans un milieu aqueux, le liquide céphalo-rachidien. Il comprend deux hémisphères* et un ensemble de structures sous-jacentes. On distingue dans le cerveau des zones anatomiques appelées lobes* et des zones fonctionnelles appelées aires*. Les quelque 100 milliards de neurones* qu'il comporte traitent l'ensemble des informations provenant des différentes parties de l'organisme, contrôlent la motricité volontaire et assurent les fonctions cognitives*.



Vue latérale du cerveau
(© Cerveau et Psycho)

ÇA VA PAS LA TÊTE!



Vue en coupe du cerveau
(© Cerveau et Psycho)

Cervelet : situé à l'arrière du tronc cérébral*, il intervient dans le tonus musculaire, le maintien de l'équilibre, les mouvements automatiques, la coordination des mouvements volontaires et aussi dans certaines fonctions cognitives.

Chromosome : structure constituée d'ADN* et de protéines, située dans le noyau de chaque cellule* (pour les cellules qui en possèdent). Leur nombre varie en fonction des espèces.

Circuit de la dopamine : Voir Système de récompense*.

Corps cellulaire d'un neurone : voir Neurone*.

Cortex cérébral : couche externe du cerveau*. Il est formé de deux hémisphères* sur une épaisseur de quelques millimètres. Le cortex cérébral joue un rôle essentiel dans

PETIT LEXIQUE À L'USAGE DU LECTEUR

les fonctions nerveuses de base (motricité, sensibilité, sensorialité) et dans les fonctions cognitives*. Il est parcouru de sillons qui délimitent des lobes* et comporte plusieurs aires* fonctionnelles. Synonyme: **substance grise cérébrale**. Voir le schéma du Cerveau*.

Cortex cérébral moteur: ensemble des aires* du cortex cérébral qui participent à la planification, au contrôle et à l'exécution des mouvements volontaires des muscles du corps. Voir le schéma du Cerveau*.

Cortex cérébral sensitif: ensemble des aires* du cortex cérébral qui traitent l'information en provenance des organes sensoriels. On distingue: le cortex visuel pour la vision, le cortex auditif pour l'audition, le cortex somato-sensoriel pour le toucher, le cortex olfactif pour l'olfaction et le goût. Voir le schéma du Cerveau*.

CRISP: technique qui permet modifier les génomes* à l'aide de véritables « ciseaux moléculaires ».

Dendrite: court prolongement d'un neurone* qui transporte l'influx nerveux* vers le corps cellulaire* à partir de la synapse*. Voir le schéma du Neurone*.

Dopamine: « molécule du plaisir » qui intervient dans le système de récompense*. C'est un neurotransmetteur*. Adjectif: dopaminergique.

Empan de la mémoire: nombre d'items maximum dont on peut se rappeler immédiatement après une seule présentation.

Encéphale: partie la plus volumineuse du système nerveux, qui comprend le cerveau*, le cervelet* et le tronc cérébral*.

Engramme: trace d'un événement dans le cerveau, qui constitue le support de la mémoire.

Fibre nerveuse: Synonyme d'axone*.

Fonction cognitive: les fonctions cognitives désignent l'ensemble des processus mentaux qui mettent en jeu la mémoire, le langage, le raisonnement, l'apprentissage, la prise de décision, etc. Le cortex* cérébral est le siège des fonctions cognitives.

Ganglion nerveux: amas de cellules formant un petit renflement sur le trajet des nerfs*. Il contient les corps cellulaires de neurones*.

Gène: élément d'un chromosome* constitué d'ADN*. Chaque gène correspond à un caractère héréditaire particulier et constitue donc une unité d'information génétique. Un gène est responsable de la fabrication (on dit qu'il code) d'une ou de plusieurs protéines, et donc de la manifestation d'un caractère héréditaire. Notre espèce possède environ 23 000 gènes différents.

ÇA VA PAS LA TÊTE!

Génome : ensemble des gènes* portés par les chromosomes* d'une cellule. Le génome est présent sous forme d'ADN* dans le noyau de toutes les cellules* de l'organisme. Synonyme : **patrimoine génétique**.

Hémisphère cérébral : le cerveau* est composé de deux hémisphères, droit et gauche, qui forment sa partie externe. Chaque hémisphère est lui-même divisé en zones appelées lobes*.

Hippocampe : partie du cerveau localisée dans le lobe* temporal. L'hippocampe est un des centres de la mémoire. *Voir le schéma du Cerveau**.

Hormone : molécule sécrétée par une glande, libérée dans le sang et qui agit de manière spécifique sur un ou plusieurs organes cibles afin d'en modifier le fonctionnement.

Hypophyse : petite glande qui joue un rôle fondamental dans la production des hormones*. Elle contrôle de nombreuses fonctions telles que la croissance, la puberté, la fertilité, etc. *Voir le schéma du Cerveau**.

Hypothalamus : petite glande située à la base du cerveau, au-dessus de l'hypophyse. Il régule la sécrétion de toutes les hormones* et supervise le fonctionnement de la plupart des organes. *Voir le schéma du Cerveau**.

Inflammation : ensemble de réactions engendrées par le système immunitaire* de l'organisme en réponse à une agression externe (bactéries, virus, etc.) ou interne (cellules cancéreuses par exemple). L'inflammation entraîne la sécrétion de plusieurs familles de molécules comme les cytokines ; elle touche tous les tissus, y compris le système nerveux. Si elle devient chronique, elle peut être à l'origine de maladies diverses (immunitaires, cardiovasculaires, ostéo-articulaires, etc.). Son intensité augmente au cours du vieillissement.

Influx nerveux : voir Potentiel d'action*.

Lobe : d'un point de vue anatomique, chaque hémisphère cérébral* est creusé de sillons qui délimitent des zones appelées lobes. On distingue quatre lobes externes (le lobe frontal, le lobe pariétal et le lobe temporal) et deux lobes internes (le lobe limbique et l'insula). *Voir schémas du Cerveau**.

Maladie neurodégénérative : maladie neurologique* qui s'établit progressivement et conduit à la mort des neurones*.

Maladie neurologique : maladie qui affecte le système nerveux central* ou le système nerveux périphérique*.

Mémoire épisodique : mémoire des événements particulier datés et localisés.

Mémoire procédurale : mémoire qui conserve les informations du type savoir-faire.

Mémoire de travail : mémoire à court terme permettant de stocker temporairement des informations.

PETIT LEXIQUE À L'USAGE DU LECTEUR

Mémoire sémantique: mémoire qui gère toutes les connaissances apprises.

Métabolisme: ensemble des réactions chimiques se produisant au sein des cellules* de l'organisme, et par lesquelles certaines molécules s'élaborent (anabolisme) ou sont dégradées (catabolisme). Voir aussi Voie métabolique*.

Microbiote: bactéries, champignons et virus qui constituent la flore intestinale.

Microglie: population de cellules gliales* analogues aux macrophages et présents dans le cerveau* et la moelle épinière*, formant la principale défense immunitaire du système nerveux central*.

Moelle épinière: partie du système nerveux central* qui prend naissance au niveau du tronc cérébral* pour descendre le long de la colonne vertébrale dans laquelle elle est contenue. Son rôle est de distribuer les nerfs* entre le cerveau et les différentes parties du corps.

Motoneurone: cellule nerveuse directement connectée à un muscle et qui en commande la contraction. Les motoneurones contrôlent donc les mouvements du corps. Synonyme: **neurone moteur**.

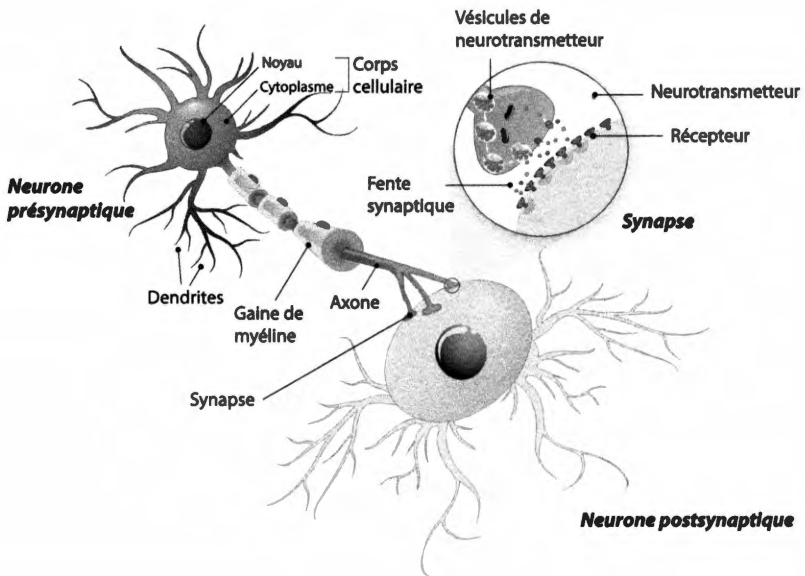
Myéline: substance qui entoure l'axone* de nombreux neurones* du système nerveux central*. Elle protège les axones* et permet une transmission plus rapide de l'influx nerveux*.

Nerf: partie du système nerveux périphérique*, composée des axones des neurones*. Les axones permettent la communication entre le système nerveux central* et le reste du corps. Les **nerfs sensitifs** (ou **nerfs afférents**) remontent l'information des organes sensoriels vers le système nerveux central. Les **nerfs moteurs** (ou **nerfs efférents**) transmettent les commandes aux organes effecteurs.

Neuroleptique: grande famille de médicaments qui agissent sur un type de récepteurs* à la dopamine*. Synonyme: **antipsychotique**.

Neurone: cellule excitable constituant l'unité fonctionnelle de base du système nerveux. Les neurones assurent la transmission d'un signal électrique appelé potentiel d'action* ou influx nerveux. Un neurone comporte trois compartiments: le **corps cellulaire** (c'est l'usine qui fait fonctionner le neurone et contient le noyau); les prolongements courts ou **dendrites** (les antennes réceptrices du neurone, qui reçoivent les informations émises par d'autres neurones); un prolongement long, l'**axone** (le pôle émetteur du neurone, en contact avec d'autres neurones). Synonyme: **cellule nerveuse**.

ÇA VA PAS LA TÊTE!



Neurones et synapses

(© iStockphoto.com/ltsz)

Neurone miroir : neurone moteur* qui s'active lorsqu'un individu réalise une action, mais également lorsqu'un de ses congénères exécute la même action.

Neurotransmetteur : molécule libérée par un neurone* au niveau d'une synapse* et agissant le plus souvent sur d'autres neurones en se fixant à un récepteur*. Il existe différents types de neurotransmetteurs (glutamate, adrénaline, dopamine*, sérotonine...), dont chacun se fixe sur le type de récepteur* qui lui est propre. Synonyme : **neuromédiateur**.

Oligodendrocyte : cellule gliale* dont la principale fonction est la formation de la gaine de myéline* entourant les axones* du système nerveux central*.

Patrimoine génétique : synonyme de génome*.

Phagocytose : mécanisme qui permet à certaines cellules du système immunitaire* d'englober puis de digérer des microbes ou d'autres éléments étrangers, ainsi que des débris de cellules. C'est un moyen de défense de l'organisme, notamment lors d'une infection bactérienne.

Plasticité cérébrale : capacité du cerveau à modifier sa structure et son fonctionnement en réaction à la diversité de l'environnement. Cette capacité est rendue possible par le

PETIT LEXIQUE À L'USAGE DU LECTEUR

remodelage des connexions (des synapses*) entre neurones*. Synonymes: **Plasticité neuronale, Plasticité synaptique, Neuroplasticité.**

Potentiel d'action: signal électrique unidirectionnel parcourant un neurone* le long de son axone* et qui provoque la libération de neurotransmetteur* au niveau d'une synapse*. Les potentiels d'action sont créés par des échanges d'ions entre l'intérieur et l'extérieur d'un neurone. Ils assurent la propagation des messages nerveux dans l'organisme. Synonyme: **influx nerveux.**

Radical libre: molécule instable d'oxygène, fabriquée par la cellule. À petites doses, les radicaux libres sont indispensables au bon fonctionnement de la cellule, mais leur excès devient toxique. Ce « stress oxydant » est considéré comme une des causes du vieillissement des tissus et à l'origine de nombreuses maladies.

Récepteur: protéine située à la surface d'une cellule et possédant une affinité particulière pour une autre molécule: par exemple, une hormone* ou un neurotransmetteur*.

Substance blanche: tissu de couleur blanchâtre qui fait partie du système nerveux central*. Située dans le cerveau*, le cervelet* et la moelle épinière*, elle est constituée des prolongements de neurones nommés axones*. Synonyme: **matière blanche.**

Substance grise: synonyme de Cortex*. On parle aussi de **matière grise.**

Synapse: espace entre deux neurones (de 20 à 40 nanomètres), qui assure la transmission de l'influx nerveux* (un signal électrique) de l'un à l'autre. Le plus souvent, la synapse transmet le signal nerveux du premier neurone (neurone présynaptique) au second neurone (neurone postsynaptique) à l'aide d'une molécule (un neurotransmetteur*): le neurotransmetteur, stocké dans le neurone présynaptique (au niveau de la terminaison de l'axone*), est libéré dans la fente synaptique au moment de l'arrivée de l'influx nerveux, et va activer ou inhiber le neurone postsynaptique (au niveau d'une dendrite* ou du corps cellulaire*). En cas d'activation, l'influx nerveux poursuit son chemin le long du second neurone et ainsi de suite. On estime qu'en moyenne un seul axone établit environ 10 000 contacts synaptiques avec d'autres neurones. *Voir le schéma du Neurone*.*

Système de récompense: système, formé d'un réseau de neurones, dont le rôle est de récompenser et provoquer du plaisir lors de la réalisation d'actions ou de comportements adaptés. Il intervient par exemple dans les comportements alimentaires, sexuels ou encore dans la prise de drogues. Le principal neurotransmetteur* émis dans le système de récompense est la dopamine, la « molécule du plaisir ». Synonymes: **Circuit de la récompense, système hédonique.**

Système immunitaire: ensemble des mécanismes de défense mis en œuvre par l'organisme pour lutter contre les agressions externes ou internes.

Système limbique: vaste zone cérébrale constituée entre autres par l'hippocampe, l'hypothalamus*, le thalamus et le striatum. *Voir le schéma du Cerveau*.*

ÇA VA PAS LA TÊTE!

Système nerveux autonome : partie du système nerveux responsable des fonctions non soumises au contrôle volontaire géré par l'encéphale*. Il régule certaines fonctions automatiques de l'organisme, comme la respiration, la digestion, les battements cardiaques, etc. Synonyme : **système nerveux végétatif**.

Système nerveux central (SNC) : partie du système nerveux formé du cerveau*, du cervelet*, du tronc cérébral* et de la moelle épinière*.

Système nerveux périphérique (SNP) : partie du système nerveux formée des ganglions* et des nerfs* (située à l'extérieur du cerveau* et de la moelle épinière*). Sa fonction principale est de faire circuler l'information entre les organes et le système nerveux central.

Télomère : fragment d'ADN située à l'extrémité d'un chromosome, qui le protège de la dégradation et dont la taille diminue à chaque division cellulaire.

Tronc cérébral : partie du système nerveux central*, située entre le cerveau* proprement dit et la moelle épinière* au-dessous. Il est traversé par les nerfs* qui quittent le cerveau (voie de la motricité) ou qui y arrivent (voie de la sensibilité).

Voie métabolique : ensemble de réactions chimiques se déroulant dans une cellule vivante et conduisant à la synthèse ou la dégradation d'une molécule donnée. Voir aussi Métabolisme*.

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	7
<i>L'avènement de l'Homme Dieu ?</i>	8
<i>Une pompe à fric</i>	10
<i>Une intelligence « post-humaine » ?</i>	12
<i>L'Homme « augmenté » ?</i>	14
<i>Vivre mille ans ?</i>	15
<i>Un cerveau réparé et guéri ?</i>	16
<i>Place à l'intelligence humaine</i>	17
Chapitre 1. L'intelligence artificielle : le Graal des transhumanistes	19
<i>Tout commence avec les premiers automates</i>	20
<i>L'arrivée des premières machines à calculer</i>	23
<i>Turing construit le premier ordinateur</i>	26
<i>Où l'on commence à espérer imiter le fonctionnement du cerveau</i> <i>humain</i>	27
<i>Les « systèmes experts » entrent en scène</i>	31
<i>Des robots et des « ordi » toujours plus forts</i>	33
<i>Des machines capables d'apprendre</i>	34
<i>S'entraîner pour apprendre</i>	38
<i>L'intelligence artificielle a envahi notre quotidien</i>	39
<i>L'arrivée des agents et réseaux intelligents</i>	43
<i>Un aimant à start-up</i>	45
<i>Les effets pervers de l'intelligence artificielle</i>	46
<i>Les fantasmes et les peurs que suscite l'intelligence artificielle</i>	49
<i>Finalement, que faut-il retenir ?</i>	52

ÇA VA PAS LA TÊTE!

Chapitre 2. Mon cerveau n'est pas une puce!	53
<i>Dans le cerveau, l'unité élémentaire est le neurone</i>	54
<i>Si affinité, les neurones établissent de nombreux contacts entre eux</i>	57
<i>Les neurones ne se renouvellent pas... sauf exceptions</i>	60
<i>Les cellules gliales s'invitent au dialogue</i>	65
<i>La diversité de communication entre les neurones est infinie</i>	69
<i>Tous les neurones ne sont pas situés dans le cerveau</i>	72
<i>Le cerveau interagit en permanence avec son environnement</i>	75
<i>Le cerveau se remodèle durant toute la vie!</i>	78
<i>Peut-on modéliser le fonctionnement du cerveau?</i>	81
<i>Le cerveau ne se construit pas comme un ordinateur</i>	85
<i>Ordinateur et cerveau... À chacun ses performances</i>	87
<i>Finalement, que faut-il retenir?</i>	91
Chapitre 3. Mon cerveau est unique	93
<i>Pas de conscience de soi sans mémoire</i>	94
<i>Pas d'apprentissage sans mémoire... et vice versa</i>	96
<i>Une mémoire ou des mémoires?</i>	98
<i>La plus simple des mémoires</i>	101
<i>Des mémoires fugaces</i>	103
<i>De la mémoire à court terme à la mémoire à long terme</i>	106
<i>Les émotions chamboulent tout!</i>	108
<i>Des informations codées, stockées, puis récupérées</i>	111
<i>Heureusement on oublie!</i>	115
<i>Mais où sont donc cachées les mémoires?</i>	117
<i>Et revoilà la plasticité cérébrale!</i>	121
<i>Et la conscience dans tout ça?</i>	127
<i>Conscience de soi et conscience de l'autre dans l'imaginaire transhumaniste</i>	132
<i>Alors, l'Homme augmenté, c'est pour quand et pour qui?</i>	135
<i>Notre singularité n'est pas reproductible dans une machine</i>	138
<i>Finalement, que faut-il retenir?</i>	141
Chapitre 4. L'Homme préservé, oui mais combien de temps?	143
<i>Y a-t-il une limite à l'espérance de vie?</i>	144
<i>Pister les mystères de la longévité</i>	146
<i>À la recherche de l'élixir de jeunesse</i>	152
<i>Ralentir le vieillissement... pour vivre vieux et en bonne santé</i>	157
<i>«T'as mal où?»</i>	159
<i>Le cerveau aussi vieillit</i>	162

TABLE DES MATIÈRES

<i>Quand le corps va mal, le cerveau peut souffrir beaucoup</i>	165
<i>Au très grand âge, les choses se gâtent</i>	166
<i>Les ordinateurs également vieillissent</i>	167
<i>Bien vieillir, que faut-il faire ? L'Homme préservé</i>	169
<i>Finalement, que faut-il retenir ?</i>	176
Chapitre 5. Pour l'instant, on soigne mais on ne guérit pas	177
<i>Des maladies du cerveau excessivement variées et complexes</i>	178
<i>Certaines pathologies neurologiques résultent d'un accident</i>	180
<i>Pour d'autres pathologies, l'origine est génétique</i>	182
<i>Lorsque l'activité électrique du cerveau se dérègle, c'est la crise !</i>	184
<i>Quand l'inflammation s'en mêle, tout va mal</i>	185
<i>Quand le cerveau vieillit, apparaissent les maladies neurodégénératives</i>	187
<i>Maladies psychiatriques et troubles du comportement, la liste est longue !</i>	190
<i>La chirurgie reste exceptionnelle</i>	192
<i>Les « outils » les plus communément utilisés sont les médicaments</i>	194
<i>On accompagne le patient : la remédiation cognitive</i>	199
<i>Où l'on retrouve l'Homme réparé</i>	202
<i>Agir au niveau des gènes</i>	203
<i>Les cellules souches ou la médecine régénérative</i>	205
<i>Les modèles animaux : indispensables</i>	209
<i>La parabiose, une solution d'avenir ?</i>	211
<i>Et l'intelligence artificielle dans tout ça ?</i>	213
<i>Finalement, que faut-il retenir ?</i>	216
Épilogue. Le transhumanisme : une coquille vide !	219
Petit lexique à l'usage du lecteur	227



Imprimé en France par SEPEC numérique à Péronnas
N° d'imprimeur : N17932180122 – Dépôt légal : mars 2018
N° d'édition : 41000349-01

LA TÊTE! CA VA PAS

Cerveau, immortalité et intelligence artificielle, l'imposture du transhumanisme

Depuis quelques années, un mouvement d'idées venu des États-Unis, qualifié de « Révolution transhumaniste », a pris un essor considérable. Demain, on vivra 200 ou 300 ans... et bien sûr en parfaite santé : l'immortalité n'est pas loin ! Ces prophéties s'appuient sur les avancées réelles de l'intelligence artificielle et de la recherche en biologie, en particulier dans le domaine du vieillissement, passant ainsi allègrement de l'homme préservé et/ou augmenté à un véritable homme dieu. Mais dès que l'on s'intéresse au cerveau, les données, particulièrement complexes, ne vont pas dans leur sens. Il existe une contradiction criante entre la jeunesse éternelle promise et la réalité actuelle, marquée en particulier par les échecs thérapeutiques répétés dans les maladies neuro-dégénératives.

Forts de leur expérience et de leur autorité dans le domaine des neurosciences et du vieillissement, Danièle Tritsch et Jean Mariani dénoncent l'imposture du transhumanisme et ses excès ou délires, données scientifiques à l'appui. De façon accessible et vivante, avec de nombreux exemples de la vie quotidienne, ils démontrent que les efforts lents et soutenus de la recherche biologique et médicale – auxquels contribuera l'intelligence artificielle – restent la seule voie pour comprendre le fonctionnement du cerveau, le maintenir en bonne santé (cerveau préservé), le doter de capacités nouvelles (cerveau augmenté) et, dans un délai non prévisible, guérir ou stabiliser les maladies neurodégénératives (cerveau réparé). L'homme dieu, quant à lui, ne s'appuie sur rien de tangible.

Professeurs d'Université, **Danièle Tritsch** et **Jean Mariani** ont créé et dirigé un grand laboratoire de recherche et exercé de nombreuses responsabilités à l'Université Pierre-et-Marie Curie, au CNRS, à la Région Île-de-France et au ministère de la Recherche. Danièle Tritsch est auteur d'ouvrages de vulgarisation à destination des étudiants. Médecin et praticien hospitalier, Jean Mariani est directeur de l'Institut de la Longévité.