

Certaines espèces réagissent lentement, ce qui est très bien quand le climat se réchauffe de quelques degrés en quelques millions d'années. Cependant, si la température grimpe de plusieurs degrés en quelques décennies, comme de nombreux modèles en prédisent la possibilité, des espèces risquent de ne pas avoir le temps de se réimplanter dans des habitats plus appropriés. Ou ces habitats pourraient avoir disparu.

Prenons le manchot des Galápagos. Ce petit oiseau prospère sous le soleil équatorial, mais ses effectifs chutent de façon importante lors des fortes années El Niño. Durant de telles années, les courants de l'océan Pacifique sont perturbés et les eaux froides, riches en nourriture, qui entourent habituellement ces îles, sont remplacées par des eaux plus chaudes, pauvres en nutriments. Comme ces manchots ne s'éloignent jamais de l'archipel, ils n'auront nulle part où aller si le réchauffement rend les îles Galápagos trop chaudes pour qu'ils puissent élever leurs petits ou se nourrir.

Les manchots empereurs, quant à eux, sont confrontés à un autre défi. Ces oiseaux

peuvent ne jamais poser le pied sur la terre sèche, car ils se reproduisent sur d'épaisses couches de glace de mer. Si la glace fond trop tôt dans l'année, les colonies qui n'ont pas achevé leur cycle de reproduction risquent d'être détruites. La fidélité de ces manchots à leur colonie amplifie le danger ; année après année, de nombreux individus reviennent exactement au même endroit pour se reproduire. Ce comportement est si profondément enraciné que le simple déplacement vers une autre parcelle de glace pourrait perturber le cycle.

En tant que paléontologues, nous sommes de plus en plus conscients de la fragilité des manchots actuels. Aujourd'hui, les manchots présentent moins de variété dans leur morphologie et ils comptent moins d'espèces qu'il y a des millions d'années. Bien que les biologistes les considèrent comme des oiseaux modernes, les manchots demeurent, sous bien des aspects, les survivants d'une longue dynastie qui a fourni certains des animaux les plus intéressants qui aient jamais peuplé les terres et les mers. Leur disparition serait une tragédie. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

D. Ksepka *et al.*, New fossil penguins (Aves, Sphenisciformes) from the Oligocene of New Zealand reveal the skeletal plan of stem penguins, *J. of Vert. Paleo.*, vol. 32, pp. 235-254, 2012.

D. Thomas *et al.*, Penguin heat-retention structures evolved in a greenhouse Earth, *Biology Letters*, vol. 7, pp. 461-464, 2011.

J. Clarke *et al.*, Fossil evidence for evolution of the shape and color of penguin feathers, *Scienceexpress*, 10.1126/science.1193604, 2010.

■ SUR LE WEB

La marche des manchots fossiles (blog) : fossilpenguins.wordpress.com.

Photos de manchots : ScientificAmerican.com/nov2012/penguins



LES { Partagez les savoirs }

RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

Détails sur jardindesplantes.net, dans "l'agenda du jardin"

FILMS Cycle : "Sciences naturelles et cinéma, les pionniers"

Th. Lefebvre, historien des médias, du cinéma et des sciences médicales. Université Paris Diderot.
Dimanche 17 mars – 15h30
Présence de l'homme : naturalistes, apiculteurs et botanistes
 6 films : Coll. *M. Sandberg*, Cinémathèque Robert Lynen.
Samedi 30 mars – 15h30
La mouche entre émerveillement et répulsion
 2 films de *J. Comandon*, Coll. Archives Française du Film et 1 film de *P. Thévenard*.
 Coll. Institut du Cinéma Scientifique.

MÉTIER DU MUSÉUM

Dimanche 24 mars – 15h : Biologiste du développement, *Giovani Levi*

CONFÉRENCES Cycle : "Les collections du Muséum"

Lundi 25 mars – 18h
La collection de minéralogie du Muséum : l'histoire d'une science
C. Ferraris, maître de conférences, chargé de la collection de minéralogie, dép. Histoire de la Terre, Muséum.

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution — 36 rue Geoffroy St-Hilaire

COURS PUBLICS Cycle : "De la génétique à l'épigénétique"

C. Lavelle, chercheur au CNRS, laboratoire de Régulation et Dynamique des Génomés, Muséum.
Dimanche 21 mars – 18h : Histoire des idées
Judi 28 mars – 18h : Voyage au cœur de nos cellules

Grand Amphithéâtre du Muséum — 57 rue Cuvier

BAR DES SCIENCES

Mercredi 27 mars – 19h30 : Les migrations animales
J.-B. Charrassin, océanographe, maître de conférence, Muséum ; *J.-Ph. Siblet*, directeur du Service du patrimoine naturel, Muséum ; *M. Zucca*, écrivain et ornithologue.

Restaurant de la Baleine — 47 rue Cuvier

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

Évolution [35]

HUMAN BRAIN PROJECT : simuler le cerveau humain

Henry Markram

L'Union européenne vient de désigner le *Human Brain Project* comme l'un de ses deux programmes phares de recherche de la décennie à venir. Il s'agit de simuler par ordinateur un cerveau humain complet, projet grâce auquel les neurosciences pourraient progresser à pas de géant.



Il est temps de changer notre manière d'étudier le cerveau. La biologie réductionniste, qui consiste à étudier indépendamment les sous-parties d'un système, nous a déjà permis d'aller assez loin dans l'étude du cerveau. Cependant, elle ne peut pas expliquer à elle seule tous les mécanismes de fonctionnement de cet extraordinaire organe. Pour explorer le cerveau et mieux le comprendre, nous avons besoin d'une nouvelle approche qui associe l'analyse et la synthèse. Le philosophe René Descartes, père du réductionnisme, a lui-même décrit en son temps cette nécessité d'étudier les parties, puis de les rassembler afin de reconstruire le tout.

Telle est la démarche adoptée pour le *Human Brain Project* (projet Cerveau humain, ou HBP), dont l'objectif est de réaliser une simulation numérique complète

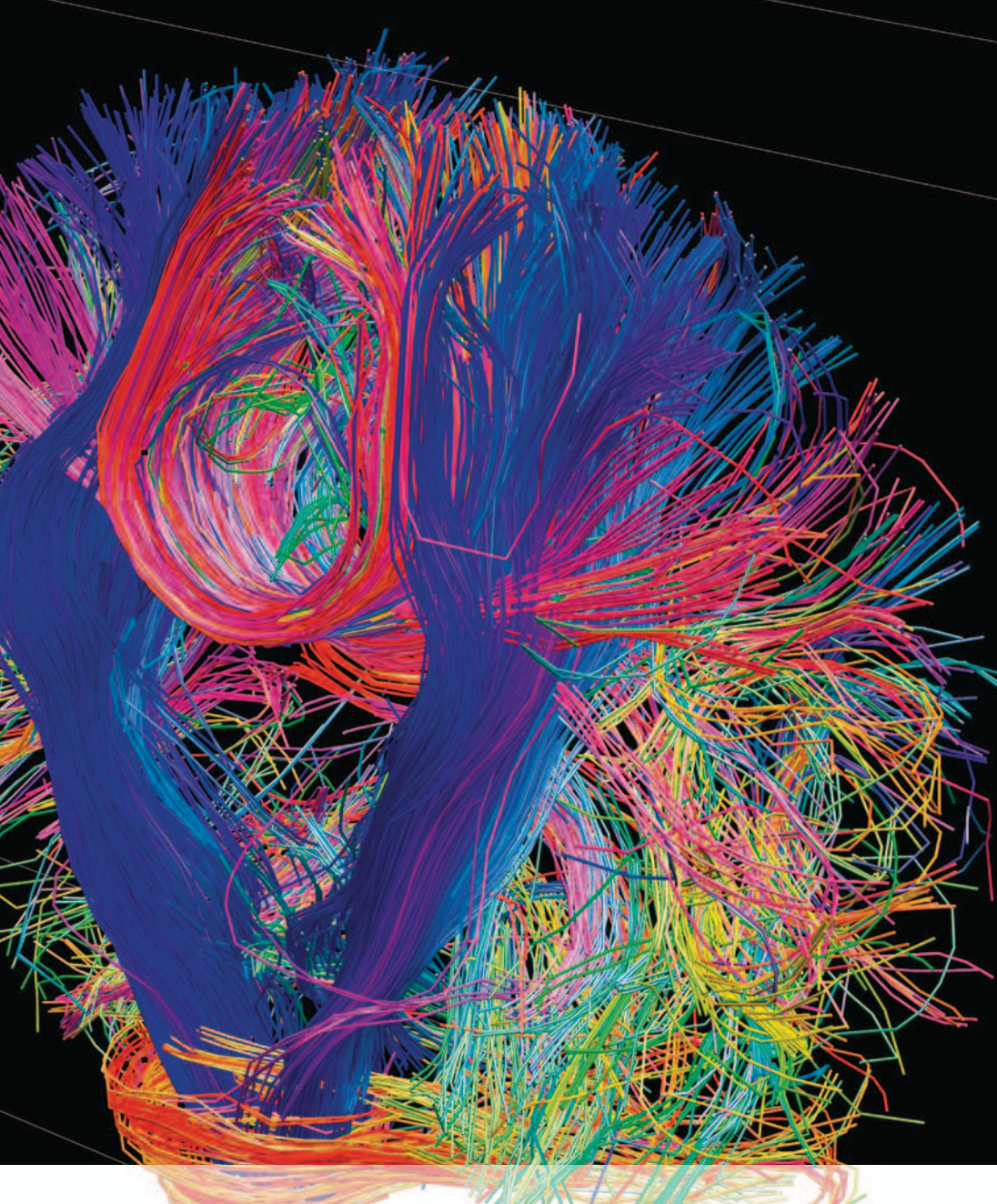
du cerveau humain. On peut comparer la construction de ce fantastique outil scientifique à la mise au point d'un simulateur de vol le plus puissant jamais construit. Mais au lieu de simuler un vol en plein air, le voyage s'effectuera dans le cerveau. Ce « cerveau virtuel » fonctionnera à l'aide de supercalculateurs et incorporera les résultats les plus récents des recherches en neurosciences.

Ce « simulateur » de cerveau constituera un grand équipement au service de toute la communauté scientifique. Comme ils le font avec les très grands télescopes, les chercheurs y réserveront des créneaux de temps d'utilisation afin de mener leurs expériences. Ils s'en serviront, par exemple, pour tester des hypothèses sur le fonctionnement normal ou pathologique du cerveau, pour mettre au point de nouveaux tests de dépistage ou de nouvelles thérapies pour

lutter contre la dépression, l'épilepsie ou encore la maladie d'Alzheimer. Les schémas de connexion des dizaines de milliers de milliards de neurones du simulateur constitueront aussi une source d'inspiration pour concevoir des ordinateurs opérant comme des cerveaux, voire des robots intelligents. En bref, le projet Cerveau humain devrait ouvrir de nouveaux horizons dans les neurosciences, la médecine et les technologies de l'information.

Un modèle évolutif

Les scientifiques pourraient effectuer les premières simulations de cerveau humain avant 2020. Pour mettre au point le simulateur, nul besoin que tous les mystères du cerveau soient dissipés dès le début. Au contraire, il fournira une structure contenant ce que nous savons, tout en nous



L'ESSENTIEL

■ Grâce à un projet visant à simuler l'intégralité d'un cerveau, on pourra modéliser de façon plus réaliste le fonctionnement du cerveau humain.

■ Vers 2020, les ordinateurs permettront peut-être de représenter les mécanismes biologiques à l'œuvre au sein d'un neurone et dans l'ensemble du cerveau.

■ La simulation du cerveau humain aidera aussi à mieux comprendre des maladies telles que l'autisme ou l'épilepsie, et permettra de réaliser des essais thérapeutiques virtuels.

Arthur W. Toga (Laboratoire de neuro-imagerie, UCLA), et Randy Buckner (Centre Martinos d'imagerie biomédicale, Hôpital général du Massachusetts) (www.humanconnectomeproject.org)

permettant de faire des prévisions sur ce que nous ignorons encore. Il nous aidera à planifier nos expériences futures afin de nous épargner des efforts inutiles. Les nouvelles découvertes y seront intégrées au fur et à mesure et rejoindront celles dont nous disposons déjà. Les lacunes du modèle seront ainsi progressivement comblées à l'aide d'éléments de plus en plus proches de la réalité.

Ce simulateur fera avancer la recherche fondamentale en neurosciences, mais il sera aussi utile dans le domaine médical. Rien qu'en Europe, les maladies cérébrales touchent 180 millions d'individus, c'est-à-dire à peu près une personne sur trois. Et ce chiffre est appelé à augmenter en raison du vieillissement de la population. Pourtant, l'industrie pharmaceutique n'investit pas assez dans de nouveaux traitements des maladies du cerveau.

Un modèle global du cerveau aiderait à mieux caractériser les mécanismes biologiques de ces maladies plutôt que de les considérer simplement comme des ensembles de symptômes. Cette vision plus large favoriserait le développement d'une nouvelle génération de traitements, qui cibleraient les anomalies cérébrales à l'origine des troubles observés.

Une autre raison pour laquelle nous avons besoin de ce simulateur est liée à l'informatique, qui va prochainement atteindre ses limites technologiques. Bien des tâches que les animaux exécutent sans efforts, telles que la reconnaissance visuelle ou l'anticipation d'événements, ne sont que péniblement accomplies par les ordinateurs, en dépit des progrès considérables déjà réalisés.

En outre, plus les ordinateurs sont puissants, plus ils sont gourmands en éner-

gie, et viendra le jour où il ne sera plus possible de satisfaire cette demande. La performance des supercalculateurs actuels se mesure en pétaflops – un million de milliards d'opérations par seconde. La prochaine génération, attendue autour de 2020, sera 1 000 fois plus rapide et se mesurera en exaflops (un milliard de milliards d'opérations par seconde). La première machine à cette échelle de puissance consommera de l'ordre de 20 mégawatts, à peu près la quantité d'énergie dépensée par une petite ville en hiver. Pour créer des ordinateurs plus puissants, capables d'effectuer comme les humains certaines tâches simples et utiles, tout en faisant

1. L'ARCHITECTURE FORMÉE par les fibres de la substance blanche du cerveau humain est révélée par la technique d'IRM (imagerie par résonance magnétique) de diffusion.

■ L'AUTEUR



Henry MARKRAM dirige le projet *Blue Brain* à l'École polytechnique fédérale

de Lausanne, en Suisse. Il coordonne aussi le projet Cerveau humain (*Human Brain Project*) que vient de sélectionner la Commission européenne.

preuve d'efficacité énergétique, il nous faut une stratégie radicalement nouvelle.

Pour ce faire, nous avons intérêt à nous inspirer du cerveau humain. Ce dernier assure d'innombrables fonctions en ne consommant qu'une vingtaine de watts à peine – soit la puissance d'une petite ampoule électrique, un million de fois inférieure à celle d'un ordinateur fonctionnant à l'échelle de l'exaflops. Nous devons donc comprendre les multiples niveaux d'organisation du cerveau, des gènes jusqu'aux aires cérébrales et au-delà. C'est ce que nous voulons faire en développant notre simulateur.

Certains considèrent que la modélisation du cerveau humain est un objectif hors d'atteinte. L'une de leurs principales objections consiste à dire qu'il est impossible de reproduire ce réseau de 100 000 milliards de connexions nerveuses, puisqu'il n'a jamais été complètement caractérisé. En cela, ils ont raison et c'est pourquoi nous ne le ferons pas. Nous ne définirons pas *a priori* la topologie des connexions dans notre modèle. Notre approche est de tenter de reproduire l'ensemble des règles qui sont à l'œuvre lors du développement embryonnaire du cerveau. En théorie, ces règles contiennent toute l'information nécessaire pour construire un cerveau numérique. La complexité engendrée par ces règles a de quoi décourager. Nous préférons donc implémenter ces règles dans nos simulations, et les laisser reconstruire un cerveau *in silico* (en référence au silicium des composants électroniques) comme elles le font *in vivo*.

Les règles de développement du système nerveux reposent surtout sur nos gènes. Elles régissent la formation des différents types de cellules du cerveau ainsi que leur répartition et leurs connexions. Nous avons déjà mis en œuvre quelques-unes de ces règles lorsque nous avons jeté les bases du projet *Human Brain*. Tout a débuté il y a presque 20 ans. Nous avons commencé par évaluer les caractéristiques des différents types de neurones. Nous avons collecté de grandes quantités de données sur leurs tailles, leurs formes, le nombre de leurs axones et dendrites, et nous avons reconstruit numériquement des centaines de neurones en trois dimensions. À l'aide d'une technique nommée « patch-clamp », qui consiste à mesurer les courants qui traversent la membrane d'une cellule, nous avons aussi enregistré l'activité électrique des neurones.

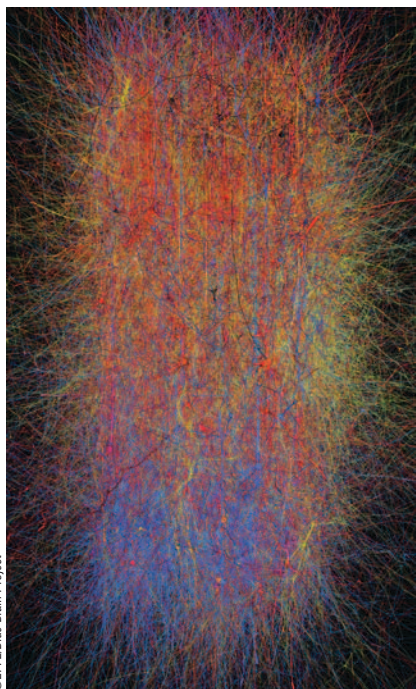
En 2005, pour modéliser un seul neurone, il fallait un ordinateur puissant et trois années de travail d'un doctorant. Il était cependant évident que des objectifs plus ambitieux allaient bientôt être atteints et que nous pourrions modéliser des circuits cérébraux complexes, impliquant de nombreux neurones, même si nos connaissances dans ce domaine restaient incomplètes. Nous avons alors lancé le projet *Blue Brain*, prédécesseur du projet *Human Brain*. Nous allions construire des « modèles informatiques unifiés », c'est-à-dire des modèles qui intègrent toutes les données et hypothèses existantes sur un circuit neuronal donné, tout en éliminant les données aberrantes et en repérant où il manque des informations.

Un modèle unifié d'une colonne corticale

Pour tester la démarche, nous avons entrepris de construire un modèle unifié d'une structure cérébrale nommée colonne corticale. Schématiquement, c'est ce que l'on obtiendrait en enfonceant un minuscule emporte-pièce dans le cortex et en retirant un cylindre de tissus d'environ un demi-millimètre de diamètre et de 1,5 millimètre de longueur. À l'intérieur de cette minicarotte de tissu, on trouverait un réseau extrêmement dense constitué de quelques dizaines de milliers de cellules.

En quelque sorte, une colonne corticale est au cerveau ce qu'un microprocesseur est à un ordinateur portable. Ces structures cérébrales sont tellement efficaces pour traiter les informations transmises par nos sens que, au cours de l'évolution, elles se sont multipliées dans le cerveau, jusqu'à ce qu'il ne reste plus d'espace libre dans la boîte crânienne. Le cortex a même dû se replier sur lui-même pour gagner de la place – d'où les circonvolutions caractéristiques du cerveau humain.

Une colonne corticale se compose de quelques centaines de types de neurones répartis en six couches distinctes. Les connexions neuronales entre la colonne et le reste du cerveau sont organisées différemment dans chaque couche. À l'aide de notre supercalculateur *Blue Gene* d'IBM, nous avons intégré les informations disponibles sur l'organisation de tous ces types de neurones dans chaque couche, jusqu'à pouvoir décrire une colonne corticale de rat nouveau-né. Nous avons aussi



©EPFL Blue Brain Project

2. SIMULATION D'UNE COLONNE CORTICALE – un groupe de neurones – dans le cadre du projet *Blue Brain* mené à l'École polytechnique fédérale de Lausanne. On observe ici l'intégralité de cette unité fonctionnelle.