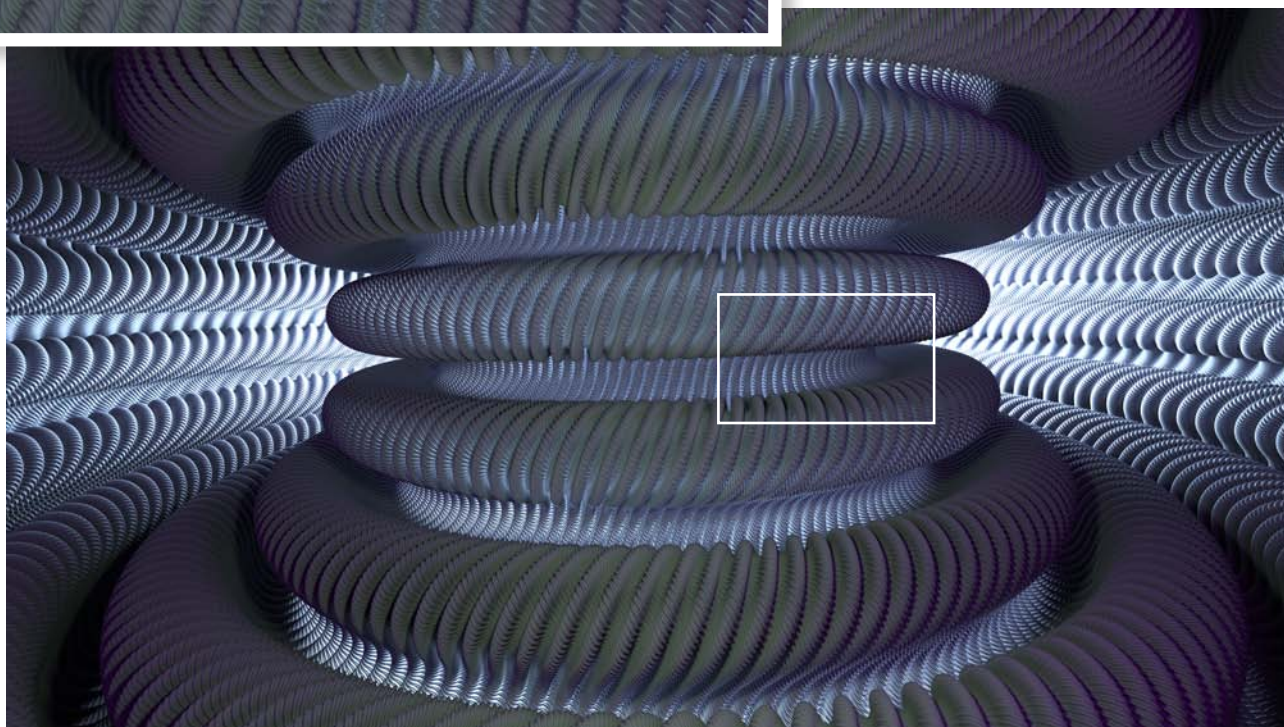




5. LE PLONGEMENT ISOMÉTRIQUE du tore carré plat dans l'espace euclidien à trois dimensions est possible, à condition de relâcher un peu les contraintes de régularité. On obtient ainsi une surface, ici vue de l'intérieur, qui a une infinité de corrugations de plus en plus petites, comme l'illustre l'agrandissement.



pour que toutes les longueurs mesurées à sa surface soient trop courtes par rapport à leurs analogues sur le tore carré plat. Par exemple, la longueur des latitudes sur la bouée est plus courte que celle des horizontales correspondantes sur le tore carré plat.

Des corrugations à toutes les échelles

Pour corriger ce défaut, le programme crée des ondulations le long des latitudes qui accroissent leur longueur. Ces ondulations, nommées corrugations, sont les «petits contournements» qui témoignent de l'usage de l'intégration convexe. Elles sont appliquées dans différentes directions afin d'augmenter toutes les longueurs. Au cours du procédé, l'amplitude des corrugations diminue, tandis que leur fréquence augmente (voir la figure 4). Le tout est précisément calculé pour réduire continuellement

le défaut isométrique et obtenir à la limite un plongement isométrique. Bien sûr, le programme ne peut effectuer qu'un nombre fini de tâches et, dans la pratique, il suffit de l'arrêter après quatre étapes pour que le résultat visuel soit satisfaisant.

L'image obtenue est surprenante (voir les figures 1 et 5) : elle révèle une surface qui ressemble à s'y méprendre à une fractale, c'est-à-dire à un objet infiniment fracturé quelle que soit l'échelle à laquelle on l'observe. Toutefois, cette ressemblance n'est pas totale. En effet, le plongement isométrique est infiniment ondulé plutôt qu'infiniment fracturé. Où que se pose le regard, aucune brisure ou arête n'apparaît ; les fractures ont été remplacées par des corrugations. L'objet obtenu n'est donc pas tout à fait une fractale, ni une surface au sens ordinaire. Situé à la frontière entre les deux, il permet de résoudre le paradoxe posé par les surfaces de Nash-Kuiper en conciliant

lissité et rugosité. Nous l'avons qualifié de fractale C^1 , ou fractale lisse.

Après le tore carré plat, nous pouvons dorénavant espérer visualiser les plongements isométriques dans l'espace tridimensionnel d'autres surfaces riemanniennes. On pense notamment au «disque de Poincaré», un exemple célèbre de géométrie non euclidienne sur le plan. De telles visualisations feront sans doute apparaître des structures analogues à celle obtenue avec le tore carré plat, c'est-à-dire des fractales C^1 .

Les fractales lisses, chaînon manquant entre les fractales et les surfaces ordinaires, vont probablement surgir dans d'autres questions mathématiques. Ces structures joueront-elles également un rôle en physique, en chimie ou dans les sciences du vivant ? Il est fort probable que certaines des structures fractales déjà observées dans le monde physique sont en réalité des fractales C^1 ... et que l'on en découvrira d'autres. ■



Évolution

Le plus étrange des oiseaux

Ewan Fordyce et Daniel Ksepka

L'ESSENTIEL

- Les manchots ne peuvent voler, mais ils sont d'excellents nageurs et plongeurs. On cherche à savoir comment ils ont développé de telles caractéristiques et comment certains se sont adaptés aux froids extrêmes.
- Des fossiles récemment découverts permettent de reconstituer leur évolution, révélant que certains traits se sont développés sous un climat chaud.
- Bien qu'ils aient survécu à 60 millions d'années de changements climatiques, les manchots risquent de succomber au réchauffement actuel.

Novembre en Antarctique. La débâcle estivale de la banquise a commencé. Bientôt les manchots empereurs iront pêcher. Ils passeront l'été à glisser dans l'océan Austral glacial, plongeant à des profondeurs de plus de 300 mètres à la recherche de poissons, de calmars et de krill pour se gaver avant d'entreprendre leur longue et pénible migration hivernale vers les terres où ils se reproduiront. Pour se reposer ou lorsque vient le temps de regagner leur colonie, ils se lancent hors de l'eau pour revenir sur la glace. Ce bref moment entre la mer et la glace est le seul instant où les manchots ressentent ce qui va de soi pour la plupart des oiseaux : être en suspension dans l'air.

que les chances des manchots de survivre face au réchauffement climatique actuel sont minces. La biologie et la répartition géographique de ces oiseaux traduisent une interaction complexe de la dérive des continents, du changement climatique et de la sélection naturelle au cours de dizaines de millions d'années – ce qui rend les manchots vulnérables.

Les paléontologues connaissent des manchots fossiles depuis plus de 150 ans, mais les premiers restes découverts n'étaient que de petits fragments fournissant peu d'informations sur les oiseaux dont ils provenaient. Le tout premier fossile de manchot identifié était un os unique découvert dans le calcaire de Nouvelle-Zélande

L'étonnante adaptation des manchots à des conditions extrêmes est le fruit d'une lente évolution, qui se déroule depuis plus de 60 millions d'années.

De fait, les manchots empereurs et les autres manchots sont des oiseaux bizarres. Comme tous les oiseaux, ils ont des plumes, des ailes et un bec, et ils pondent des œufs. Mais une série de caractéristiques les distinguent de leurs compagnons à plumes. Au fil de l'évolution, leurs ailes se sont transformées en nageoires. Leur « smoking » les camoufle des prédateurs : lorsqu'ils nagent, leur dos noir vu de dessus se confond avec le fond de la mer, et leur ventre blanc, vu de dessous, se confond avec la surface. Leurs os très denses facilitent le plongeon en fournissant du lest ; leurs pattes, courtes et épaisses, dirigent leur corps sous l'eau et leur confèrent ce dandinement amusant lorsqu'ils marchent sur terre. Grâce à ces caractéristiques et à d'autres, les manchots sont des maîtres du monde marin, et certains de leurs représentants – dont les manchots empereurs – ont conquis l'un des environnements les plus extrêmes de la planète.

Depuis longtemps, les paléontologues s'interrogent sur l'origine de ces oiseaux et sur la façon dont ils se sont répandus dans tout l'hémisphère Sud. Les découvertes de fossiles faites au cours de la dernière décennie nous ont aidés à reconstituer l'évolution des manchots. Il s'avère que nombre de leurs spécificités sont apparues dans des conditions bien plus douces que les grands froids auxquels on associe les manchots. Cette histoire évolutive suggère

par un Maori. Ce fossile arriva dans les mains du paléontologue anglais Thomas Huxley (1825-1895). Huxley identifia ce reste comme l'astragale (un os du pied) d'un manchot disparu plus grand que le manchot empereur, la plus imposante des espèces actuelles avec une taille de près de un mètre et une masse de 40 kilogrammes. Il surnomma ce manchot fossile *Palaeudyptes antarcticus*, qui signifie « ancien bon plongeur du Sud ». Dans les décennies suivantes, d'autres restes de manchots géants ont été mis au jour en Nouvelle-Zélande et au-delà. Mais, comme l'astragale identifié par Huxley, ils étaient tous fragmentaires et difficiles à interpréter.

Des fossiles vieux de 62 millions d'années

L'enregistrement fossile des manchots s'améliora à la fin des années 1970 lorsque l'un de nous (Ewan Fordyce) trouva par hasard un os de patte brisé, dépassant d'une falaise de grès près de Waimate au Sud de la Nouvelle-Zélande. En fracturant par petites touches la roche environnante, E. Fordyce découvrit d'autres os d'un grand manchot qui avait vécu il y a 27 millions d'années. Ce squelette partiel fournissait de nouveaux indices sur l'anatomie des anciens manchots, mais il était encore trop dégradé pour révéler leurs origines. Ce n'est que dans les années 1980



Frans Lanting

et 1990 que des fossiles exploitables furent découverts : plusieurs spécimens, retrouvés dans la région de Walpara en Nouvelle-Zélande, ont révélé les tout premiers stades connus à ce jour de l'évolution des manchots. Ces restes, qui datent de 62 à 58 millions d'années, suggèrent que les premiers manchots ressemblaient à des cormorans, avec leur long bec effilé et leurs ailes flexibles. Cependant, un examen plus approfondi révèle qu'ils présentaient des traits typiques des manchots. Par exemple, les os supérieurs de leurs ailes étaient plats et larges comme ceux des manchots actuels ; leur astragale était court et large, et leurs os, dans leur ensemble, étaient plus denses que ceux des oiseaux volants.

Après avoir analysé ces fossiles de protomanchots, E. Fordyce et ses collègues les classèrent dans deux espèces d'un nouveau genre, *Waimanu* (« oiseau d'eau » en maori). La plus grande de ces deux espèces, *Waimanu manneringi*, avait une taille approchant celle du manchot empereur, soit plus de 0,9 mètre, tandis que l'autre, *Waimanu tuatahi*, mesurait probablement environ 0,75 mètre, soit un peu plus que le manchot à œil jaune actuel. Aucune de ces espèces ne semble avoir été capable de voler – en revanche, toutes deux excellaient dans la propulsion sous l'eau.

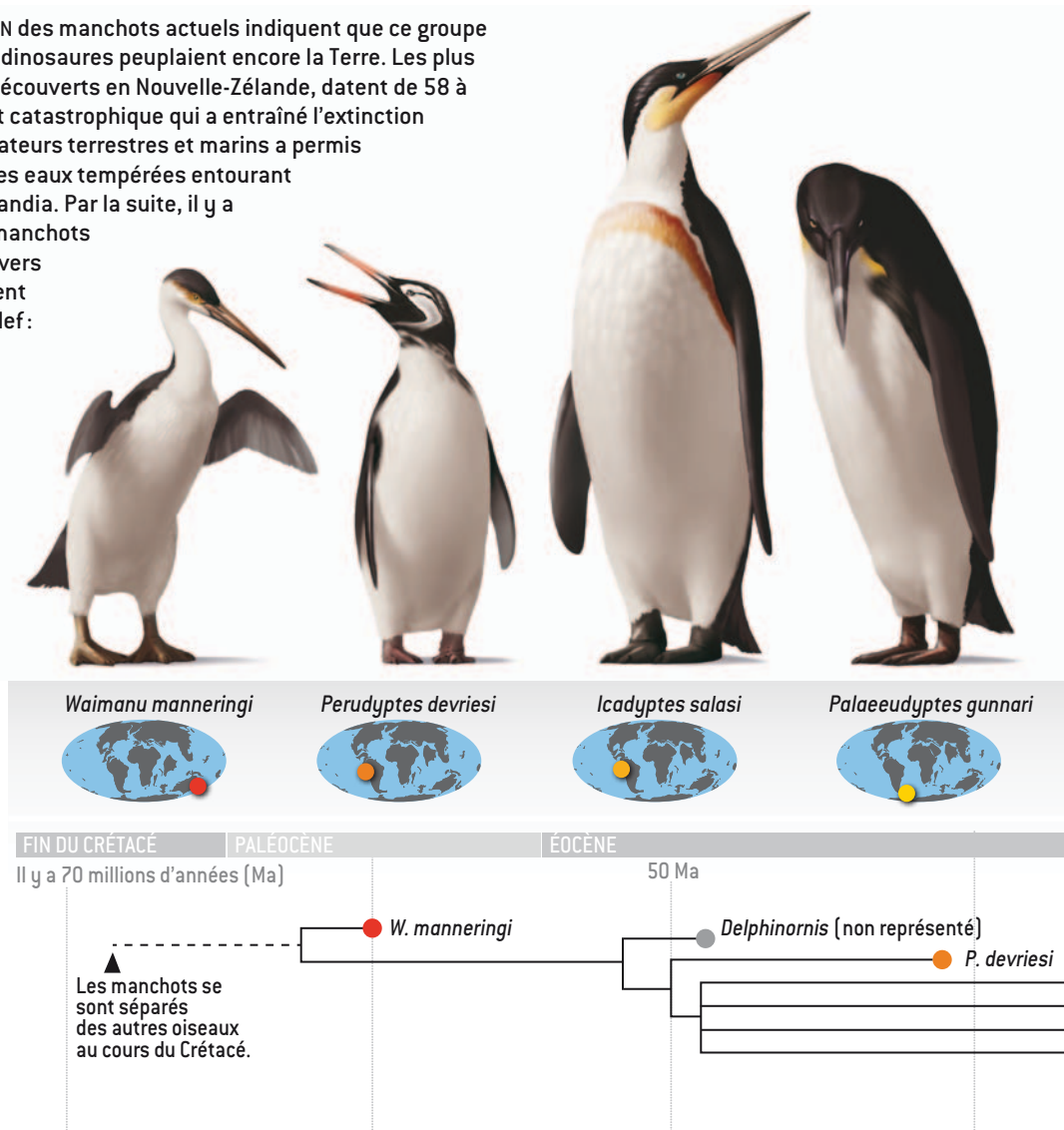
Ces deux spécimens sont les manchots les plus anciens et les plus archaïques connus. Ils sont aussi parmi les plus anciens

représentants des oiseaux actuels. Ces manchots ont vécu peu après l'événement catastrophique qui a mis fin au Crétacé, il y a 65 millions d'années, et qui a condamné les dinosaures et de nombreux autres animaux.

Selon certains experts, cet événement aurait éliminé presque tous les oiseaux, hormis une poignée de lignées. Un tel scénario impliquerait que la lignée des manchots et d'autres lignées d'oiseaux modernes ont évolué rapidement, dans les quelques millions d'années qui ont suivi l'extinction de masse, à partir d'une unique souche ancestrale. L'étude des fossiles et l'analyse génétique des oiseaux actuels nous font pencher pour une autre explication : de nombreuses lignées d'oiseaux

UNE LONGUE HISTOIRE ÉVOLUTIVE

Les fossiles et les analyses de l'ADN des manchots actuels indiquent que ce groupe d'oiseaux est apparu alors que les dinosaures peuplaient encore la Terre. Les plus vieux manchots fossiles connus, découverts en Nouvelle-Zélande, datent de 58 à 62 millions d'années. L'événement catastrophique qui a entraîné l'extinction des dinosaures et des autres prédateurs terrestres et marins a permis aux manchots de prospérer dans les eaux tempérées entourant un minicontinent submergé, la Zélandia. Par la suite, il y a environ 50 millions d'années, les manchots ont commencé à se répandre à travers tout l'hémisphère Sud, probablement grâce à une innovation évolutive clef : un échangeur de chaleur nommé le plexus artériel huméral, qui permettait à ces oiseaux de maintenir leur température corporelle dans les eaux froides. Au fil de leur dispersion, les manchots ont développé une immense diversité de tailles et de formes – beaucoup plus importante que celle des manchots actuels. Quelques espèces de cette longue histoire évolutive et leurs relations sont représentées sur l'arbre phylogénétique ci-contre.



actuels – dont celle des manchots – sont apparues avant ce désastre épique et lui ont survécu.

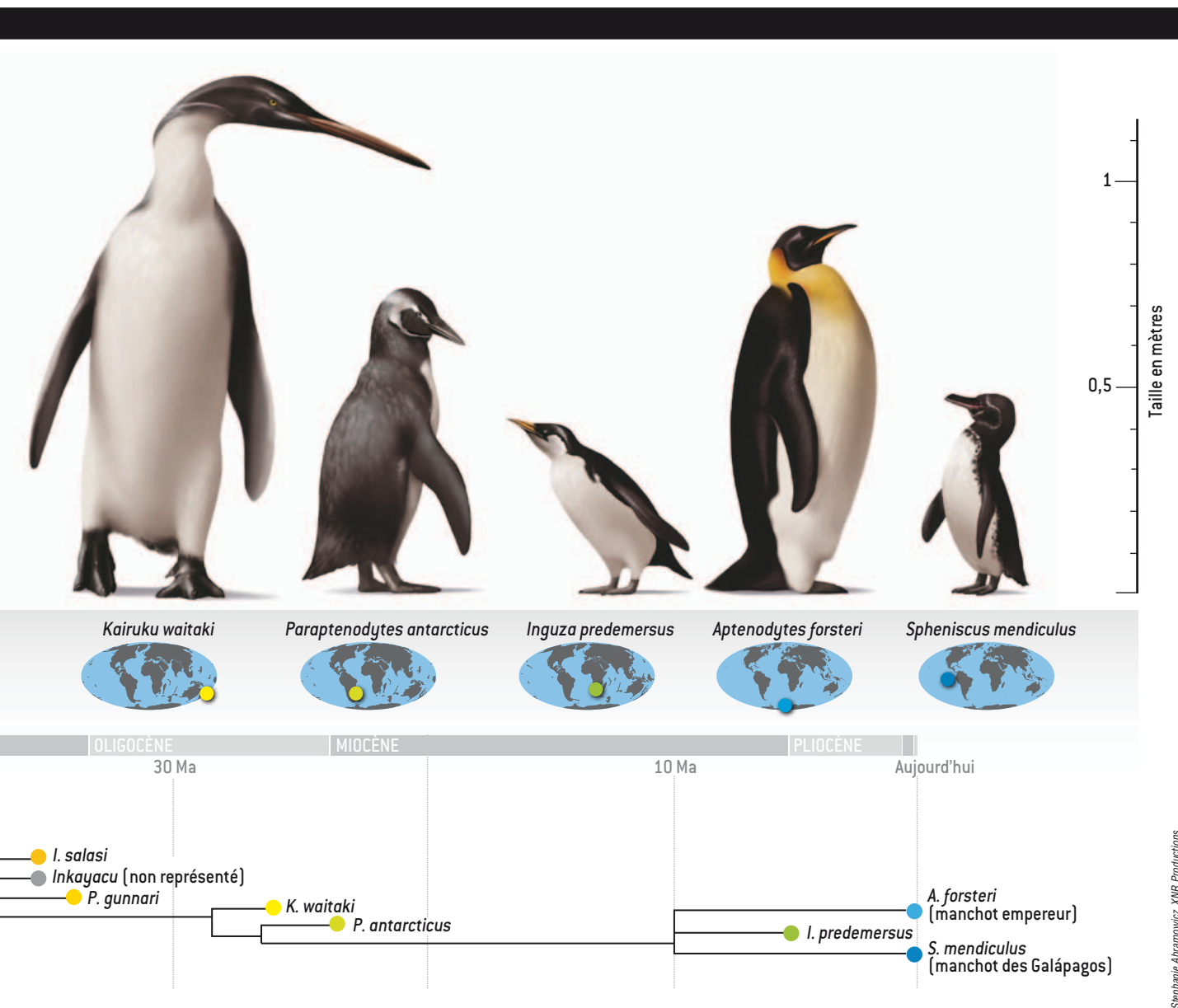
Zélandia, paradis des oiseaux marins

Le fait que les plus anciennes traces de manchots ont été trouvées en Nouvelle-Zélande n'est probablement pas une coïncidence. De nombreux manchots vivent aujourd'hui près des côtes de ce pays. Jusqu'à ce que les hommes arrivent, il y a moins de 1000 ans, ces îles constituaient un paradis tempéré pour les oiseaux de mer, en marge du Pacifique Sud et de l'océan Austral. Exempte de mammifères pré-

dateurs terrestres, cette région offrait de l'espace pour la reproduction des colonies et une nourriture abondante dans les mers environnantes.

L'étude géologique de la région suggère qu'elle était aussi favorable au mode de vie des oiseaux de mer à la fin du Crétacé, quand les manchots apparurent – quoique pour des raisons quelque peu différentes. La Nouvelle-Zélande actuelle est en effet la plus vaste région exposée d'un mini-continent submergé nommé Zélandia, qui s'est séparé de l'ancien supercontinent Gondwana il y a environ 85 millions d'années. Ainsi libérée, la Zélandia a dérivé vers le Nord-Est dans le Pacifique, transportant végétaux et animaux – y compris

les dinosaures – jusqu'à sa destination actuelle, environ à mi-chemin entre le pôle Sud et les tropiques. À mesure que la Zélandia dérivait, elle se refroidissait et s'enfonçait. Des mers peu profondes recouvrirent la région, un large plateau continental se formant autour des terres émergées. Malgré son isolement des autres masses de terre, la Zélandia ne sortit pas indemne de l'extinction de la fin du Crétacé. Beaucoup de ses organismes marins et terrestres périrent dans la catastrophe. Cependant, ce qui était mauvais pour ces animaux était bon pour les manchots. Les reptiles marins tels que les mosasaures et les plésiosaures ayant été anéantis, les premiers manchots pouvaient traverser



■ LES AUTEURS



Ewan FORDYCE est paléontologue à l'Université Otago, en Nouvelle-Zélande.



Daniel KSEPKA est paléontologue à l'Université d'État de Caroline du Nord, aux États-Unis.

■ POUR INFO

Jeudi 14 mars, Yvon Le Maho et le paléontologue Philippe Taquet, président de l'Académie des sciences, reviendront sur l'évolution passée des manchots et sur leur avenir face au changement climatique dans l'émission **La marche des sciences**, sur France Culture de 14h à 15h. www.franceculture.com

à la nage les eaux entourant la Zélandia sans craindre concurrents ou prédateurs.

Ayant acquis leurs caractéristiques aquatiques en Zélandia, les manchots ont vite étendu leur domaine, se dispersant sur des milliers de kilomètres et dans de nouvelles zones climatiques. Les fossiles de l'espèce péruvienne *Perudyptes devriesi* montrent que les manchots sont arrivés à proximité de l'équateur il y a environ 42 millions d'années. En d'autres termes, ils se sont établis dans l'un des lieux les plus chauds au cours d'une des périodes les plus chaudes de l'histoire de la planète. À cette époque, la température au Pérou était d'environ 29,5°C, et la température moyenne des océans dépassait la température actuelle de 10,8 à 14,4°C. À peu près au même moment, des manchots géants tels que *Anthropornis nordenskjöldi* vivaient sur l'île Seymour, en Antarctique. Il y a 37 millions d'années, les manchots s'étaient répandus sur presque toutes les grandes terres de l'hémisphère Sud.

Une adaptation au froid... en pays chaud

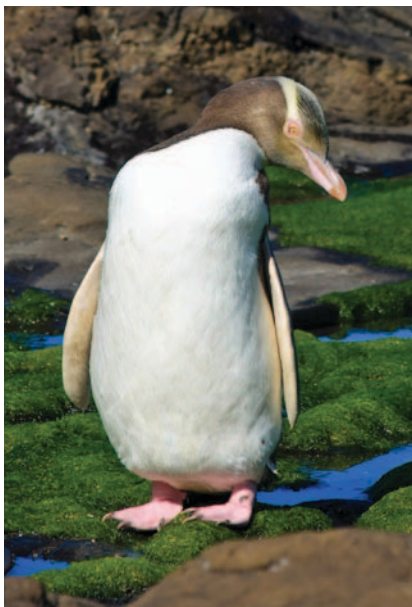
Pourquoi les manchots, après s'être cantonnés à la Zélandia pendant des millions d'années, se sont-ils brusquement répandus dans tout l'hémisphère Sud, il y a environ 50 millions d'années ? Récemment, l'un de nous (Daniel Ksepka) a découvert un indice important, une caractéristique longtemps négligée à la surface des os de nageoires qu'il est facile de négliger parmi toutes les marques associées aux muscles et aux tendons. D. Ksepka fut le premier à remarquer ces sillons en 2006, tandis qu'il étudiait les nageoires de manchots congelés dans le sous-sol du Muséum d'histoire naturelle américain à New York à la recherche de relations entre les marques sur les os fossiles et l'anatomie de la nageoire. Simultanément, Daniel Thomas, spécialiste des manchots, menait des recherches similaires à l'Université d'Otago, visant notamment à comprendre comment a évolué la capacité des manchots à réguler leur température.

En comparant leurs notes, D. Ksepka et D. Thomas ont remarqué que ces sillons se forment en un point où un groupe d'artères et de veines s'appuient sur l'humérus. Ces vaisseaux sanguins constituent un échangeur de chaleur à contre-courant nommé le plexus artériel huméral, qui permet

aux manchots de limiter les pertes de chaleur par les nageoires et de maintenir leur température corporelle dans l'eau froide. Chez les manchots actuels, le sang chaud quittant le cœur est refroidi par ce plexus avant d'atteindre l'extrémité de la nageoire, et le sang froid revenant des nageoires est réchauffé avant d'atteindre le cœur.

Cette découverte offre un éclairage quelque peu surprenant sur l'origine de la thermorégulation des manchots. Les espèces actuelles ayant la capacité de supporter un froid extrême, on pourrait penser que le plexus est le fruit de l'adaptation évolutive à un environnement très froid. Mais les fossiles suggèrent tout autre chose. La présence de tels sillons sur des restes de manchots vieux de 49 millions d'années, tels que *Delphinornis*, un manchot de petite taille de l'Antarctique, montre que l'apparition de cette caractéristique remonte au moins à cette époque. Cependant, les premiers manchots *Waimanu* de Zélandia, qui ont vécu il y a 58 millions d'années, ne présentent aucune trace de cette caractéristique. Le plexus doit donc avoir évolué entre-temps, quand la Terre était bien plus chaude qu'elle ne l'est aujourd'hui. À cette époque, l'Antarctique était dépourvu de couches de glace permanentes et offrait plutôt un environnement forestier tempéré ; la Zélandia était encore plus chaude.

Quel avantage évolutif un plexus conservateur de chaleur a-t-il pu procurer aux premiers manchots, dans ce monde aussi chaud qu'une serre ? Si les températures à la surface de la mer étaient élevées, les premiers manchots recherchaient probablement leur nourriture plus en profondeur, dans des régions riches en nutriments et donc propices à la présence de proies en quantité, dont des poissons et des calmars. Cette pêche en eaux plus froides comportait un risque, cependant. La chaleur corporelle étant plus vite perdue dans l'eau que dans l'air, si la température de l'eau est inférieure à sa température corporelle, un animal à sang chaud – tel un plongeur humain – peut être victime d'hypothermie même dans des mers chaudes. Les manchots à sang chaud risquaient de subir le même sort dans ces eaux froides – malgré leurs couches de graisse isolantes et leurs plumes imperméables. En réduisant les pertes de chaleur par les nageoires, le plexus artériel huméral leur aurait permis de maintenir plus longtemps leur chaleur corporelle dans des eaux froides.



1. UN MANCHOT À ŒIL JAUNE ou manchot antipode (*Megadyptes antipodes*) de Nouvelle-Zélande.

Les manchots menacés par le réchauffement climatique

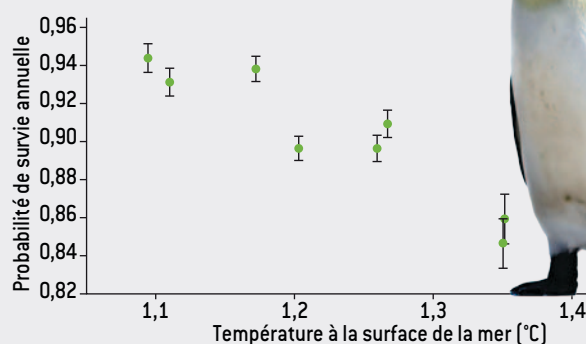
En complément de l'approche paléontologique, la comparaison d'espèces actuelles apparentées, mais vivant dans des milieux contrastés, permet de déterminer grâce à quels processus adaptatifs, notamment comportementaux, les manchots ont colonisé l'ensemble de l'hémisphère austral. Ces adaptations sont très lentes – sur plusieurs dizaines de millions d'années –, d'autant plus que l'âge de première reproduction est élevé, atteignant cinq ans chez certaines espèces.

Prenons le manchot empereur (*A. forsteri*) et le manchot royal (*A. patagonicus*). En raison de leurs nombreuses similitudes morphologiques, ils ont été classés dans le même genre, *Aptenodytes*. Néanmoins, le manchot empereur est le seul animal à se reproduire en hiver sur la glace de mer au cœur du rude hiver antarctique, à des températures ambiantes qui, pour certaines colonies, descendent à -50°C . Dans la colonie située près de la base Dumont d'Urville en terre Adélie, la température descend rarement en dessous de -30°C , mais les rafales de vent atteignent des vitesses comprises entre 100 et 200 kilomètres par heure, ce qui augmente considérablement le pouvoir de re-

froidissement ambiant. Le manchot royal est rarement soumis à des températures négatives, car il vit dans la zone subantarctique; les deux tiers de ses populations se reproduisent dans l'archipel de Crozet, où la température moyenne est d'environ 5°C .

Avec des extrémités (bec et ailerons) plus grandes et une taille réduite (80 centimètres pour 13 à 15 kilogrammes, au lieu d'un mètre pour 25 à 40 kilogrammes pour le manchot empereur), la morphologie du manchot royal correspond à un stade intermédiaire dans l'adaptation au froid par rapport au manchot empereur. En effet, plus un animal est grand et volumineux avec des extrémités réduites, moins importante est sa surface corporelle de déperdition thermique par rapport à son volume producteur de chaleur.

Mais la morphologie du manchot empereur ne suffit pas pour lui assurer sa reproduction dans un froid extrême. Son processus adaptatif décisif est en fait comportemental : en serrant les uns contre les autres pour former des « tortues », les manchots empereurs réduisent de moitié leur vitesse d'amaigrissement, ce qui permet au mâle de jeûner en moyenne 120 jours et ainsi d'assurer la totalité



Une augmentation de la température à la surface de la mer de seulement $0,3^{\circ}\text{C}$ dans la zone à la limite des glaces où les manchots royaux se nourrissent en hiver se traduit par une diminution de près de dix pour cent de leur survie.

de l'incubation. Cela est rendu possible à la fois par la mobilité (l'œuf est couvé sur les pattes), mais aussi par le fait que le manchot empereur n'a pas de comportement territorial (c'est le seul manchot dans ce cas).

Comme l'indiquent à juste titre E. Fordyce et D. Ksepka, la rapidité du changement climatique constitue une terrible menace pour des oiseaux à l'adaptation aussi poussée à leur milieu. Ainsi, 80 pour cent des populations de manchots Adélie (*Pygoscelis adeliae*) ont disparu de l'Ouest de la péninsule Antarctique, l'une des zones de la pla-

nète qui se réchauffent le plus actuellement. En prenant en compte les scénarios de nos collègues climatologues, avec Céline Le Bohec nous avons montré en 2008 que les populations de manchots royaux de Crozet sont gravement menacées (voir la figure). Et en 2009, nos collègues du Centre d'études biologiques de Chizé (CNRS) ont aussi prédit l'extinction de la colonie de manchots empereurs de terre Adélie.

Yvon Le Maho
Institut pluridisciplinaire
Hubert Curien, CNRS-Université
de Strasbourg

Graphie : d'après C. Le Bohec et al., PNAS, 2008. © Shutterstock Neale Couland

Il pourrait aussi avoir aidé les manchots à supporter les longs voyages en haute mer, grâce auxquels ils se sont dispersés, à partir de la Zélandia, vers les autres continents. Cette hypothèse nous semble d'autant plus plausible que les premières vagues de manchots fossiles apparues en dehors de la Zélandia semblent toutes présenter cette caractéristique. Les manchots modernes n'auraient détourné ce mécanisme que bien plus tard pour coloniser les glaces formées quand la planète s'est refroidie.

Dix espèces cohabitaient

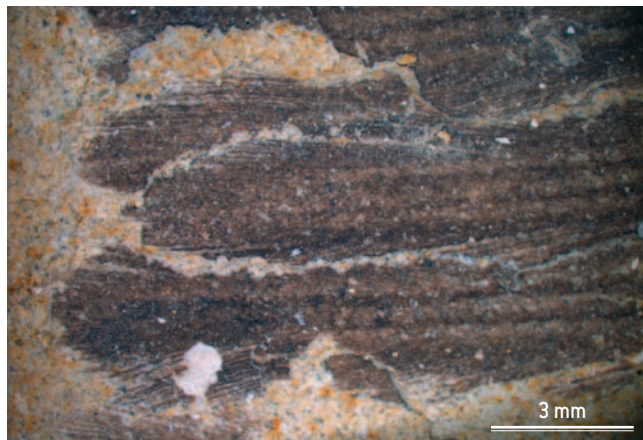
À partir du moment où ils se sont dispersés dans tous les océans de l'hémisphère Sud, les manchots ont connu une importante diversification. Le manchot de Nouvelle-Zélande *Pachydyptes ponderosus* – le « plongeur corpulent » – était un géant, connu seulement à partir de quelques os épais datant d'environ 35 millions d'années. On

estime sa masse à plus de 68 kilogrammes. À l'autre extrémité du spectre, *Eretiscus tomii* – le « rameur minuscule » – d'Argentine, vieux de 21 millions d'années, avait une taille inférieure à 0,5 mètre. Comme le petit manchot bleu vivant actuellement en Nouvelle-Zélande, les membres de cette espèce sont peut-être arrivés sur la terre ferme dans des sortes de radeaux composés de plusieurs dizaines d'oiseaux – un comportement qui peut réduire les risques de prédation.

Certains manchots usaient d'une arme mortelle. Il y a environ 36 millions d'années, *Icadyptes salasi* – le « plongeur d'Ica », du nom d'une région du Pérou – patrouillait dans les voies maritimes préhistoriques équipé d'un bec allongé et renforcé, monté sur un cou enveloppé de muscles puissants, prêt à empaler tout poisson ou calmar passant à sa portée. D'autres manchots arboraient d'étranges capes, tel le spécimen *Inkayacu paracasensis* – le « roi des eaux » – vieux de

36 millions d'années mis au jour en 2010 au Pérou par Julia Clarke, de l'Université du Texas à Austin. Magnifiquement conservé, il portait encore des plumes et sa peau. Des détails microscopiques ont révélé la présence de pigments brun rougeâtre et gris, bien loin des motifs noirs et blancs des manchots actuels.

Non seulement les anciens manchots se sont diversifiés, mais les variations ont été nombreuses. Outre les 19 espèces actuelles, les paléontologues ont identifié plus de 50 espèces fossiles. De surcroît, dans de nombreuses régions, des preuves solides suggèrent que de multiples espèces cohabitaient dans le passé. Sur l'île Seymour, par exemple, on compte jusqu'à dix espèces dans les mêmes couches fossiles. Ce recouvrement est fascinant, car il suggère que ces espèces étaient capables de se constituer suffisamment de niches écologiques différentes à partir du même espace physique pour coexister. Par comparaison, chez les



Avec l'aimable autorisation de Science/AAAS

2. DES PLUMES FOSSILISÉES (*en haut*) et le bec (*en bas*) d'un manchot géant vieux de 36 millions d'années, *Inkayacu paracasensis*, mis au jour en 2010 au Pérou par Julia Clarke, de l'Université du Texas à Austin, aux États-Unis, et ses collègues. Ce spécimen ancien présente plusieurs particularités. D'une taille imposante (environ 1,5 mètre), et d'une masse estimée à environ 55 kilogrammes (soit le double de celle d'un manchot empereur lorsqu'il n'a pas accumulé ses réserves hivernales), il arborait un long bec pointu et renforcé qui lui servait sans doute de harpon. Les pigments des plumes révèlent en outre qu'il était principalement gris et rouge-brun.

manchots actuels, cinq espèces au plus partagent la même aire de reproduction.

Les anciens manchots ont réussi à cohabiter en partie grâce à une gamme de tailles plus étendue que celle des manchots actuels. C'est ce que suggèrent notamment les énigmatiques manchots géants de Nouvelle-Zélande. Nous avons récemment achevé une étude détaillée de quelques spécimens vieux de 27 millions d'années, incluant le squelette partiel découvert par E. Fordyce dans les années 1970. Bien qu'ils ressemblent au *Palaeudyptes* d'Huxley, ces fossiles constituent un nouveau genre, que nous avons nommé *Kairuku* – « le plongeur qui revient avec de la nourriture » en maori. La bonne conservation de tous les os clefs du squelette nous a permis de reconstituer la taille et les proportions du corps. Mesurant 1,35 mètre et pesant plus de 61 kilogrammes, selon nos estimations, les manchots *Kairuku* devaient être des géants par rapport aux manchots empereurs actuels.

Nous pensons que la taille de ces anciens manchots de Nouvelle-Zélande est une adaptation qui a facilité leur nage sur de longues distances, des colonies (rookeries) des îles de la Zélandia jusqu'au bord de la plate-forme

continentale. Leur taille aurait aussi amélioré l'efficacité de leurs plongeurs en eaux profondes à la recherche de proies telles que les calmars, car les grands oiseaux nagent plus vite, emmagasinent plus d'oxygène, et conservent mieux leur chaleur corporelle. De même, les grands manchots fossiles de l'île Seymour nageaient et chassaient vraisemblablement loin et en profondeur, tandis que les espèces plus petites recherchaient leur nourriture plus près des terres.

S'adapteront-ils à un réchauffement rapide ?

En tant que « sentinelles » de la diversité aviaire, nous pouvons tirer plusieurs leçons des enregistrements fossiles des manchots pour leur préservation. Au cours des derniers 60 millions d'années, la plupart des extinctions de manchots se sont produites bien avant l'apparition de l'homme. Cependant, *Homo sapiens* n'est pas totalement innocent. Au moins une espèce de manchot parente du manchot à œil jaune – *Megadyptes waitaha* – se serait éteinte, du moins en partie, à cause

de sa chasse par l'homme. Si aujourd'hui les manchots sont rarement chassés intentionnellement, ils restent sous la menace de pressions locales et mondiales telles que la surpêche, les rejets de pétrole ou l'introduction de prédateurs. Néanmoins, la menace la plus préoccupante pour les manchots semble être le changement climatique.

Les manchots se sont adaptés à des changements climatiques spectaculaires. Ils ont prospéré tant dans les zones équatoriales torrides de la Terre au cours d'une phase de réchauffement de type « serre », que dans les déserts glacés de l'Antarctique actuel. Mais ne nous méprenons pas. Ces succès évolutifs au cours des 60 derniers millions d'années de changements climatiques ne signifient pas qu'ils s'adapteront aussi bien à tous les effets du réchauffement global actuel. En termes d'adaptation, le temps est un facteur critique. Les paléontologues ont découvert que de nombreuses espèces ont peu à peu déplacé leur habitat au cours de changements climatiques majeurs, tels ceux qui ont accompagné l'avancée et le retrait des glaciers, lors des cycles interglaciaires qui ont marqué les dernières centaines de milliers d'années.

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