

transmettre une copie de tous les messages entrants et sortants à une tierce partie. Un observateur sans méfiance ne remarquerait rien, et l'attaque pourrait continuer indéfiniment.

Dans ce cas particulier, une puce sécurisée surveillerait en permanence la quantité et le type de données entrant et quittant le circuit intégré et comparerait statistiquement le flux d'informations avec celui attendu. Toute anomalie serait signalée comme une fuite potentielle de données, et la puce pourrait alerter l'utilisateur ou commencer à la juguler.

Outre qu'il peut lutter contre les effets des intrus sur son propre fonctionnement, un circuit intégré sécurisé peut signaler aux équipements voisins le type d'attaque et leur permettre ainsi de prendre des mesures préventives pour l'éviter (ou du moins minimiser ses effets). Un tel système de notification n'est pas aussi irréaliste qu'on pourrait le croire, presque tous les systèmes étant plus ou moins connectés. Par exemple, si un circuit sous attaque est en mesure d'identifier le message activateur responsable de la défaillance, il peut alerter les autres circuits pour qu'ils filtrent ce déclencheur.

Les mesures décrites ici ne seront effectives que si les parties du circuit responsables de la gestion de la sécurité sont elles-mêmes sécurisées et dignes de confiance. C'est comme si, pour sécuriser un circuit, il fallait sécuriser sa sécurité. Mais les éléments d'un circuit dédiés à la sécurité ne représentent qu'une petite fraction de la conception globale. Ces éléments peuvent être conçus sur place pour que seuls des intervenants vraiment dignes de confiance y aient accès.

Un compromis entre efficacité et sécurité

Grâce aux efforts des gouvernements, des chercheurs et des entreprises, d'importants progrès ont été réalisés dans la sécurité d'Internet. On ne peut pas en dire autant de l'infailibilité des circuits intégrés, qui en est à peu près au même stade que la sécurité d'Internet il y a 15 ans : la prise de conscience du problème va croissant, mais les stratégies défensives n'ont pas encore été complètement élaborées, et encore moins mises en pratique.

Une approche de lutte complète contre les attaques matérielles par les chevaux de Troie matériels nécessite des

actions à plusieurs niveaux. Les stratégies qui visent à ce qu'aucun matériel compromis ne voie jamais le jour, comme l'initiative de la DARPA, représentent un bon début. Cependant, il est plus important encore de commencer à mettre en œuvre des mesures de conception sécurisée, seules à même d'assurer une défense contre des attaques en cours. Ces mesures demanderont du temps, de l'argent et des efforts. Différents compromis possibles entre efficacité, sécurité et coût permettront d'obtenir un bon niveau de protection pour des coûts acceptables.

Mon équipe, à l'Université de Californie à Los Angeles, a montré qu'il suffit d'augmenter la taille de la puce de quelques centièmes pour y ajouter une circuiterie de défense. La vitesse de fonctionnement baisse un peu, étant donné que les mesures prises pour vérifier le comportement des blocs fonctionnels consomment des ressources du système qui seraient normalement utilisées pour effectuer la tâche en cours.

LA SÉCURISATION DES CIRCUITS INTÉGRÉS

devra sans cesse innover pour garder une longueur d'avance sur les dernières attaques matérielles.

Toutefois, les ralentissements sont relativement faibles, voire inexistant, si les mesures de sécurité sont effectuées en utilisant une part des circuits et des unités fonctionnelles inactives.

Inévitablement, la lutte contre les attaques matérielles va devenir une course aux armements comparable à celle que l'on a connue dans l'univers du logiciel. La sécurisation des circuits devra innover continuellement pour garder une longueur d'avance sur les dernières attaques. Pour contrer les failles de sécurité détectées dans les logiciels, il suffit d'aller chercher le remède sur Internet. Il est impossible de télécharger de la même manière du matériel de dépannage. Toutefois, les circuits intégrés modernes peuvent être reconfigurés en partie. Si l'on ajoute des mesures judicieuses au processus de conception, il est envisageable de remplacer automatiquement des parties d'un circuit qui auraient été mises hors d'usage. La flexibilité de la conception est notre meilleure défense. Même si les attaques matérielles sont inévitables, nous ne sommes pas condamnés à les voir réussir. ■

Les puces en chiffres

✓ 1 550

Le nombre estimé d'entreprises dans le monde impliquées dans la conception de circuits intégrés : 700 en Amérique du Nord, 600 en Asie et 250 en Europe, au Moyen-Orient et en Afrique.

✓ 2 500

Le nombre approximatif de nouvelles puces conçues chaque année.

✓ 180

La recette globale des ventes de semi-conducteurs en 2009, en milliards d'euros.

✓ BIBLIOGRAPHIE

L. Kim, J. Villasenor et C. Koc, **A trojan-resistant system-on-chip bus architecture**, *Proceedings of the 2009 IEEE Military Communications Conference*, Boston, octobre 2009.

W. K. Clark et P. L. Levin, **Securing the information highway**, *Foreign Affairs*, novembre-décembre 2009.

D. Agrawal et al., **Trojan detection using IC fingerprinting**, *Proceedings of the 2007 IEEE Symposium on Security and Privacy*, Berkeley, mai 2007.

f Pourquoi l'homme n'a plus de fourrure

Nina Jablonski

De récentes découvertes dévoilent pourquoi et quand les hominidés, contrairement aux autres primates, ont perdu leur fourrure. Et l'apparition d'une peau quasi nue aurait favorisé l'émergence d'autres caractéristiques humaines.

L'ESSENTIEL

- ✓ La fourrure réchauffe le corps et protège de l'humidité, des rayons du soleil et des microbes.
- ✓ Pourtant, l'homme en est dépourvu, mais il est équipé d'un dispositif maintenant sa température corporelle constante, même quand son organisme s'échauffe longtemps.
- ✓ En effet, sa transpiration est unique et efficace ; elle évacue bien l'excès de chaleur, notamment parce que sa peau est quasi nue.
- ✓ Les scientifiques en ont déduit que les longs trajets entrepris par les premiers hommes auraient favorisé la sélection d'une peau sans fourrure.

L'homme est un primate, mais il est le seul à avoir une peau presque glabre. Tous les autres primates présentent une fourrure dense, par exemple le pelage noir du singe hurleur ou le manteau couleur cuivrée de l'orang-outan. C'est aussi le cas de la plupart des autres mammifères. L'homme a des poils sur la tête et en quelques autres endroits, mais, comparé à ses proches parents, même le plus poilu des hommes ne l'est guère.

Pourquoi l'homme n'a-t-il pas de fourrure ? Cela fait des siècles que les scientifiques réfléchissent à cette question, en vain. Dans l'évolution humaine, la plupart des transitions importantes, telle l'émergence de la bipédie, sont inscrites dans les fossiles des ancêtres. Mais aucun des restes connus n'a conservé de traces de peau humaine.

Toutefois, depuis quelques années, des chercheurs ont remarqué que les fossiles contiennent des preuves indirectes de la transformation de la peau humaine. Grâce à ces indices et aux éléments obtenus depuis dix ans en génétique et en physiologie, nous sommes parvenus à expliquer pourquoi les êtres humains ont perdu leur fourrure, et quand cela s'est produit. En outre, notre scénario suggère que l'apparition d'une peau quasi glabre a participé à l'évolution d'autres traits caractéristiques de l'homme, notamment son cerveau très développé.

Pour comprendre pourquoi les ancêtres de l'homme ont perdu leur fourrure, voyons d'abord pourquoi d'autres espèces en ont une. Les poils sont un revêtement corporel spécifique des mammifères. En



Dont Mies

fait, ils en définissent la classe: tous les mammifères présentent au moins quelques poils et la plupart en sont abondamment pourvus. Les poils sont de bons isolants thermiques et protègent le corps contre l'abrasion, l'humidité, les rayons du soleil, les parasites et les microbes pathogènes. Ils servent aussi de camouflage pour tromper les prédateurs, et les motifs de la fourrure permettent aux individus d'une même espèce de se reconnaître.

Les rôles de la fourrure

Qui plus est, les mammifères peuvent utiliser leur fourrure comme un signal social – un mode de communication non verbale – pour indiquer par exemple de l'agressivité ou de l'agitation. Quand un

chien hérisse ses poils, il indique à ceux qui le défient de ne pas s'approcher.

Cependant, même si la fourrure a plusieurs fonctions, quelques lignées de mammifères ont acquis au fil du temps une fourrure si clairsemée et aux poils si fins qu'elle n'a plus aucun rôle. La plupart de ces animaux vivent sous terre ou dans l'eau. Chez les mammifères souterrains, tel le rat-taupe, l'apilosité – l'absence de poils – a évolué en réponse à la vie souterraine. Dans ce cas, les poils sont superflus, car les animaux ne se voient pas dans le noir, mais ils se blottissent les uns contre les autres pour se réchauffer.

Chez les mammifères marins qui ne s'aventurent jamais sur terre, telles les baleines, la peau lisse facilite la nage et la plongée, en diminuant les forces de

frottement de l'eau sur la peau. Pour compenser l'absence d'isolation thermique externe, ces animaux ont une couche de graisse sous la peau. En revanche, les animaux semi-aquatiques, par exemple les loutres, ont une fourrure dense étanche, qui emprisonne l'air pour permettre à l'animal de flotter plus facilement. Cette fourrure protège aussi la peau sur le sol.

Les plus grands mammifères terrestres, à savoir les éléphants, les rhinocéros et les hippopotames, ont également une peau nue, si bien qu'ils n'ont pas trop chaud. En effet, plus un animal est grand, plus sa surface corporelle est petite relativement à sa masse, et plus il a des difficultés à évacuer l'excès de chaleur interne. Au Pléistocène – il y a entre deux millions et 10 000 ans –, les mammoths et autres parents des éléphants et des rhinocéros avaient de la fourrure, ce qui leur permettait de vivre dans des environnements froids. Leur isolation externe les aidait à conserver la chaleur du corps et à réduire leurs besoins alimentaires.

Évacuer la chaleur grâce à une transpiration efficace

La peau quasi nue de l'homme n'est pas une adaptation à la vie souterraine ou aquatique, bien que certains pensent à tort que les ancêtres de l'homme soient passés par une phase aquatique au cours de leur évolution (voir l'encadré page 65). Elle n'est pas non plus le résultat d'une grande taille. La peau est devenue presque glabre parce que l'homme a acquis un système de régulation efficace de sa température corporelle. C'est en tout cas ce que suggère l'efficacité de la transpiration humaine.

Garder une température corporelle basse est difficile pour de nombreux mammifères, et pas seulement pour les plus grands d'entre eux, en particulier lorsqu'ils vivent dans des régions chaudes et produisent beaucoup de chaleur en marchant et en courant longtemps. Ces animaux doivent réguler leur température interne, leurs tissus et organes, notamment le cerveau, pouvant être endommagés par un excès de chaleur.

Les mammifères utilisent différentes tactiques pour diminuer leur température interne: les chiens halètent, plusieurs espèces de félins sont plus actives la nuit

quand il fait plus frais, et beaucoup d'antilopes peuvent transférer la chaleur du sang artériel vers le sang veineux, rafraîchi lors de son passage dans les naseaux. Mais chez les primates, y compris l'homme, la principale stratégie est la transpiration. Elle rafraîchit l'organisme en produisant à la surface de la peau un liquide, la sueur, qui s'évapore et, ce faisant, évacue de l'énergie thermique. Ce mécanisme de rafraîchissement est très efficace et évite une surchauffe des organes et des tissus.

Mais la sueur diffère selon les espèces. La peau des mammifères contient trois types de glandes sudoripares (qui produisent la sueur) : les glandes sébacées, apocrines et eccrines. Les glandes sébacées et apocrines dominent chez la plupart des espèces. Situées près des follicules pileux – là où naît le poil –, elles produisent un mélange huileux qui enrobe le poil. Cette sueur rafraîchit un peu l'animal à fourrure, mais sa capacité à dissiper la chaleur est faible.

Il y a près de 20 ans, Edgar Folk, de l'Université de l'Iowa aux États-Unis, et ses collègues ont montré que l'efficacité du rafraîchissement diminue à mesure que la fourrure de l'animal se mouille et s'emmêle sous l'effet de cette sueur épaisse et huileuse. En effet, dans ce cas, l'évaporation a lieu à la surface de la fourrure et non à la surface de la peau, ce qui réduit le transfert de chaleur. Pour compenser cette perte d'efficacité thermique et se rafraîchir, l'animal doit boire beaucoup d'eau et réduire ses déplacements.

Outre l'absence de fourrure, l'homme possède de nombreuses glandes eccrines, entre deux et cinq millions. Ces glandes peuvent produire jusqu'à 12 litres de sueur aqueuse par jour. Elles ne se trouvent pas près des follicules pileux, mais près de la surface de la peau où elles libèrent la sueur à travers de minuscules pores (voir l'encadré ci-contre). La combinaison d'une peau presque nue et d'une sueur fluide qui se répand à sa surface, au lieu de s'accumuler dans une fourrure, permet à l'homme d'éliminer efficacement la chaleur en excès.

En fait, en 2007, Daniel Lieberman, de l'Université Harvard, et Dennis Bramble, de l'Université de l'Utah, ont montré que le système de refroidissement de l'homme est si efficace que lors d'un marathon, un jour de forte chaleur, l'homme gagnerait contre un cheval.

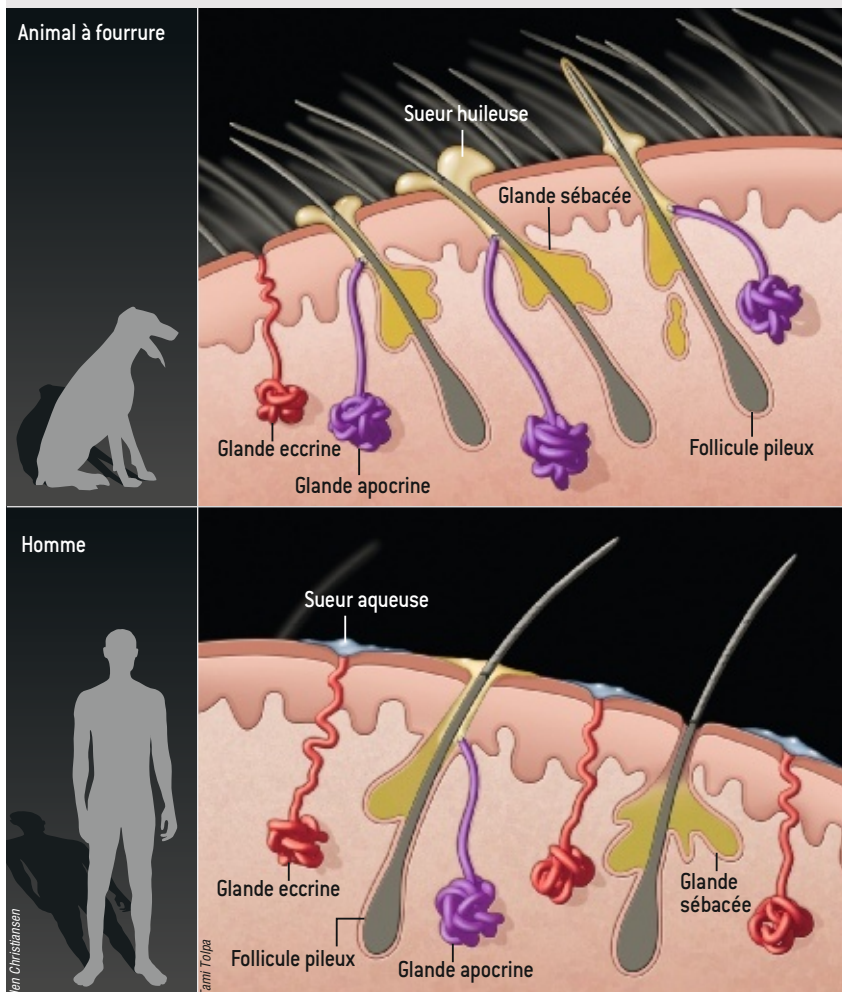
Une alimentation et un climat différents

L'homme est le seul primate sans fourrure doté de nombreuses glandes eccrines. Qu'est-ce qui a favorisé l'émergence d'une peau presque nue et transpirante au moment où la lignée des ancêtres de l'homme moderne a divergé de celle qui a conduit à son plus proche parent, le chimpanzé ? La transformation aurait commencé lors d'un changement climatique.

Grâce à des fossiles d'animaux et de plantes, les scientifiques ont reconstitué les anciennes conditions écologiques. Il y a environ trois millions d'années, la Terre est entrée dans une phase de refroidissement, qui a asséché l'Afrique orientale et centrale où vivaient les ancêtres de l'homme. Avec cette diminution des précipitations, les environnements boisés des premiers hominidés ont laissé place à des prairies de savane ouvertes, et les aliments qui assuraient la subsistance des

TRANSPIRER SANS FOURRURE

La peau humaine, dépourvue de fourrure, évacue mieux l'excès de chaleur de l'organisme qu'une peau couverte de fourrure. Les mammifères possèdent trois types de glandes sudoripares : les glandes apocrines, sébacées et eccrines. Chez la plupart des mammifères, la couche la plus externe de la peau, nommée épiderme, contient un grand nombre de glandes apocrines, regroupées autour des follicules pileux. Ces glandes, avec les glandes sébacées, enrobent les poils de la fourrure d'une sueur huileuse. L'évaporation de cette sueur, qui rafraîchit l'animal en évacuant la chaleur de la peau, se produit à la surface de la fourrure. Cependant, plus l'animal transpire, moins l'élimination de la chaleur est efficace, parce que la fourrure s'emmêle et gêne l'évaporation. En revanche, dans l'épiderme humain, ce sont les glandes eccrines qui prédominent. Ces glandes, situées près de la surface de la peau, libèrent une sueur fluide et aqueuse par de minuscules pores. Outre son évaporation directe sur la peau, cette sueur s'évapore plus facilement que la sueur apocrine, améliorant ainsi le rafraîchissement.



australopithèques, à savoir les fruits, les feuilles, les tubercules et les graines, sont devenus rares et disponibles en certaines saisons seulement, comme ce fut le cas pour les sources d'eau douce. En réaction à cette diminution des ressources, les ancêtres de l'homme ont dû abandonner leurs habitudes sédentaires pour un mode de vie plus actif. Ils ont recherché de la nourriture et de l'eau en parcourant des trajets de plus en plus longs.

C'est aussi à ce moment-là que les hominidés ont commencé à introduire la viande dans leur alimentation, comme en attestent des outils en pierre et en os d'animaux datant d'il y a environ 2,6 millions d'années. Les aliments carnés sont plus riches en calories que les aliments d'origine végétale, mais ils sont plus rares. Les animaux carnivores doivent donc parcourir un plus vaste territoire que les herbivores pour se procurer assez de nourriture.

Une activité intense

En outre, les proies animales bougent, ce qui signifie que les prédateurs doivent dépenser plus d'énergie pour obtenir leur repas. Ainsi, le corps des hominidés chasseurs ou charognards, qui passaient encore du temps dans les arbres, était proche de celui des grands singes, mais il a évolué en un corps muni de longues jambes, adapté à la marche et à la course soutenues.

Toutefois, cette augmentation importante de l'activité des hominidés avait un prix : une élévation de la température corporelle et un risque de surchauffe. Au début des années 1980, Peter Wheeler, de l'Université John Moore de Liverpool, en Angleterre, a simulé la chaleur à laquelle les ancêtres de l'homme ont dû résister dans la savane. En 1994, en utilisant ses résultats, nous avons montré que l'intensification de la marche et de la course, au cours desquelles l'activité musculaire produit beaucoup de chaleur,

L'intensification de la marche et de la course aurait nécessité que les hominidés perdent leur fourrure.

aurait nécessité que les hominidés perdent leur fourrure et améliorent leur capacité de transpiration eccrine pour éviter la surchauffe.

Quand cette métamorphose s'est-elle produite ? Grâce aux fossiles, on a une idée approximative de l'époque à laquelle les ancêtres de l'homme ont commencé à adopter des modes de locomotion modernes. Des études indépendantes de D. Lieberman et de Christopher Ruff, de l'Université Johns Hopkins aux États-Unis, ont montré qu'il y a environ 1,6 million

d'années, un premier membre du genre humain, nommé *Homo ergaster*, avait acquis des proportions corporelles modernes favorisant des marches et des courses prolongées (voir l'encadré page 66).

En outre, des détails des surfaces articulaires de la cheville, du genou et de la hanche montrent que ces hominidés pratiquaient effectivement de telles activités. En conséquence, selon les preuves fossiles, la transition vers la peau nue et un système de transpiration eccrine devait déjà être amorcée il y a 1,6 million d'années pour compenser les excès de chaleur corporelle qui accompagnaient le nouveau mode de vie plus actif des hominidés.

Les recherches en génétique sur la couleur de la peau fournissent un autre indice pour dater l'émergence de la peau presque glabre. En 2004, Alan Rogers, de l'Université de l'Utah aux États-Unis, et ses collègues ont examiné des séquences du gène humain *MC1R*, qui participe à la pigmentation de la peau. L'équipe a montré qu'un variant particulier du gène, toujours présent chez les Africains à pigmentation foncée, est apparu il y a 1,2 million d'années. On pense que les premiers ancêtres humains avaient une peau rosée couverte d'une fourrure noire, un peu comme les chimpanzés aujourd'hui ; après la perte de la fourrure, l'acquisition d'une peau foncée, faisant écran au soleil, aurait été une évolution indispensable.

Mais comment les hominidés ont-ils évolué après avoir perdu leur fourrure ?

La théorie du primate aquatique n'est pas valable

Parmi les différentes théories qui tentent d'expliquer l'évolution de la peau chez l'homme, la théorie du primate aquatique a le plus attiré l'attention et a reçu le plus grand soutien. Selon cette théorie, les hommes sont passés par une phase aquatique au cours de leur évolution.

Énoncée pour la première fois par le zoologiste anglais sir Alister Hardy en 1960, la théorie du primate aquatique a ensuite été soutenue par l'écrivain Elaine Morgan, qui continue à la promouvoir dans ses cours et ses écrits. Pourtant, cette théorie est fautive.

La théorie du primate aquatique prétend qu'il y a environ cinq à

sept millions d'années, le bouleversement tectonique de la vallée du rift, en Afrique de l'Est, a coupé les premiers ancêtres de l'homme de leurs environnements favorisés, les forêts tropicales.

Ces hommes ont donc dû s'adapter à une vie semi-aquatique dans les marais, le long des côtes et dans les plaines inondables, où ils ont vécu pendant près d'un million d'années. E. Morgan voit des preuves de cette phase aquatique dans plusieurs caractéristiques anatomiques que les hommes ont en commun avec des mammifères aquatiques et semi-aquatiques, mais pas avec ceux de la savane. Ces traits communs sont notamment la peau

nue, un faible nombre de glandes sudoripares apocrines et une couche de graisse sous la peau.

Mais la théorie du primate aquatique est indéfendable pour trois raisons principales. Premièrement, les mammifères aquatiques diffèrent déjà beaucoup entre eux quant à la présence de ces caractéristiques aquatiques mentionnées par E. Morgan. En conséquence, il n'existe pas de relation simple entre la quantité de poils que présente un animal et l'environnement dans lequel il vit. Deuxièmement, les données fossiles montrent que les habitats aquatiques étaient envahis de crocodiles et d'hippopotames. Les ancêtres de l'homme n'auraient eu

aucune chance de survivre face à de telles créatures. Troisièmement, cette théorie est trop complexe. Elle soutient que les hommes sont passés d'un mode de vie terrestre à un mode semi-aquatique, puis seraient revenus vivre sur la terre ferme. John Langdon, de l'Université d'Indianapolis aux États-Unis, défend une interprétation plus simple des données fossiles : les hommes ont toujours vécu sur la terre ferme et le changement climatique, qui a favorisé l'extension des prairies de la savane aux dépens des forêts, aurait permis à l'homme d'évoluer vers une peau quasi nue. D'un point de vue scientifique, l'explication la plus simple est souvent la meilleure.

DE LONGUES JAMBES POUR PARCOURIR DE GRANDES DISTANCES

Bien que les données fossiles ne préservent aucune trace directe de la peau humaine, les scientifiques peuvent estimer à quelle époque se situe l'apparition de la peau quasi nue en étudiant d'autres indices fossiles. Les préhumains, tels que les australopithèques (à gauche), avaient probablement des vies sédentaires, à l'instar des grands singes aujourd'hui, car ils vivaient près d'environnements boisés riches en végétaux et en eau douce. Cependant, quand les forêts se sont réduites et que les prairies se sont étendues, les ancêtres qui leur ont succédé, tel *Homo ergaster* (à droite), ont dû parcourir des distances de plus en plus importantes pour trouver de la nourriture, notamment de la viande. Ces hominidés, apparus il y a 1,6 million d'années, étaient probablement les premiers à avoir une peau presque nue et une sueur eccrine ; cela leur aurait permis d'évacuer la chaleur corporelle engendrée par une activité physique importante.

Australopithecus afarensis, représenté ici par le fossile de Lucy datant d'il y a 3,2 millions d'années, ressemblait aux grands singes avec ses membres courts peu adaptés au parcours de longues distances.



D. Flinn and J. Beckett. American Museum of Natural History

Les preuves génétiques de l'évolution de la nudité sont rares, car de nombreux gènes participent à l'apparence et aux fonctions de la peau. Néanmoins, quelques indices ont émergé quand les scientifiques ont comparé les séquences ADN des génomes de différents organismes. Par exemple, l'une des différences les plus importantes entre l'ADN du chimpanzé et celui de l'homme réside dans les gènes codant des protéines qui contrôlent les propriétés de la peau. Les variants humains de certains de ces gènes codent des protéines qui rendent la peau étanche à l'eau et résistante aux éraflures, des propriétés importantes en l'absence de fourrure. L'apparition de ces variants aurait contribué à l'origine de la nudité en atténuant ses conséquences.

La peau humaine est une barrière importante, grâce à la structure et à la composition de sa couche la plus externe, la couche cornée de l'épiderme. Cette couche contient plusieurs épaisseurs de cellules mortes aplaties qui renferment de la kératine – une protéine fibreuse – et d'autres substances. En outre, des couches ultra-minces de lipides entourent chacune de ces cellules.

La plupart des gènes contrôlant le développement de la couche cornée sont anciens et leurs séquences sont très conservées chez les vertébrés (elles n'ont pas changé avec le temps). Mais les gènes déterminant la structure de la couche cor-

Lutter contre la chaleur

✓ **Une peau sans fourrure n'est pas la seule adaptation que les hommes ont acquise pour réguler la température de leur organisme dans l'environnement chaud où ils vivaient. Ils ont aussi développé des membres plus longs, augmentant leur rapport surface/volume, ce qui facilite l'évacuation de la chaleur. Cette tendance semble se poursuivre aujourd'hui. En effet, les populations d'Afrique de l'Est, tels les Dinka du Sud du Soudan, vivent dans l'un des endroits les plus chauds de la Terre et ils ont des jambes extrêmement longues. Pourquoi les êtres humains modernes ont-ils des membres aux proportions si variées ? Quand les premiers hominidés ont migré d'Afrique tropicale vers des régions du monde moins chaudes, les pressions sélectives ont changé, permettant l'évolution de toute une variété de corpulences.**

née humaine sont particuliers : leur apparition était probablement importante pour la survie. Ces gènes codent une combinaison unique de protéines qui ne sont présentes que dans l'épiderme, par exemple de nouveaux types de kératine. Plusieurs équipes tentent aujourd'hui de comprendre les mécanismes de la fabrication de ces protéines.

D'autres scientifiques étudient l'évolution des kératines des poils corporels, pour déterminer pourquoi les poils de la peau humaine sont épars et fins. En 2008, Roland Moll et ses collègues, de l'Université Philipps à Marburg en Allemagne, ont montré que les kératines des poils corporels humains sont fragiles : ces derniers cassent facilement comparés à ceux d'autres animaux. Cela suggère que les kératines des poils humains n'étaient pas aussi importantes pour la survie que les kératines des poils d'autres primates.

Les généticiens tentent aussi de savoir comment la peau humaine a développé une telle abondance de glandes eccrines. Cette accumulation résulterait de modifications dans les gènes qui déterminent le devenir des cellules souches – des cellules non différenciées – chez l'embryon. Au début du développement, des groupes de cellules souches de l'épiderme dans des sites spécifiques interagissent avec des cellules du derme sous-jacent, et des signaux chimiques particuliers commandent la différenciation des cel-

Homo ergaster fut le premier hominidé à avoir de longues jambes (permettant de grandes enjambées), comme on peut les observer ici sur le squelette de l'adolescent de Turkana, datant d'il y a 1,6 million d'années. Ces membres allongés facilitaient les marches et les courses prolongées.



D. Finnin and J. Beckett, American Museum of Natural History



lules souches en follicules pileux, glandes eccrines, glandes apocrines, glandes sébacées ou autres cellules de l'épiderme. Plusieurs équipes étudient comment ces niches de cellules souches épidermiques s'établissent et se maintiennent. Ces travaux devraient clarifier ce qui détermine le destin des cellules épidermiques embryonnaires et comment davantage de ces cellules deviennent des glandes sudoripares eccrines chez l'homme.

Des zones préservées, une pilosité variée

Toutefois, l'évolution a conservé quelques parties du corps humain couvertes. La raison pour laquelle les hommes ont perdu leur fourrure doit aussi expliquer pourquoi ils en ont conservé à certains endroits.

Les poils sous les aisselles et pubiens faciliteraient la propagation des phéromones – des composés chimiques qui déclenchent une réaction comportementale chez de potentiels partenaires sexuels – et permettraient de lubrifier des régions nécessaires à la locomotion. Quant aux cheveux, ils auraient été conservés pour éviter une chaleur excessive au sommet de la tête. Cela semble paradoxal, mais une épaisse chevelure crée une couche d'air entre le cuir chevelu transpirant et la surface chaude des cheveux. Ainsi, les jours de fort soleil, les cheveux absorbent la chaleur, tandis que la barrière d'air reste

plus fraîche, permettant à la sueur du cuir chevelu de s'évaporer dans la couche d'air.

Des cheveux bouclés sont les plus efficaces, car ils augmentent l'épaisseur de l'espace entre la surface des cheveux et le cuir chevelu, permettant à l'air d'y circuler. L'évolution de la chevelure humaine reste à élucider, mais il est probable que les premiers hommes ont eu des cheveux très bouclés, et que d'autres types de cheveux aient été sélectionnés quand l'homme a atteint de nouveaux territoires, loin de l'Afrique tropicale.

Qu'en est-il des poils sur le corps ? Pourquoi existe-t-il une telle variabilité

entre les hommes ? Dans de nombreuses populations, les individus ont très peu de poils corporels et quelques populations présentent des personnes hirsutes. En général, les populations ayant le moins de poils corporels vivent sous les tropiques, alors que les plus poilues vivent plutôt dans des régions moins chaudes. Pourtant, les poils ne tiennent pas vraiment chaud...

Ces différences de pilosité sont en partie dues à la testostérone, une hormone sexuelle masculine, car, quelle que soit la population, les hommes ont davantage de poils corporels que les femmes. Plusieurs

Des poux sur les vêtements

Ces dernières années, on a étudié les poux pour rechercher des indices qui expliqueraient pourquoi les hommes ont perdu leur fourrure. En 2003, Mark Pagel, de l'Université Reading en Angleterre, et Walter Bodmer, de l'Hôpital John Radcliffe à Oxford, ont proposé que les hommes ont perdu leur fourrure pour débarrasser leur corps des poux, qui transmettent des maladies, et d'autres parasites installés dans la fourrure ; cela permettrait en outre d'exposer la bonne santé de la peau.

Mais d'autres chercheurs, qui ont étudié les poux de la tête et du corps, ont découvert combien de temps s'est écoulé entre l'apparition d'une peau presque nue chez les premiers hommes et le moment où ils ont commencé à porter des vêtements. Bien qu'ils se nourrissent de sang, les poux de corps vivent sur les vêtements (alors que les poux de tête vivent dans les cheveux). L'origine des poux de corps fournit donc une estimation de la date d'apparition des vêtements chez les hominidés. En comparant les séquences de gènes de divers organismes, les chercheurs peuvent estimer quand une espèce est apparue. Ces études, réalisées chez les poux, indiquent que les poux de tête vivaient avec les premiers hommes sans fourrure, tandis que les poux de corps sont apparus plus tard. La chronologie de leur apparition indique que les hommes étaient nus pendant plus d'un million d'années avant de se vêtir.



Heinrich van Dalberg, Getty Images

LA FOURRURE D'UN ANIMAL transmet des signaux sociaux importants qui interviennent dans la communication. Par exemple, des poils hérissés indiquent une agression ou les motifs d'une robe permettent aux membres d'une même espèce de se reconnaître. Les



Mark Wilson, Getty Images

hommes compensent l'absence de fourrure en décorant leur corps de tatouages, de bijoux et d'autres ornements. Ils ont aussi des expressions faciales complexes, ainsi que la capacité de transmettre des émotions par le langage.

L'AUTEUR



Nina JABLONSKI dirige le Département d'anthropologie à l'Université d'État de Pennsylvanie, aux États-Unis.

✓ BIBLIOGRAPHIE

D. Lieberman et D. Bramble, *The evolution of marathon running: capabilities in humans*, *Sports Medicine*, vol. 37, pp. 288-290, 2007.

N. Jablonski, *Skin: a natural history*, University of California Press, 2006.

Chimpanzee sequencing and analysis consortium, *Initial sequence of the chimpanzee genome and comparison with the human genome*, *Nature*, vol. 437, pp. 69-87, 2005.

A. Rogers et al., *Genetic variation at the MC1R locus and the time since loss of human body hair*, *Current Anthropology*, vol. 45, pp. 105-108, 2004.

hypothèses tentent d'expliquer ce déséquilibre. Par exemple, l'une d'elles énonce que les femmes préfèrent les hommes avec une barbe plus fournie et des poils corporels plus épais, parce que ces traits sont associés à la virilité et à la force. Une autre propose que les hommes ont développé une préférence pour les femmes ayant des traits juvéniles.

Ces hypothèses sont intéressantes, mais personne ne les a vérifiées dans des populations humaines modernes ; on ignore, par exemple, si les hommes poilus sont plus vigoureux ou plus féconds que leurs homologues imberbes. En fait, on se demande encore pourquoi la pilosité humaine est aussi variée.

Vers un cerveau plus gros, sans surchauffe

L'absence de fourrure a eu des conséquences importantes sur les phases ultérieures de l'évolution humaine. La perte de la plupart des poils et la capacité de dissiper la chaleur corporelle par la transpiration eccrine ont facilité l'accroissement en volume de l'organe le plus sensible à la température, le cerveau.

Alors que les australopithèques avaient un cerveau d'une taille moyenne de 400 centimètres cubes (environ la taille du cerveau d'un chimpanzé), *H. ergaster* avait un cerveau deux fois plus gros. Et en un million d'années, le cerveau humain a gagné encore 400 centimètres cubes pour atteindre sa taille actuelle. Bien sûr, d'autres facteurs ont influé sur le déve-

loppement du cerveau, par exemple l'adoption d'une alimentation assez calorique pour nourrir cet organe gourmand en énergie. Mais la perte de la fourrure a certainement été une étape critique dans l'évolution du cerveau humain.

L'apparition d'une peau quasi glabre a aussi eu des répercussions sociales. Les poils corporels de l'homme peuvent se hérissier quand les petits muscles à la base des follicules pileux se contractent. Mais ses poils sont si fins que l'homme ne communique pas aussi bien que les chats, les chiens ou même les chimpanzés de cette façon. Il ne peut pas non plus paraître agressif ou se camoufler, comme le font le zèbre ou le léopard avec leur fourrure rayée ou tachetée.

En fait, on peut spéculer que des traits humains universels, par exemple le maquillage et les expressions faciales complexes, ont évolué après que l'homme a perdu la capacité de communiquer au moyen de sa fourrure (voir la figure ci-dessus). De même, la peinture corporelle, les cosmétiques, les tatouages et d'autres types de décoration de la peau existent dans toutes les cultures humaines, parce qu'ils véhiculent l'appartenance à un groupe, le statut et d'autres informations sociales importantes, autrefois encodés dans la fourrure.

L'homme utilise aussi des attitudes corporelles et des gestes pour communiquer ses émotions et ses intentions. Et il a un langage pour exprimer en détail ses pensées. Vue de cette façon, la peau nue n'a pas seulement rafraîchi l'homme, elle l'a aussi rendu humain. ■

LA LIBRAIRIE DE SCIENCE POUR LA

Des livres à offrir ou à s'offrir



À contre-idées • Didier Nordon

Trouver du comique dans une idée sérieuse (et inversement), du local dans une idée générale (et inversement), de l'absurde dans une idée sensée (et inversement), de l'esprit littéraire au sein des sciences (et inversement). Au fil de ses billets d'humeur, Didier Nordon s'ingénie à bousculer les idées reçues et tout ce qui semble évident et... qui ne l'est pas. Un livre décapant, pour jouer avec les mots... et les idées.

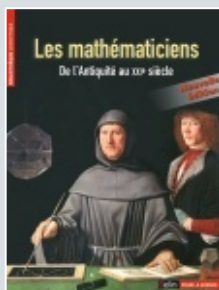
224 pages • 19 euros • 075110



Au nom de l'infini • Jean-Michel Kantor, Loren Graham

Peut-on parler de mathématiques, de religion, de politique dans un même ouvrage ? Oui, et c'est le défi qu'ont relevé le mathématicien Jean-Michel Kantor et l'historien des sciences Loren Graham, du MIT. Ce livre touchera même ceux que les mathématiques laissent indifférents, voire effraient. Les auteurs éclairent les liens étroits entre la vie – avec ses plaisirs et ses drames – et l'œuvre de ces hommes et ces femmes qui ont marqué le XX^e siècle par leur créativité en mathématiques.

288 pages • 24 euros • 075107



Les mathématiciens • Collectif

Autant artistes que scientifiques, les mathématiciens sont en proie à leurs passions, leurs interrogations, leurs doutes, leurs tourments, leurs angoisses, et la hantise de la beauté. « Nul ne peut être mathématicien s'il n'a une âme de poète », disait Sophie Kowalevskaia. Les mathématiciens doivent faire preuve de rigueur et de ténacité, mais surtout d'inventivité. Maudissant chaque jour leur impuissance à faire reculer les frontières du savoir, ils s'émerveillent pourtant, regardant derrière eux, de l'ampleur du chemin parcouru.

280 pages • 24 euros • 075109



La physique buissonnière • Jean-Michel Courty, Édouard Kierlik

La nature est pleine de surprises pour qui veut bien s'aventurer hors des sentiers battus. Passionnés de physique et curieux de sciences, les auteurs vous invitent à une promenade sur ces chemins de traverse. Avec eux, laissez-vous surprendre par un phénomène que vous avez déjà côtoyé sans même le remarquer. Suivez-les pour découvrir et comprendre cette physique du quotidien.

160 pages • 22 euros • 075105