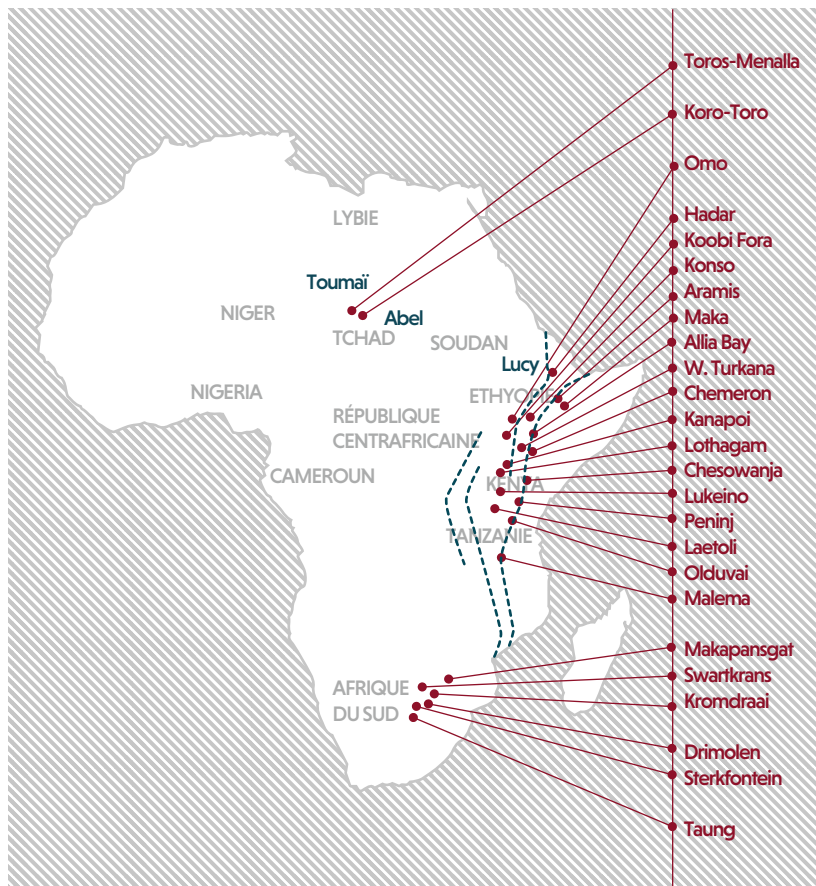




L'Afrique, ce berceau
Les nombreux sites orientaux qui
ont milité pour l'East Side Story
et les deux sites occidentaux
qui ont provoqué
son renversement.

environnements boisés (ardipithèque), mais aussi des savanes arborées et des prairies herbeuses; nous savons aussi qu'ils n'étaient pas restreints à l'Afrique australe et orientale, mais vivaient dans une zone géographique beaucoup plus vaste incluant l'Afrique sahélienne (du moins l'Afrique centrale avec le Tchad), mais probablement aussi l'Algérie, l'Égypte, la Libye, le Cameroun, le Niger et le Soudan...

Il y a 4 millions d'années environ, ces hominidés anciens ont donné naissance aux australopithèques: *Australopithecus anamensis*, puis *Australopithecus afarensis* (Lucy), *Australopithecus bahrelghazali* (Abel), etc.; eux-mêmes à l'origine entre 2,5 et 3 millions d'années des premiers représentants du genre *Homo*. Ces premiers humains (*H. erectus*) sont aussi les premiers bipèdes terrestres stricts, qui seront ensuite les premiers migrants à se déployer sur le reste de l'Ancien Monde, où les plus anciens actuellement connus sont datés à 1,8 million d'années à Dmanisi en Géorgie.

Ainsi, comme c'est le cas pour tous les autres groupes de mammifères, notre évolution n'est pas linéaire, mais au contraire buissonnante. Au cours de notre histoire évolutive, plusieurs espèces d'hominidés ont souvent coexisté sur la Terre. D'ailleurs, nous ne sommes plus qu'une seule espèce seulement depuis l'extinction d'*Homo floresiensis* (dit le

Hobbit), un petit hominidé mis au jour sur l'île de Flores, en Indonésie, qui n'a probablement disparu qu'il y a quelque 50 000 ans.

Enfin il faut signaler l'extraordinaire découverte faite en 2015 par une équipe française (en collaboration avec des collègues américains) à Lomekwi 3, au Kenya: des outils taillés il y a quelque 3,3 millions d'années, donc avant les plus anciens représentants actuellement connus du genre *Homo*. Elle montre que, contrairement aux anciennes idées reçues, les membres du genre *Homo* ne furent certainement pas les seuls hominidés capables de façonner des outils... Cela est d'autant plus fascinant que les premiers foyers avérés montrent que le feu, pour sa part, ne sera maîtrisé que beaucoup plus tardivement, il y a quelque 500 000 ans.

LES HOMMES MODERNES PEUPLENT LA TERRE

Les hommes modernes vont peupler la Terre à l'exception de l'Antarctique. Les plus anciens sont avérés en Afrique il y a 2-300 000 ans. Puis, ils peupleront successivement le Moyen Orient (avant 100 000 ans), l'Asie (vers 100 000 ans), l'Australie (vers 65 000 ans), l'Europe (vers 40 000 ans), mais n'occuperont le continent américain, par la voie de l'isthme de Bering, que très tardivement (vers 15 000 ans).

Certes, nombre de propositions pour le peuplement américain se sont succédé, mais elles ont toujours été l'objet de controverses. Ainsi, la dernière en date – la proposition d'une migration vers les Amériques il y a quelque 130 000 ans – ne pourra être retenue que lorsque davantage de matériel et de nouvelles datations seront publiés. Sur le site de Cerutti Mastodon, en Californie du Sud, nous disposons en effet de ce qui ressemble à des artefacts qui pourraient avoir servi à casser les os d'un mastodonte (cinq d'entre eux présentent des traces d'impact et d'usure sûrement liées à leur utilisation), ce qui est à la fois impressionnant et bien peu...

Enfin, entre 10 000 et 5 000, dans trois zones géographiques distinctes – la Chine, la Mésopotamie et l'Amérique du Sud – les hommes modernes deviendront sédentaires, agriculteurs et éleveurs.

Toutes ces nouvelles données sont à la fois riches, mais encore trop incomplètes. Elles conduisent d'ores et déjà à reconsidérer l'origine des hominidés anciens et leur histoire dans le cadre de nouveaux paradigmes. Quels que soient ceux qui seront proposés, la discontinuité de nos données montre à tous les paléontologues qu'il faut continuer à faire du terrain afin de mettre au jour de nouveaux fossiles. Comme Toumaï et ceux qui ont été découverts jusqu'à présent, ils éclaireront notre évolution et confirmeront sûrement que nous sommes tous des Africains... et hors d'Afrique tous des migrants... ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Brunet, **Nous sommes tous des Africains**, Odile Jacob, 2016.

M. Brunet et al., **A new hominid from the Upper Miocene of Chad, Central Africa**, *Nature*, vol. 418, pp. 145-151, 2002.

M. Brunet et al., **The first australopithecine 2500 kilometers west of the Rift Valley (Chad)**, *Nature*, vol. 378, pp. 273-275, 1995.

2002

La conjecture de Poincaré vaincue

Une célèbre conjecture de topologie énoncée en 1904 par Henri Poincaré résistait aux assauts des chercheurs – jusqu'à ce que Grigori Perelman, mathématicien russe doté d'une personnalité étonnante, prouve l'hypothèse de Poincaré tout en démontrant une conjecture plus vaste.

Avec une série de six articles entamée en 1895 et achevée en 1904, le mathématicien français Henri Poincaré créait ce qu'on appellera la topologie algébrique. Dans ce domaine des mathématiques, on s'efforce d'utiliser l'algèbre pour caractériser les propriétés topologiques d'objets et d'espaces de natures diverses. Poincaré énonça en particulier une conjecture importante portant sur les espaces de dimension 3 et qui est restée longtemps non résolue. Cette célèbre conjecture ne sera démontrée qu'en 2002-2003 par le Russe Grigori Perelman, lequel refusa les récompenses (une médaille Fields et le million de dollars de la fondation Clay) attribuées pour cet exploit.

L'énoncé de la conjecture exige certaines notions préalables. En arrondissant les angles du bord d'un carré, on peut transformer ce dernier en un cercle. On dit que le cercle et le bord du carré sont homéomorphes (c'est-à-dire qu'il existe une bijection continue entre les deux figures). Un topologue s'intéresse à ces transformations homéomorphes et aux propriétés qu'elles conservent.

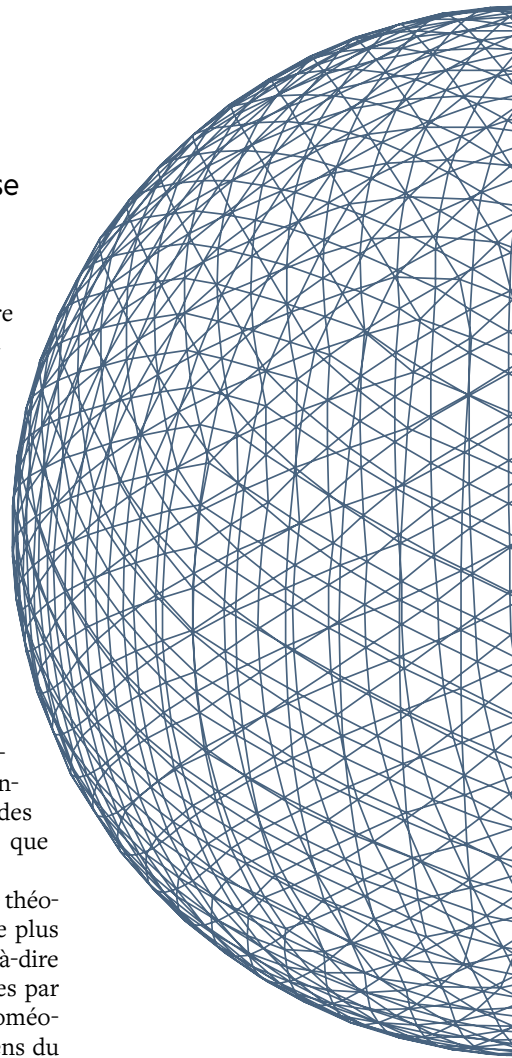
On définit ensuite une variété de dimension n comme un espace dont chaque point a un voisinage homéomorphe à $\mathbb{R}^n$, l'espace euclidien de dimension n . Par exemple, la sphère usuelle est une variété de dimension 2 (une surface), car au voisinage de chacun de ses points, on peut se repérer avec 2 coordonnées. Par ailleurs, un espace est dit compact quand il ne contient aucune suite de points qui file à l'infini. Ainsi, une sphère est compacte, mais une droite ne l'est pas. Enfin, un espace est « simplement connexe » lorsque tout lacet (un

chemin fermé) sur cet espace peut être déformé continûment pour se réduire à un point. La sphère est ainsi simplement connexe, mais pas le tore, puisqu'un lacet qui entoure le trou central ne peut être réduit à un point.

On a maintenant tous les éléments pour énoncer la conjecture de Poincaré, qui peut se formuler ainsi: « Toute variété compacte de dimension 3 et simplement connexe est homéomorphe à la sphère de dimension 3. » La sphère (ou hypersphère) de dimension 3 est l'équivalent, dans un espace de dimension 4, de ce qu'est la sphère usuelle (de dimension 2) dans l'espace tridimensionnel. Plus précisément, la sphère de dimension 3 (et de rayon 1) est l'ensemble des points de coordonnées (x, y, z, t) tels que $x^2 + y^2 + z^2 + t^2 = 1$.

La conjecture de Poincaré, devenue le théorème de Perelman, entre dans un cadre plus large: la géométrisation de l'espace, c'est-à-dire la caractérisation d'espaces topologiques par des objets géométriques qui leur sont homéomorphes. Les travaux des mathématiciens du XIX^e siècle (notamment Gauss et Riemann) auront été nécessaires pour comprendre les surfaces, c'est-à-dire les variétés de dimension 2. Ceux du XX^e siècle l'ont été pour les objets de dimension 3 et pour préparer le terrain à la démonstration par Grigori Perelman de la conjecture de Poincaré.

Dans les années 1970 et 1980, l'Américain William Thurston (mort en 2012) s'est rendu compte que de nombreux espaces topologiques de dimension 3 sont géométrisables. De même qu'en dimension 2, la géométrie euclidienne a



La sphère usuelle est le bord (une surface) de la boule de dimension 3. La sphère en question dans la conjecture de Poincaré est un espace tridimensionnel, qui constitue le bord de la boule de dimension 4...

L'AUTEUR



ÉTIENNE GHYS
directeur de recherche
au CNRS, unité
de mathématiques
pures et appliquées,
École normale
supérieure de Lyon

deux «sœurs», la géométrie sphérique et la géométrie hyperbolique, en dimension 3 la géométrie euclidienne est aussi membre d'une fratrie, plus nombreuse. Outre les géométries sphérique et hyperbolique (analogues à celles de dimension 2), on compte cinq autres géométries, les géométries de Thurston.

UN CAS PARTICULIER DE LA CONJECTURE DE THURSTON

Thurston a étudié un grand nombre d'exemples de variétés topologiques de dimension 3 et a constaté que toutes peuvent être décrites par ces huit géométries. Il a compilé des atlas et encouragé ses étudiants à établir des banques de données informatiques. Son approche était très concrète, presque expérimentale, ce qui est rare en mathématiques !

En 1976, il a formulé sa conjecture selon laquelle les variétés de dimension 3 peuvent être géométrisées par l'une de ces huit géométries. Insistons : les variétés étudiées par Thurston sont purement topologiques et ne sont munies *a priori* d'aucune métrique permettant de définir des distances. La conjecture affirme que ces objets mous que sont les variétés ont cependant une géométrie extrêmement rigide, parmi huit possibilités. La géométrie vient donc au secours de la topologie.

Thurston a lui-même démontré sa conjecture dans de nombreux cas significatifs. Il a utilisé notamment la chirurgie, un ensemble de méthodes permettant de «découper» des variétés et de les «recoller» afin de mieux les comprendre. Dans ce cadre, la conjecture de géométrisation peut s'exprimer ainsi : «Toute variété compacte de dimension 3 peut être découpée selon des tores et des sphères de dimension 2 afin d'obtenir des blocs géométrisables par l'une des huit géométries de Thurston.» La conjecture de Poincaré est alors un cas particulier de la conjecture de Thurston, celui où la variété est simplement connexe.

Ainsi, tout semblait indiquer que la preuve de la conjecture de Thurston allait être de nature topologique, fondée sur la chirurgie. Mais en 2002, un coup de tonnerre retentit avec l'entrée en scène de Grigori Perelman. Il est analyste, un spécialiste des équations aux dérivées partielles, un sujet que beaucoup de topologues avaient l'habitude de regarder de loin.

Grigori Perelman a poursuivi et mené à son terme le programme lancé par Richard Hamilton en 1982. L'idée de ce mathématicien américain était fondée sur le flot de Ricci, une équation d'évolution qui tend à homogénéiser la métrique. Prenez une variété de dimension 3, et choisissez

une métrique quelconque sur cet espace. Cette métrique n'a aucune raison d'être l'une des huit de Thurston, car elle n'est pas nécessairement homogène : elle peut être plus courbée en certains endroits que d'autres, par exemple. Le flot de Ricci appliqué à l'espace donné peut s'imaginer comme une sorte de «chauffage» pendant lequel on laisse diffuser la métrique. Cette dernière atteint alors une espèce de position d'équilibre thermique qui, on l'espère, sera une des huit métriques de Thurston.

Un théorème illustre la méthode. Comment arrondir une courbe quelconque dans le plan ? Un moyen simple d'y parvenir est de la «pousser» dans le sens de sa courbure. Vous poussez tous les points dans le sens de la convexité, peu quand c'est peu courbé et beaucoup lorsque c'est très courbé. En appliquant cette recette en continu, à mesure que la courbe se déforme, le théorème de Gage-Grayson-Hamilton affirme que la courbure s'équilibre et que la courbe tend à devenir un cercle. Le scénario décrit semble évident, mais ce n'est pas le cas. Pourquoi par exemple la courbe ne développerait-elle pas des points doubles ?

C'est là que le bât blessait dans le programme de Hamilton. Lorsque le flot évolue, l'étalement de la courbure n'est pas uniforme. En certains points de la variété, la courbure peut s'accumuler et devenir infinie !

Grigori Perelman a décrit comment apparaissent ces singularités et comment on peut les classer. Fort de cette information, il était alors en mesure de construire, à partir du flot de Ricci, un autre flot débarrassé des singularités à l'aide d'actes de chirurgie. Ainsi s'achevait le programme de Hamilton. La conjecture de géométrisation de Thurston était donc démontrée, et avec elle la conjecture de Poincaré.

Des conjectures analogues à celle de Poincaré en dimension différente de 3 peuvent être construites sur le même modèle. Étonnamment, seul le cas $n=3$, c'est-à-dire la conjecture initiale de Poincaré, résistait. Pour $n=2$, c'est-à-dire pour les surfaces, la conjecture était bien connue de Poincaré, même si, pour en avoir une démonstration complète, il fallut attendre les années 1920. En 1961, Stephen Smale a prouvé la conjecture, par des méthodes de chirurgie, pour les dimensions supérieures ou égales à 7. Puis, en 1962, les cas $n=5$ et 6 ont été résolus par Erik Zeeman et John Stallings par des méthodes similaires. Le cas $n=4$ fut démontré par Michael Freedman en 1982 par une approche complètement différente. Et enfin, Grigori Perelman complétait le tableau en 2003.

Notons pour finir que la preuve de la conjecture de Poincaré, conséquence de celle de la conjecture de Thurston, est un bel exemple d'un cas fréquent en mathématiques : pour résoudre un problème, il est parfois utile de chercher la solution d'un autre plus difficile encore. ■

BIBLIOGRAPHIE

Les articles de G. Perelman sur arXiv : http://bit.ly/PLS481_Perelman

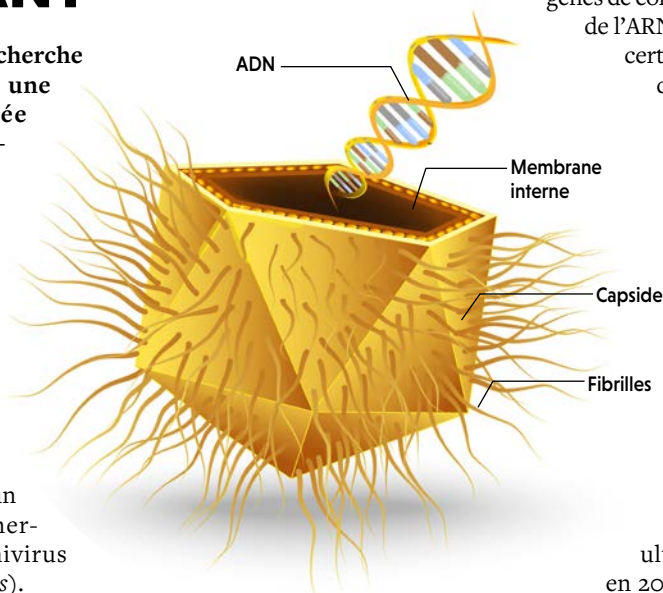
L. Bessières et al., *Images des mathématiques*, CNRS, octobre 2006 : http://bit.ly/PLS481_Poincare

2003 MIMIVIRUS, LE VIRUS QUI MIME LES BACTÉRIES

LE PREMIER VIRUS GÉANT

Dans le cadre d'une recherche sur la légionellose, une amibe est prélevée dans une tour de climatisation en Angleterre. Elle se révèle infectée par un parasite inconnu qu'on assimile à une bactérie. Dix ans plus tard, en 2003, l'une des équipes qui participait à l'étude, celle de Jean-Michel Claverie et Didier Raoult, à l'université de la Méditerranée, à Marseille, s'aperçoit que ladite bactérie est en fait un virus gigantesque. Les chercheurs l'ont nommé Mimivirus (pour *Microbe mimicking virus*).

Mimivirus est plus grand que certaines bactéries; son génome est à l'avenant, avec 1262 gènes dont près d'un millier codent des protéines (alors que quelques-uns suffisent pour faire un virus). Certes, il n'est pas «vivant», car incapable de se reproduire sans parasiter le



MIMIVIRUS, PAS MINIVIRUS

Représentation schématique du virus géant Mimivirus (ici coupé), dont la taille est d'environ 0,4 micromètre.

système de lecture de l'ADN d'une cellule ou d'interagir avec son environnement pour maintenir ses conditions internes. Mais il est doté de gènes de correction du génome, de transcription de l'ARN, ou du métabolisme du sucre dont certaines bactéries ne disposent pas, et dont un virus ne devrait pas avoir besoin! En 2008, l'équipe de Didier Raoult a découvert qu'il est lui-même parasité par un virus nommé Sputnik.

Mimivirus appartient à une lignée très ancienne. Est-il aussi le vestige d'une forme de vie antérieure à la vie cellulaire, qui aurait perdu la capacité de se reproduire par elle-même lorsque l'apparition des premières bactéries lui a facilité la tâche? En tout cas, Mimivirus et les autres virus géants découverts ultérieurement (Mamavirus décrit en 2003, Pandoravirus en 2013, Pithovirus en 2014, Mollivirus en 2015, etc.) troublent la frontière entre virus et bactéries, donc entre l'inerte et le vivant. ■

R. C.

B. La Scola *et al.*, A giant virus in amoebae, *Science*, vol. 299, p. 2033, 2003

2004 LE PREMIER MATÉRIAU BIDIMENSIONNEL

UN PLAN DE CARBONE: LE GRAPHÈNE

Le graphite est un millefeuille friable de couches de carbone. Une feuille unique, d'un seul atome d'épaisseur, est un cristal de «graphène» où les atomes sont liés selon un motif hexagonal. Les électrons de ces liaisons chimiques sont «délocalisés» sur l'ensemble du réseau, ce qui donne au graphène ses propriétés remarquables. La vitesse du courant électrique y est 150 fois plus élevée que dans le silicium et il conduit la chaleur 10 fois mieux que le cuivre (et mieux que n'importe quel autre matériau connu). Il est aussi près de 200 fois plus résistant à la traction que l'acier (à condition d'être sans défaut) et presque transparent.

Ces propriétés font du graphène une substance idéale pour fabriquer des composants électroniques très petits, ultra-rapides et qui chauffent peu. Ses applications potentielles – écrans tactiles souples, blindage contre les ondes électromagnétiques, batteries de nouvelle génération – sont innombrables... Encore faut-il pouvoir le synthétiser!

Dans les années 1990, on a tenté des procédés d'exfoliation du graphite comparables à l'usure de la mine de crayon sur le papier, sans jamais parvenir en dessous de quelques dizaines de couches d'épaisseur. En 2004, Andre Geim et Konstantin Novoselov, à l'université de Manchester, s'amuserent à arracher des écailles de matière d'un bloc de graphite à l'aide de

ruban adhésif. Ils remarquèrent que ces écailles avaient des épaisseurs différentes. En répétant l'expérience, ils parvinrent à isoler des écailles formées d'une seule couche atomique et à les déposer sur des plaques de silice, où ils ont pu les étudier et mesurer précisément les propriétés du matériau. L'exploit leur a valu le prix Nobel de physique en 2010 (voir aussi l'article d'Annick Loiseau, pages 36-37). ■

R. C.

K. S. Novoselov *et al.*, Electric field effect in atomically thin carbon films, *Science*, vol. 306, pp. 666-669, 2004