

Le chromosome Y : une fenêtre sur notre passé

De nombreuses études ont récemment révélé que le chromosome Y, ce petit chromosome dégénéré, peut nous aider à retracer l'évolution de notre espèce. Certaines questions, traditionnellement étudiées par les historiens et par les archéologues, sont aujourd'hui abordées par les généticiens. Grâce aux performances des techniques de la biologie moléculaire et à toutes les données apportées par le séquençage du génome humain, on étudie les variations génétiques entre individus et entre populations, afin de comprendre leurs éventuelles interactions. Toutes ces données génétiques permettent aussi bien de préciser les origines de notre espèce que de mettre en évidence les grandes migrations du passé.

Parmi tous les marqueurs génétiques disponibles, on préfère souvent ceux dont la transmission est monoparentale : le chromosome Y, uniquement hérité du père, et l'ADN mitochondrial, de la mère. Ces deux marqueurs échappent à toute recombinaison, ce qui facilite l'interprétation des histoires génétiques. Dans un groupe d'individus, le chromosome Y est moins représenté que les chromosomes non sexuels (pour chaque chromosome Y, les autosomes sont présents en quatre exemplaires). Ainsi, le chromosome Y est beaucoup plus sensible aux effets de la dérive génétique (la fluctuation aléatoire de la fréquence des gènes) et, par conséquent, il présente d'importantes variations géographiques entre les individus ou entre les populations par rapport à d'autres parties du génome. On identifie ainsi plus aisément les populations fondatrices et l'on peut reconstruire les anciennes migrations humaines.

L'utilisation des marqueurs polymorphes du chromosome Y a permis la mise en évidence de structures génétiques aussi bien au niveau continental que local. Par exemple, un des points les plus controversés de l'évolution de l'espèce humaine porte sur la relation entre les premiers hommes modernes (*Homo sapiens*) et leurs plus proches ancêtres hominidés (*Homo erectus*). Deux modèles ont été proposés pour expliquer l'origine de l'*Homo sapiens* : un modèle multirégional et un modèle dit de remplacement rapide.

Dans le premier modèle, l'espèce humaine aurait subi une évolution séparée et parallèle à partir de plusieurs ancêtres *Homo erectus*. Selon le modèle de remplacement rapide, également nommé *Out of Africa*, toutes les populations actuelles dérivent d'un ancêtre commun récent qui serait d'origine africaine. Ce modèle, suggéré par l'analyse de l'ADN mitochondrial, à la fin des années 1980, a été, depuis, conforté

par les généalogies établies d'après plusieurs études du chromosome Y. La diversité des séquences trouvées en Afrique étant supérieure, on pense que ces populations sont les plus anciennes. En outre, les séquences retrouvées hors d'Afrique semblent toutes dériver des séquences d'origine africaine. Toutes ces études sont compatibles avec la même hypothèse : l'Homme moderne est né récemment, et viendrait d'Afrique. Nous serions tous «africains». Enfin, le chromosome Y a également été très utile pour révéler d'autres épisodes de l'histoire des populations : plusieurs vagues de migrations de populations *Out of Africa* ont conduit à la colonisation de l'Asie, puis de l'Amérique ; des populations néolithiques venant du Moyen-Orient ont bien migré vers l'Ouest (vers - 10 000), mais aussi le long d'un couloir qui les a menées jusqu'à l'Inde.

Bien que les généalogies déduites de l'étude du chromosome Y confirment généralement celles qui proviennent des autres chromosomes, il ne faut pas oublier que le chromosome Y ne représente que l'histoire paternelle d'une population. En effet, les résultats diffèrent parfois, pour une même population, selon que l'on utilise le chromosome Y, l'ADN mitochondrial ou les chromosomes non sexuels. Ces discordances tiennent à des facteurs socioculturels qui influent sur les migrations des hommes (représentés par les chromosomes Y) et des femmes (représentées par les ADN mitochondriaux). Des facteurs tels que la polygamie, l'exogamie patrilocale (la tendance des femmes à rejoindre, après leur mariage, la ville natale de leur mari), ou une tendance à la migration supérieure chez les femmes, modifient la répartition des chromosomes Y et des ADN mitochondriaux dans les populations étudiées.

Enfin, toutes ces données, associées à celles qui proviennent des autres disciplines (l'archéologie, l'histoire et la linguistique), nous donnent une idée assez vraisemblable de notre passé. Toutefois, bien que certaines variations génétiques semblent être associées préférentiellement (mais non-exclusivement) à certains groupes ethniques, les variations génétiques les plus importantes s'observent entre les individus d'une même population. Les différences observées entre les populations nous rappellent que ce sont nos différences qui nous rendent égaux.

Lluís QUINTANA-MURCI – Institut Pasteur
Laboratoire d'Immunogénétique humaine – INSERM E021
Évelyne HEYER – Musée de l'Homme

Karin JEGALIAN est rédactrice scientifique à l'Institut américain de la santé, NIH. Bruce LAHN est professeur de génétique à l'Université de Chicago.

Bruce LAHN et David PAGE, *Functional Coherence of the Human Y Chromosome*, in *Science*, vol. 278, pp. 675-680, octobre 1997.

Karin JEGALIAN et David PAGE, *Chromosomes Evolve to Become X Inactivated*, in *Nature*, vol. 394, pp. 776-780, Août 1998.

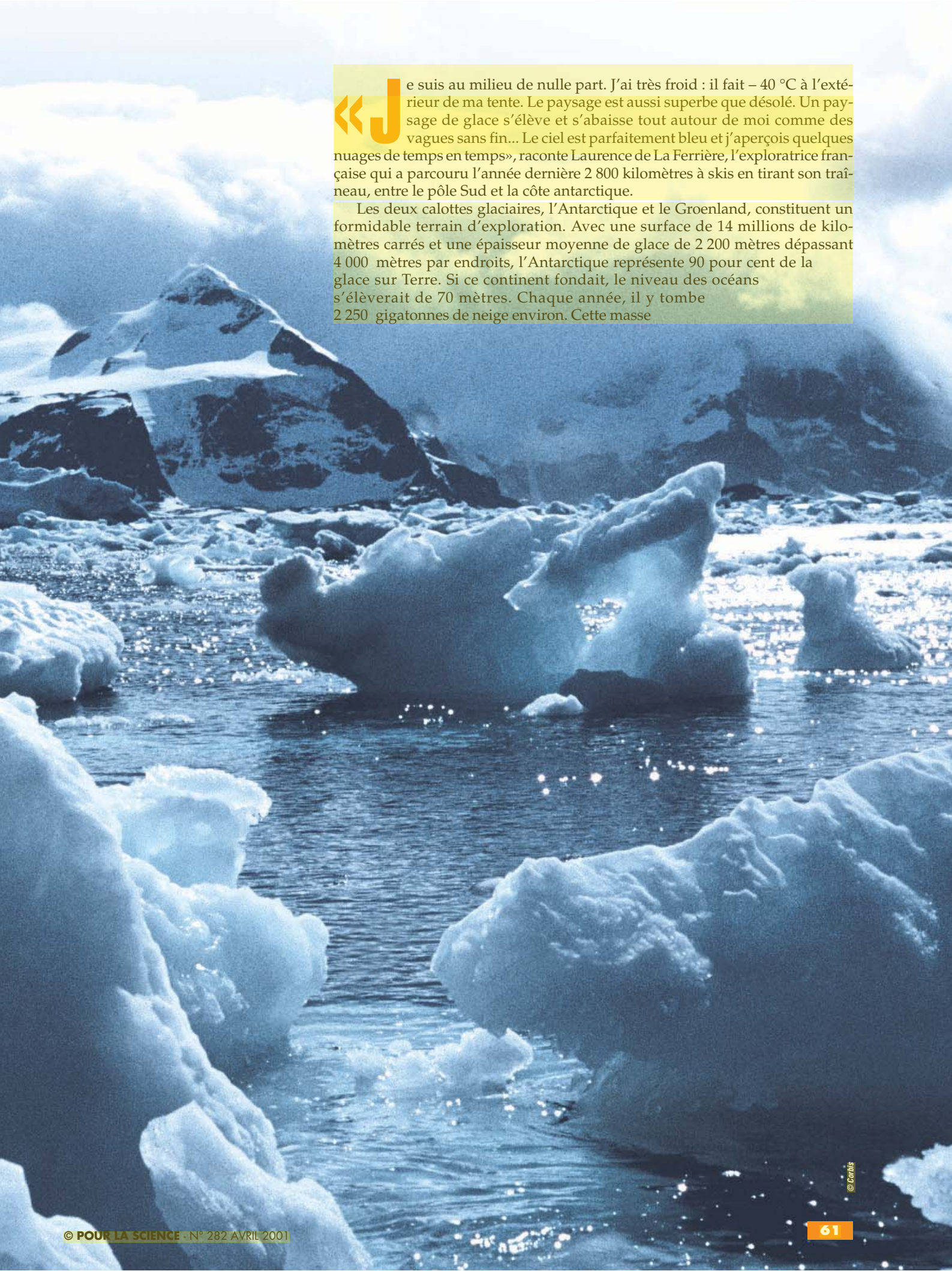
Bruce LAHN et David PAGE, *Four Evolutionary Strata on the Human X Chromosome*, in *Science*, vol. 286, pp. 964-967, octobre 1999.

Les calottes polaires

FRÉDÉRIQUE RÉMY • CATHERINE RITZ

Les calottes polaires ne sont pas les immenses blocs de glace stagnants que l'on imaginait. Elles sont traversées de glaciers qui s'écoulent rapidement à côté de zones stables. Grâce aux observations par satellite, on comprend mieux leur dynamique.





« Je suis au milieu de nulle part. J'ai très froid : il fait -40°C à l'extérieur de ma tente. Le paysage est aussi superbe que désolé. Un paysage de glace s'élève et s'abaisse tout autour de moi comme des vagues sans fin... Le ciel est parfaitement bleu et j'aperçois quelques nuages de temps en temps », raconte Laurence de La Ferrière, l'exploratrice française qui a parcouru l'année dernière 2 800 kilomètres à skis en tirant son traîneau, entre le pôle Sud et la côte antarctique.

Les deux calottes glaciaires, l'Antarctique et le Groenland, constituent un formidable terrain d'exploration. Avec une surface de 14 millions de kilomètres carrés et une épaisseur moyenne de glace de 2 200 mètres dépassant 4 000 mètres par endroits, l'Antarctique représente 90 pour cent de la glace sur Terre. Si ce continent fondait, le niveau des océans s'élèverait de 70 mètres. Chaque année, il y tombe 2 250 gigatonnes de neige environ. Cette masse

de glace correspond à un volume d'eau d'une hauteur de 6,5 millimètres dans les océans. Le Groenland, plus petit, stocke 10 fois moins de glace, mais, en raison d'un climat plus humide et moins froid, 500 gigatonnes de neige y sont toutefois déposées chaque année.

Ces gigantesques réservoirs de glace sont soumis aux variations du climat et les influencent aussi, probablement. Comment vont-ils réagir au réchauffement climatique qui marque les dernières décennies ? Ce réchauffement engendre une élévation du niveau de la mer estimée à 1,5 millimètre par an. Aujourd'hui, seuls les deux tiers de cette élévation sont expliqués. L'Antarctique et le Groenland y contribuent-ils ? Face à ces questions, les géophysiciens cherchent à modéliser la dynamique des calottes polaires. Cette modélisation se heurte aux mêmes difficultés que toutes celles qui mettent en jeu de nombreux mécanismes physiques. Elle rencontre un obstacle supplémentaire : la très grande diversité des échelles de temps. En effet, certains phénomènes, telles les chutes de neige, suivent «en direct» les variations climatiques, mais il faut des dizaines de milliers d'années pour qu'une fluctuation de température se propage vers le socle rocheux, à quelque 3 000 mètres de profondeur. La glace des

calottes est à la fois inerte, à cause du volume en jeu – elle subit encore les effets des perturbations climatiques qui ont eu lieu depuis des dizaines de milliers d'années –, et sensible, car une variation climatique, même faible, perturbe la calotte et met en jeu des quantités d'eau importantes. Pour interpréter les mesures (vitesses d'accumulation de la neige, taille des grains, etc.), on doit connaître à la fois l'évolution passée et contemporaine du climat qui règne aux pôles.

La modélisation est nécessaire à la fois à l'échelle locale – pour que l'on comprenne la dynamique de l'accumulation de la neige, par exemple –, et globale – afin que l'on évalue les conséquences du réchauffement sur les calottes, en établissant des modèles de dynamique des calottes polaires.

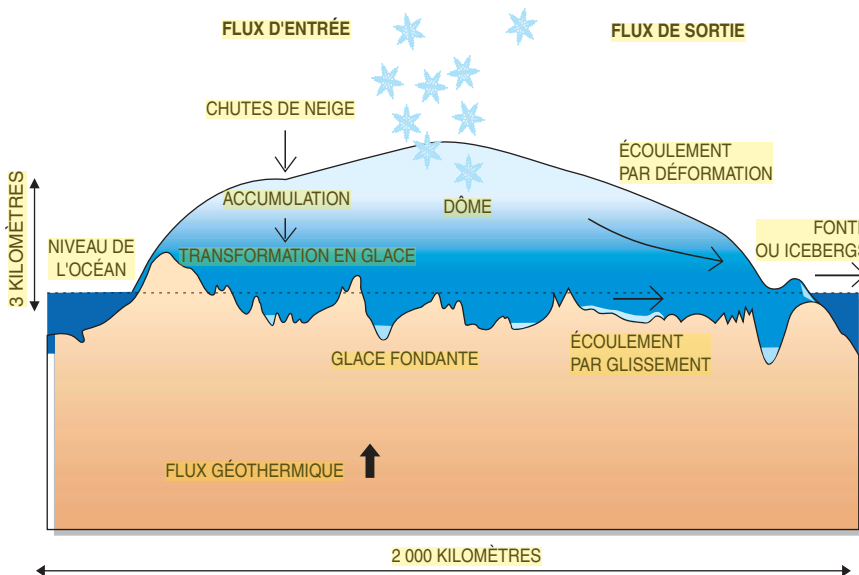
Schématiquement, cette dynamique est simple. La neige qui tombe se tasse, s'enfonce peu à peu et se transforme en glace. Puis, elle s'écoule très lentement, par gravité, du centre constitué d'un vaste plateau surélevé (le dôme) jusqu'à la mer (voir la figure 1). Les vitesses d'écoulement sont extrêmement faibles au centre, mais elles atteignent plusieurs centaines de mètres par an dans les glaciers dits «émissaires», c'est-à-dire qui évacuent la glace. Ces vitesses sont très hétérogènes d'une zone à une autre, contrairement à ce que l'on ima-

ginait il y a une dizaine d'années. Une fois sur la côte, toute la glace est évacuée sous forme d'icebergs en Antarctique. Au Groenland, la moitié de la glace est également rejetée sous forme d'icebergs, l'autre moitié fond dans la bande côtière, où les températures sont positives en été. Finalement, les calottes sont loin d'être des massifs de glace figés et, en réalité, leur dynamique est plus complexe que prévu. La forme et le volume de ces deux gigantesques calottes sont régis par l'équilibre entre les flux d'entrée (les précipitations neigeuses) et les flux de sortie (les icebergs et la fonte des glaces). On accumule des observations pour décrire et quantifier ces phénomènes.

L'observation des calottes polaires

Les toutes premières stations météorologiques automatiques ont été installées au début du XX^e siècle. Cependant, l'ère de l'observation «moderne» du Groenland et de l'Antarctique commence après la Première Guerre mondiale, notamment grâce à l'essor de l'aviation. Durant les années 1950, l'étude systématique de l'altitude et de l'épaisseur des glaces s'entame. La glace est transparente aux ondes radio de basses fréquences et opaque aux plus hautes fréquences. Quand on dirige un signal vers le sol, il se réfléchit à la surface de la glace ou à la surface du socle terrestre selon sa fréquence. On mesure le temps mis par les ondes pour effectuer l'aller et retour, et l'on en déduit à la fois la profondeur de la glace et son altitude.

À la même époque, on obtient les premières estimations de l'écoulement des calottes glaciaires, en comparant des repères placés sur la neige et d'autres fixés sur des affleurements rocheux. On creuse des puits pour y mesurer le gradient vertical de température, ainsi que la température à une profondeur de 10 mètres. La température de surface fluctue de -70 °C en hiver à -50 °C en été à Vostok, en Antarctique. Toutefois, on considère que la température à -10 mètres est proche de la température moyenne annuelle locale à la surface. Les précipitations annuelles de neige sont proportionnelles à cette température moyenne. Dans les puits, on estime aussi les hauteurs de neige accumulées, en comptant les couches d'hiver et d'été. Les couches d'hiver



1. LES CALOTTES POLAIRES ne sont pas figées. La neige tombe en surface, s'enfonce et se transforme en glace. Comme les calottes polaires sont en forme de parabole aplatie, la glace s'écoule vers la côte, soit par déformation, soit par glissement, quand la température est proche de 0 °C près du socle terrestre (à cause du réchauffement dû au flux géothermique) et que la glace fond. Le niveau de la mer détermine le contour de la calotte et influe sur la vitesse d'écoulement. Sous le poids de la glace, la croûte terrestre s'enfonce et, quand une calotte glaciaire disparaît, le socle remonte (isostasie). Aujourd'hui, par exemple, la Scandinavie continue à remonter, alors que la glace a disparu de cette région il y a 9 000 ans.