



8. LE NOYAU DE LA COMÈTE DE HALLEY, tel que la caméra de la sonde *Giotto* permit de l'observer en mars 1986. Bien que cette comète soit surtout composée de glace, elle réfléchit peu la lumière, car sa surface est recouverte d'un matériau carboné. Les observations dans l'infrarouge réalisées lors du passage de 1986 ont confirmé que la molécule d'eau y est bien la plus abondante.

printemps 1997, Hale-Bopp est une nouvelle venue dans notre ciel ; elle est particulièrement massive et brillante. Sa température de spin est égale à 25 kelvins. Hartley-2 est une comète périodique de dimensions plus ordinaires, dont la température de spin a été évaluée à 35 kelvins. Ces faibles valeurs sont un indice des conditions de température dans lesquelles se seraient formées ces comètes à grande distance du Soleil.

La mesure du rapport du deutérium et de l'hydrogène dans les comètes fournit une autre information sur la façon dont les objets du système solaire se sont formés. Les astrophysiciens cherchent notamment à découvrir l'origine des matières dont sont constituées les comètes. Proviennent-elles du milieu interstellaire ? De la nébuleuse protosolaire ? Le deutérium a été formé aux premiers âges de l'Univers par nucléosynthèse primordiale, en même temps que l'hydrogène et l'hélium ; depuis, il est en permanence détruit dans les étoiles, où la nucléosynthèse stellaire le convertit en hélium 3 (qui contient trois nucléons au lieu de deux, comme l'hélium ordinaire). Des mesures dans

les météorites ou dans le vent solaire nous livrent la valeur du rapport du deutérium et de l'hydrogène dans la nébuleuse solaire primitive : environ $2,5 \times 10^{-5}$. Les astrophysiciens ont aussi mesuré ce rapport dans le milieu interstellaire local (entre le Soleil et les étoiles voisines) à partir des transitions ultraviolettes du deutérium et de l'hydrogène, et ont trouvé une valeur comparable légèrement inférieure : $1,5 \times 10^{-5}$.

En revanche, ils ont observé que cette valeur était plus élevée dans le milieu interstellaire éloigné : certains types de molécules, HCN et H_2O notamment, y « concentrent » le deutérium ; le phénomène est dû à des réactions chimiques à basse température.

Les astrophysiciens ont voulu comparer ces valeurs à celles que l'on mesure sur une comète. Pour évaluer le rapport du deutérium et de l'hydrogène dans la comète de Halley, les astrophysiciens ont utilisé le spectromètre de masse de la sonde *Giotto* ; plus récemment, ils ont réalisé des mesures de la transition submillimétrique de la molécule HDO depuis la Terre pour les comètes Hyakutake et Hale-Bopp. Dans tous les cas, ils ont obtenu un rapport de quelque 3×10^{-4} , égal à environ dix fois la valeur protosolaire, et 20 fois celle du milieu interstellaire local. Cette valeur élevée indique que la composition chimique des comètes est proche de celle des glaces et des poussières du milieu interstellaire éloigné.

Ce résultat soulève une nouvelle question : comment peut-on expliquer l'écart entre les valeurs du rapport entre le deutérium et l'hydrogène dans les comètes et dans les océans terrestres ($1,5 \times 10^{-4}$) ? Cet écart nous apporte de nouveaux indices sur l'origine de l'atmosphère terrestre. En effet, si celle-ci provenait entièrement d'impacts météoritiques cométaires, comme l'hypothèse en a été avancée, son rapport deutérium sur hydrogène devrait être au moins égal à celui des comètes. En effet, on ne connaît aucun

mécanisme susceptible de diminuer ce rapport, tandis qu'il est possible, comme nous l'avons vu dans le cas de Mars et de Vénus, de l'augmenter par effet d'échappement gravitationnel. Cette observation indique que l'eau de l'atmosphère terrestre ne provient pas entièrement des comètes, mais résulte, au moins en partie, d'un dégazage du globe.

Du système solaire aux exoplanètes

La découverte récente de nombreuses planètes extérieures au système solaire ouvre une nouvelle dimension à l'étude de l'eau dans l'Univers. Nous l'avons vu, l'eau liquide a joué un rôle majeur dans le développement de la vie sur la Terre. Il est donc naturel de rechercher des formes de vie extraterrestres en priorité aux endroits où l'eau liquide peut exister (le satellite Europe, par exemple) ou a pu exister dans le passé (la planète Mars). Il en va de même avec les exoplanètes que nous découvrirons dans le futur : les astrophysiciens s'intéresseront en priorité à celles qui, *a priori*, peuvent porter de l'eau liquide. Cette possibilité n'existe que si l'orbite d'une exoplanète n'est pas trop proche de son étoile sinon, le rayonnement étant trop fort, l'eau s'échappe. Jusqu'à présent, les moyens de détection disponibles ont limité la chasse aux exoplanètes aux seules planètes géantes ; nous ne sommes pas encore en mesure de détecter les « exoterras ». Peut-être cette découverte sera-t-elle faite dans le cadre de la mission COROT, qui sera lancée par le Centre national d'études spatiales, en 2004 ; à moins qu'il ne faille attendre les missions suivantes, plus ambitieuses, que l'agence spatiale européenne et la NASA préparent pour la fin de la décennie. Si l'on découvre de l'eau liquide sur les planètes extérieures au système solaire, la biologie aura là un nouveau champ de recherche sur la vie en conditions extrêmes.

Thérèse ENCRENAZ est astrophysicienne au Département de recherche spatiale, DESPA, à l'Observatoire de Paris, à Meudon.

F. COSTARD, *La planète Mars*, collection Que sais-je, Presses Universitaires de France, 2000.

Les terres célestes, dossier hors-série *Pour la Science*, avril 1999.

Th. ENCRENAZ et P. COX, *L'eau dans l'Univers*, compte-rendu de l'Académie des Sciences, Paris, tome I, série IV, pp. 981-993, 2000.

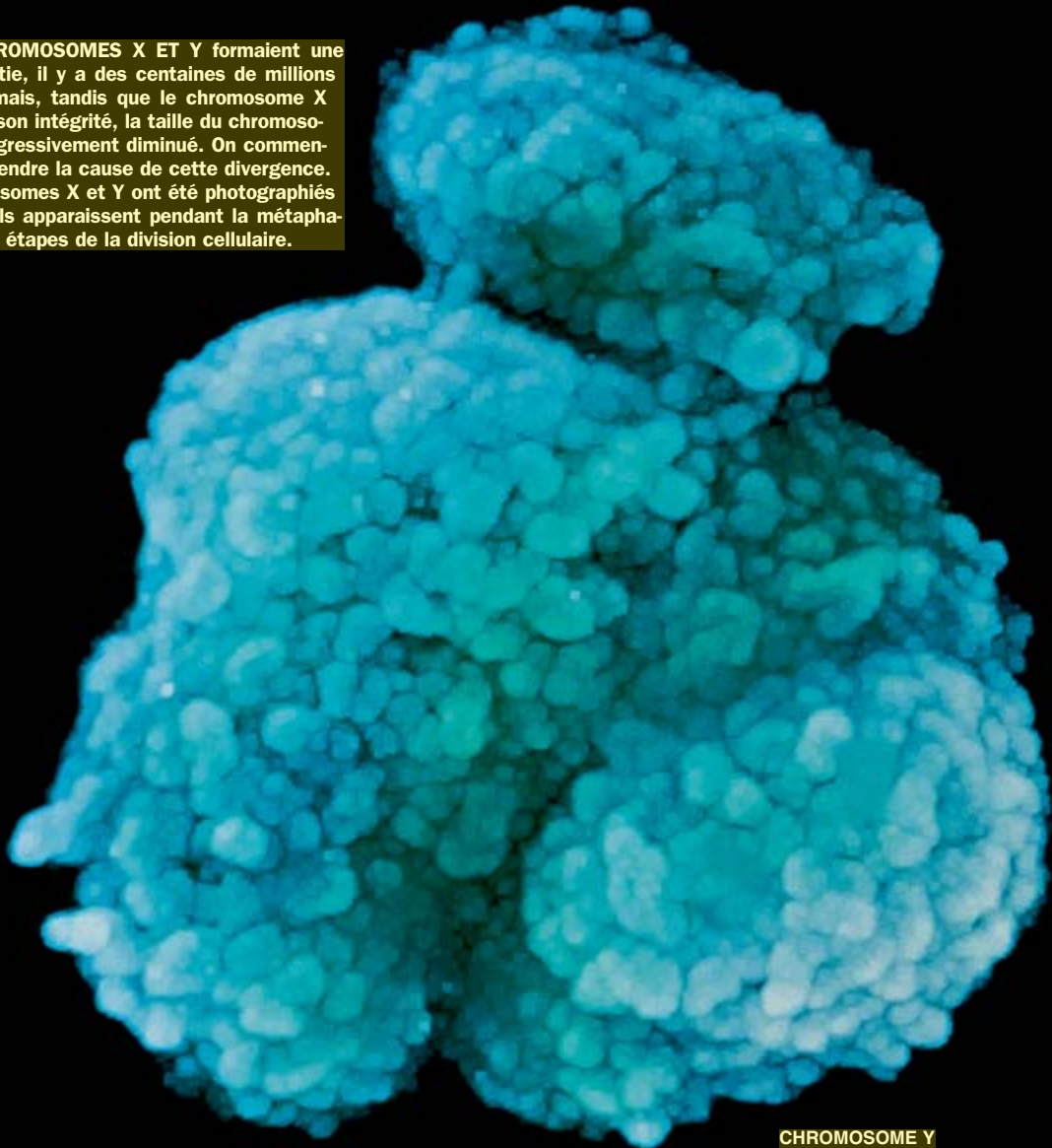
www.sat-net.com/spnews/syssol.html

L'étonnant chromosome Y

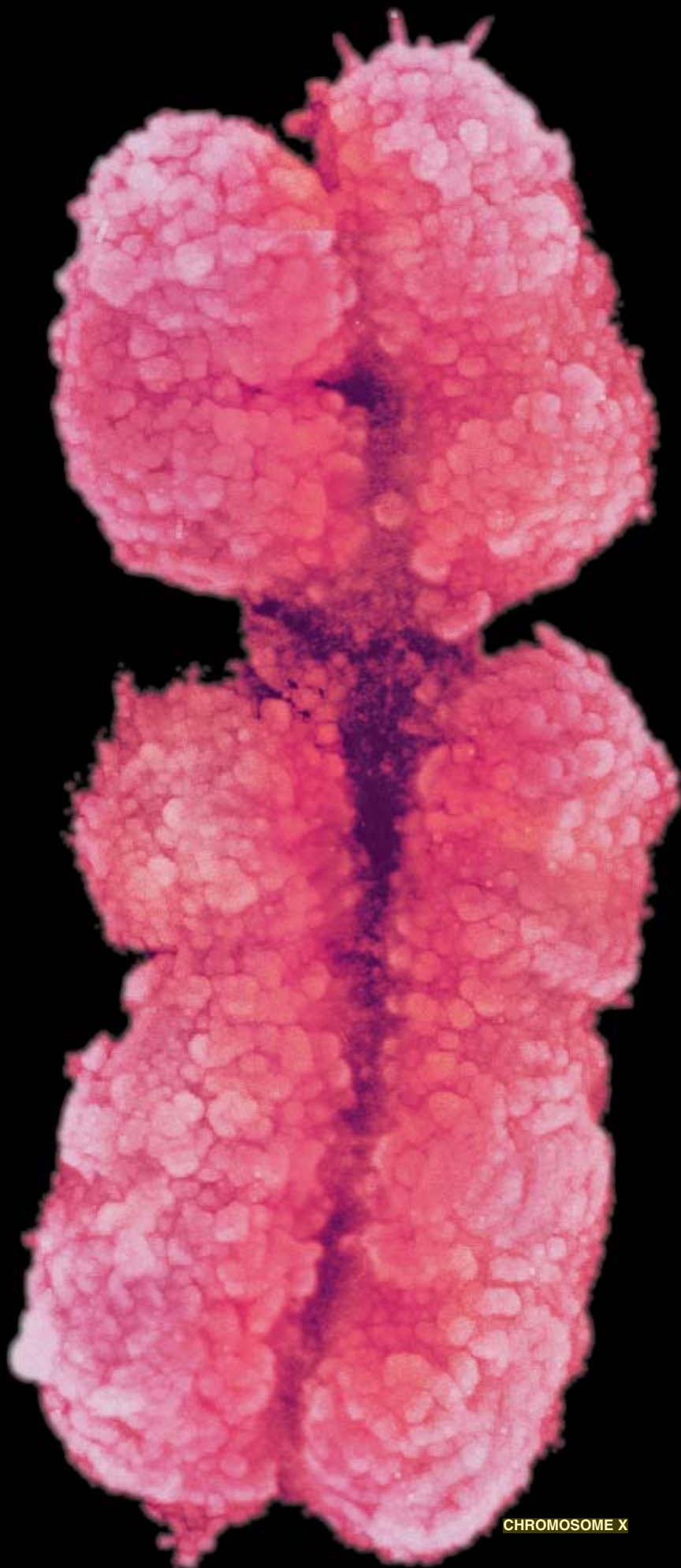
KARIN JEGALIAN • BRUCE LAHN

Nos chromosomes X et Y forment un couple étrange : X ressemble à n'importe quel chromosome, tandis que Y – à l'origine de la virilité – est vraiment singulier. Pourquoi les deux chromosomes sexuels diffèrent-ils à ce point?

1. LES CHROMOSOMES X ET Y formaient une paire assortie, il y a des centaines de millions d'années, mais, tandis que le chromosome X conservait son intégrité, la taille du chromosome Y a progressivement diminué. On commence à comprendre la cause de cette divergence. Les chromosomes X et Y ont été photographiés ici tels qu'ils apparaissent pendant la métaphase, une des étapes de la division cellulaire.



CHROMOSOME Y



CHROMOSOME X

Biophoto Associates Photo Researchers, Inc.

es chromosomes humains qui déterminent le sexe – le chromosome X et le chromosome Y – forment un couple curieux. Les 22 autres paires de chromosomes que contiennent chacune de nos cellules sont formées de partenaires bien assortis. Dans chaque paire, l'un des chromosomes vient de la mère et l'autre du père, mais tous deux ont normalement la même taille et portent les mêmes gènes (les gènes sont des morceaux d'ADN qui contiennent les informations pour la synthèse des protéines, lesquelles commandent pratiquement toutes les activités de l'organisme). Au contraire, le chromosome Y est notablement plus petit que le chromosome X ; en fait, il est minuscule et ne porte que quelques dizaines de gènes, contre 2 000 à 3 000 pour le chromosome X. De nombreux gènes portés par le chromosome Y n'ont pas d'équivalents sur le chromosome X. De surcroît, le chromosome Y contient une grande quantité d'ADN non codant, des séquences de nucléotides qui ne portent aucune instruction pour l'élaboration de protéines.

Récemment encore, les biologistes comprenaient mal comment le chromosome Y avait pu déchoir ainsi. Ils échafaudèrent plusieurs théories, mais n'avaient pas les moyens de les vérifier. Aujourd'hui, la situation a évolué, notamment grâce au Projet génome humain et aux efforts consentis pour le décryptage des séquences complètes des nucléotides des chromosomes X et Y et des 22 chromosomes qui n'interviennent pas dans la détermination du sexe. À la façon des paléontologues qui reconstituent l'évolution d'une espèce en comparant des squelettes d'animaux vivants et de fossiles, les biologistes moléculaires ont précisé l'évolution des chromosomes et des gènes en examinant les séquences d'ADN.

Les découvertes les plus récentes montrent que l'histoire des chromosomes sexuels a été mouvementée. Elle a été jalonnée d'«accidents» qui ont eu lieu sur le chromosome Y et de modifications compensatrices sur le chromosome X. Il ne fait aucun doute que ces bouleversements se poursuivent aujourd'hui.

En outre, le chromosome Y – longtemps considéré comme un faînéant, tout juste bon à commander

les programmes moléculaires de la masculinité – semble responsable de plus d'activités que la plupart des biologistes ne le soupçonnaient. Pendant plus de 300 millions d'années, le chromosome Y s'est arrangé à préserver chez les mâles une poignée de gènes importants pour la survie de l'espèce, et à en acquérir d'autres indispensables pour la fertilité. Aujourd'hui, les biologistes admettent que, malgré une apparence modeste, le chromosome Y a des fonctions biologiques essentielles pour la survie de l'espèce.

L'étude de l'évolution du chromosome Y a motivé nombre de biologistes qui voulaient découvrir les secrets de ce chromosome, mais qui y cherchaient aussi l'explication de certaines stérilités masculines, et le moyen d'y remédier : la découverte de gènes du chromosome Y, qui agissent sur la capacité de reproduction, pourrait aboutir à des traitements novateurs chez les hommes où ces gènes sont absents ou défectueux (voir l'encart de la page 57).

Les découvertes récentes sont l'aboutissement de travaux qui ont commencé il y a une centaine d'années. Jusqu'à la fin du XIX^e siècle, on pensait que l'environnement impose le sexe chez l'homme et chez les autres mammifères, tout comme cela se passe chez les reptiles : à un stade précoce du développement, la température de l'embryon fait basculer les mécanismes (encore mal compris) de détermination du sexe vers un mâle ou vers une femelle. Puis, au début du XX^e siècle, des biologistes comprirent que, chez certaines espèces, le sexe est déterminé par des chromosomes. Dans les années 1920, on montra que les mammifères ont effectivement des chromosomes (X et Y) qui déterminent le sexe au cours du développement embryonnaire.

Accumulation de preuves

Dans les décennies qui suivirent, on découvrit que le chromosome Y est responsable des caractères masculins et que les chromosomes X et Y avaient évolué à partir de chromosomes non sexuels (les autosomes), appariés chez un ancêtre éloigné. Heureusement, peu avant ou peu après l'apparition des mammifères, une mutation survenue dans une

petite région de la copie du chromosome non sexuel qui allait devenir le chromosome Y a eu pour conséquence que les embryons qui recevaient ce chromosome modifié (et son compagnon, le futur chromosome X) devenaient des mâles. Les embryons qui reçurent deux chromosomes X devinrent des femelles.

En 1990, des généticiens localisèrent la partie du chromosome Y qui est responsable du sexe masculin : c'est le gène *SRY* (pour *Sex determining region Y*, ou région du chromosome Y déterminant le sexe). La protéine codée par le gène *SRY* commande la formation des testicules, apparemment en activant des gènes situés sur divers chromosomes. La testostérone et d'autres substances fabriquées dans les testicules prennent alors le relais pour que les caractères mâles soient produits.

Les généticiens pensent que les chromosomes sexuels humains ont d'abord fait partie d'une paire bien assortie, parce que les extrémités des chromosomes X et Y sont restées identiques et qu'elles peuvent toujours se recombinaison : pendant la méiose (la division cellulaire à l'origine des spermatozoïdes et des ovules), les chromosomes assortis s'associent et échangent des segments. Chaque cellule reproductrice reçoit alors une copie de chaque chromosome non sexuel, ainsi qu'un chromosome sexuel. Bien que le chromosome Y ressemble peu au chromosome X, les extrémités de ces chromosomes s'alignent durant la méiose, chez les mâles, et échangent des segments comme si ces deux chromosomes faisaient encore une paire bien assortie (cet alignement est indispensable pour une répartition correcte des chromosomes dans toutes les cellules et, notamment, dans les spermatozoïdes).

La région du chromosome Y qui ne se recombine plus avec le chromosome X contient, elle aussi, une preuve de l'appariement ancien des chromosomes X et Y, puisqu'elle porte plusieurs gènes qui ont encore leur équivalent sur le chromosome X.

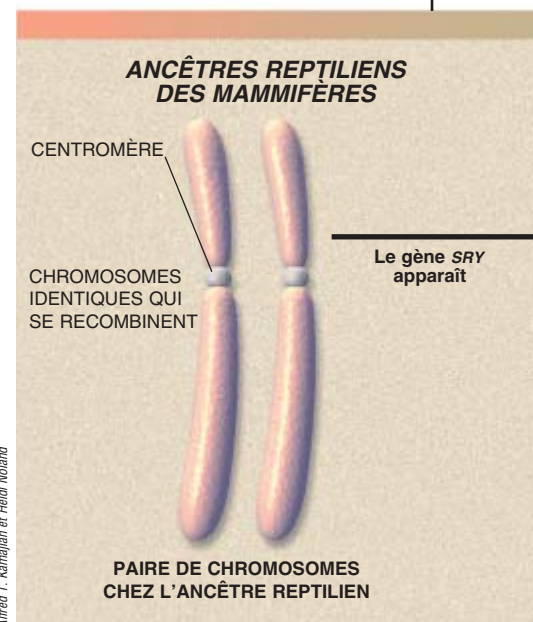
L'étude de cette région non recombinante, qui représente 95 pour cent du chromosome Y, révèle pourquoi ce chromosome n'est plus, aujourd'hui, que l'ombre de lui-même. Dans la nature comme en laboratoire, la recombinaison garantit le maintien de l'intégrité des chromosomes. Inversement, en son absence,

les gènes situés dans les régions non recombinantes accumulent des mutations délétères et, par conséquent, ils se dégradent, voire disparaissent. On a donc émis l'hypothèse que les échanges d'ADN entre d'importantes régions des chromosomes Y et X avaient cessé à la suite d'une raison qui avait entraîné la disparition des gènes de cette région non recombinante du chromosome Y... Encore restait-il à élucider cette cause. Plusieurs dizaines d'années s'écoulèrent sans que l'on y parvienne.

Une formation par étapes

Au cours des cinq dernières années, plusieurs questions ont trouvé leur réponse. Par exemple, en 1999, l'un d'entre nous (Bruce Lahn) montra, avec David Page, de l'Institut Whitehead de recherche biomédicale, à Cambridge, que le chromosome Y avait progressivement perdu sa capacité d'échanger de l'ADN avec le chromosome X. Au cours d'une première étape, une brèche fut ouverte dans l'ADN, à proximité du gène *SRY* ; puis la trouée s'élargit, se propageant en différents endroits du chromosome, sur presque toute sa longueur. Toutefois, seul le chromosome Y se détériora, à cause de l'arrêt des recombinaisons entre lui et le chromosome X, lequel resta capable de se recombinaison avec un autre chromosome X, lors de la méiose, chez les femelles.

IL Y A 350 MILLIONS D'ANNÉES



Alfred T. Kamejima et Heidi Noland