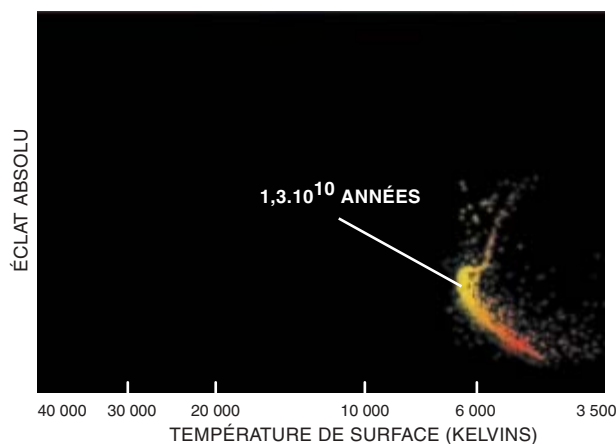
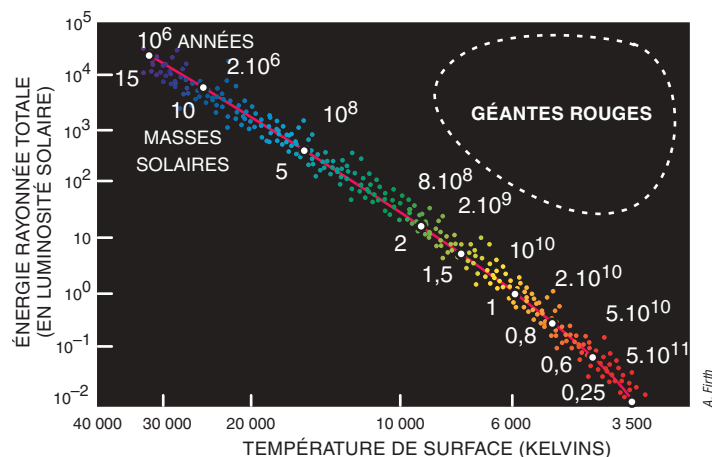




5. LE DIAGRAMME DE HERTZSPRUNG-RUSSELL, le plus important des diagrammes utilisés en astronomie, montre que la production d'énergie et la température des étoiles les placent toutes sur une portion de droite qui constitue la «séquence principale», où elles restent cantonnées tant que l'hydrogène est le combustible de base de leurs réactions thermonucléaires (à gauche). La température de surface d'une étoile est estimée grâce à la couleur correspondant à l'émission maximale d'énergie (du rouge pour les étoiles les plus froides au bleu pour les plus chaudes, en passant par le jaune des étoiles moyennes comme le Soleil). Quand l'étoile est proche de sa fin, elle quitte la séquence principale et bifurque vers la zone des géantes rouges (des

étoiles de basse température de surface, mais d'éclat important). Plus une étoile est massive, plus sa température de surface est importante et plus son séjour dans la séquence principale est court. Les astronomes ont reporté les éclats et les couleurs des étoiles brillantes de l'amas NGC 6652 (à droite), sur un digramme Hertzsprung-Russell. Ces étoiles ont toutes le même âge : 13 milliards d'années. Celles dont la durée de vie est inférieure à cet âge ont toutes disparu et sont donc absentes du diagramme. Les autres sont encore sur la séquence principale. Les étoiles qui épuisent leur hydrogène en 13 milliards d'années exactement sont actuellement en train de migrer vers la région des géantes rouges, trahissant ainsi l'âge de l'amas.

et la vitesse angulaire (sur la voûte céleste). Les astronomes mesurent chaque composante par des moyens différents. La vitesse radiale est obtenue par effet Doppler (lorsqu'une étoile s'éloigne de nous, la lumière qu'elle nous envoie est décalée vers les grandes longueurs d'onde d'une quantité proportionnelle à sa vitesse). La vitesse angulaire est estimée d'après une série de photographies prises sur plusieurs années. Pour une étoile, ces deux vitesses sont indépendantes. Pour un amas globulaire, où des milliers d'étoiles se déplacent au hasard, la vitesse radiale moyenne devrait être égale à la vitesse angulaire moyenne. Or, la mesure des vitesses radiales par effet Doppler est indépendante de la distance des étoiles, alors que le déplacement angulaire est d'autant plus faible que la distance est grande. De cette façon, les astronomes ont estimé l'éloignement des amas globulaires.

On déduit de cette méthode qu'*Hipparcos* a surestimé les distances qui nous séparent des amas globulaires, même s'ils semblent effectivement être plus lointains qu'on ne le pensait auparavant. Aujourd'hui, on estime que les amas les plus vieux ont environ 13 milliards d'années (à 1,5 milliard d'années près). Cette datation révisée est en accord avec la nouvelle estimation de l'âge de l'Univers fondée sur les dernières mesures de sa vitesse d'expansion

(environ 15 milliards d'années). Pour la première fois depuis la naissance de la cosmologie moderne, il y a un demi-siècle, les cosmologistes et les spécialistes de la physique stellaire sont parvenus à se mettre d'accord.

La datation des étoiles dans les amas globulaire n'est pas le seul moyen d'estimer l'âge de notre Galaxie, et d'autres méthodes donnent des résultats très similaires. Il y a quelques mois, Roger Cayrel et ses collègues de l'Observatoire de Paris ont appliqué aux étoiles une technique utilisée de longue date par les archéologues et par les géologues : la datation par des isotopes radioactifs. Ils ont d'abord effectué les premières mesures précises de la quantité d'uranium contenue dans une autre étoile que le Soleil : CS 31082-001, une vieille étoile de population II. Connaissant la vitesse à laquelle l'uranium disparaît et à l'aide d'hypothèses sur la quantité d'uranium qui était présente dans l'étoile lors de sa formation, R. Cayrel et ses collègues ont estimé

qu'il s'était depuis écoulé 12,5 milliards d'années, à trois milliards d'années près (voir l'encadré ci-contre).

À terme, les isotopes radioactifs pourraient supplanter les amas globulaires comme outils de datation des étoiles. Auparavant, les astronomes s'attacheraient à confirmer les estimations fondées sur l'étude des amas globulaires. De nouveaux télescopes au sol, tel le très grand télescope VLT de l'Observatoire européen austral, promettent de réduire encore l'incertitude sur la composition chimique des étoiles contenues dans les amas. De nouveaux observatoires spatiaux, comme le satellite *Gaia* de l'Agence spatiale européenne ou le satellite de la mission spatiale d'interférométrie SIM de la NASA, devraient, avec une résolution 250 fois supérieure à celle d'*Hipparcos*, déterminer directement la distance des amas les plus proches, supprimant les intermédiaires. Ils apporteront enfin une réponse définitive à une question qui tracasse les astronomes depuis plusieurs décennies.

Brian CHABOYER est professeur au département de physique et d'astronomie de l'Université Dartmouth, et participe à la mission d'interférométrie spatiale SIM de la NASA.

James KALER et W. FREEMAN, *Stars*, 1998.

Brian CHABOYER, *Globular Cluster Distance Determinations*, in *Post-Hipparcos Cosmic Candles*, sous la direction d'André

Heck et Filippina Caputa, Kluwer, 1999.

Mickael PERRYMAN, *Hipparcos : The Stars in Three Dimensions*, in *Sky and Telescope*, vol. 97, n° 6, juin 1999.

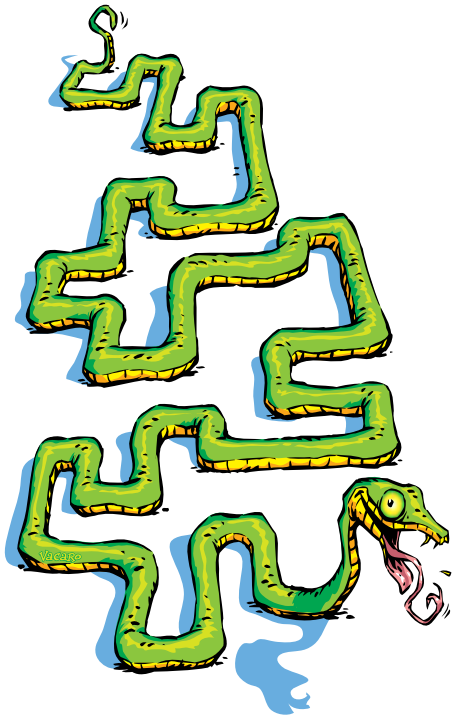
Yveline LEBRETON, *Stellar Structure and Evolution : Deductions from Hipparcos*, in *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 38, pp. 35-77, 2000.

Les chemins aléatoires

WENDELIN WERNER

Physiciens et mathématiciens progressent conjointement dans l'étude des courbes planes qui cheminent de façon hasardeuse.

Une conjecture de Benoît Mandelbrot a été élucidée.



C'est le lendemain de Noël. Le petit Grégoire, assis au milieu de sa chambre, contemple le cadeau dont il rêvait depuis des mois : un train électrique. La boîte qui contient les rails est énorme, elle lui arrive sous le menton. Grégoire imagine sa chambre envahie par la voie d'un chemin de fer tortueux. Reproduire les grandes lignes droites du TGV Paris-Lyon ne l'intéresse pas, il préfère les petites voies sinueuses de montagne qui, lacet après lacet, s'enfoncent à travers les reliefs. Pour obtenir ces lacets, il laissera le hasard guider le tracé de la voie ; celui-ci ne respectera pas de plan élaboré à l'avance, mais se

constituera par exemple au gré des courbes et des lignes droites piochées au hasard dans la boîte. Comme la boîte de rails ne contient ni aiguillage, ni pont, la voie de chemin de fer sera une longue courbe sinueuse qui ne se coupe pas. Grégoire se demande combien de tracés différents sont possibles avec un nombre donné de rails. Sa chambre n'est peut-être même pas suffisamment grande pour contenir un tracé constitué de tous les rails. Il passe son regard d'un mur à l'autre pour en estimer la taille. Combien de rails va-t-il pouvoir placer ?

Sous des apparences ludiques, les questions posées par Grégoire ont intri-

gué mathématiciens et physiciens depuis quelque soixante ans et cachent certains problèmes encore ouverts aujourd'hui.

On nomme des chemins qui ne repassent pas plusieurs fois par les mêmes points, des chemins auto-évitants. La nature nous en donne de nombreux exemples : rivières, contour de continents... Dans cet article, nous allons découvrir que certaines courbes aléatoires très irrégulières, comme la courbe verte de la figure 1, apparaissent naturellement comme des longs chemins auto-évitants construits à la manière de Grégoire. Tout d'abord, revenons un instant dans la chambre de celui-ci et tentons de répondre à sa première interrogation.

Le nombre de tracés

Combien Grégoire peut-il construire de voies de chemin de fer différentes ? Autrement dit, combien existe-t-il de chemins auto-évitants, tous constitués de n pas, dont les géométries sont différentes ? Considérons, parce que cela nous simplifie la tâche, que les uniques rails disponibles sont des segments identiques. Cette construction engendre des virages à angle droit, mais imaginons que le train de Grégoire est capable de s'en accommoder. Chaque nouveau rail peut prendre au plus trois orientations : les quatre directions Nord, Sud, Ouest et Est, moins celle d'où vient le tracé.

S'il est possible d'énumérer tous les tracés différents de faible longueur, il n'existe pas de formule explicite qui donne le nombre de tracés en fonction

1. MOUVEMENT BROWNIEN d'une particule dans un plan. La région explorée par la particule, représentée en noir, est une surface fermée qui contient des parties non explorées (zones en gris). Avec G. Lawler et O. Schramm, nous avons démontré mathématiquement la conjecture formulée par B. Mandelbrot : la frontière de la surface (dessinée en vert) est un chemin auto-évitant de dimension fractale $4/3$.