

sous le nom de trempe, au cours duquel l'acier cristallise sous une forme dépourvue de carbone nommée martensite. Comme nous le prévoyions, en l'absence de carbure, les motifs damassés qui en sont constitués avaient disparu.

Expériences cruciales

Pour les faire réapparaître, nous avons fait subir aux morceaux testés des cycles successifs de chauffage qui portaient le métal à 50 °C au-dessous de la température critique A_{cm} ; ensuite, nous les laissions refroidir lentement à l'air libre. Chaque cycle devait ainsi laisser le temps aux particules de carbure de croître et de subir une microségrégation. Après le premier cycle, les particules de carbure réapparaissaient, mais étaient réparties au hasard dans la masse du métal. Après un ou deux cycles supplémentaires, elles commençaient à s'aligner suivant des bandes diffuses et, après six à huit cycles, les bandes apparaissaient nettement. Ainsi, dans la masse du métal de nos échantillons, il existait bien des zones qui favorisent la présence des particules de carbure.

Dans l'une de nos expériences, nous avons porté la température de chauffage bien au-delà de la température critique A_{cm} (à 1 200 °C, juste au-dessous du point de fusion de l'acier) et nous l'avons maintenue pendant 18 heures. Les cycles thermiques ultérieurs ont vu réapparaître les particules de cémentite, mais elles ne se sont pas rassemblées en bandes bien distinctes. Or, les calculs montrent qu'au cours d'un traitement à si haute température, la diffusion des atomes l'emporte sur la microségrégation et efface les zones de concentration élevée en impuretés.

Dans une autre expérience, notre alliage ne contenait aucune impureté. Dans ce cas, même après de nombreux cycles de chauffage et de refroidissement, les particules de carbure de fer formées dans les lingots ne se ras-

semblaient jamais en bandes de cémentite, ni même en amas un tant soit peu distincts. Dès que nous ajoutions les impuretés à ces mêmes lingots, les moires de cémentite réapparaissaient.

Aujourd'hui, nous sommes en mesure d'expliquer comment les forgerons d'autrefois parvenaient à faire apparaître des échelles de Mahomet. Nos travaux ont confirmé l'une des théories avancées par le passé, selon laquelle les « barreaux » de l'échelle étaient produits en creusant des rainures sur la lame. Nous avons fabriqué une lame dont l'épaisseur était proche du résultat final désiré ; puis nous avons pratiqué une série d'entailles qui ont été, au cours des derniers cycles de forgeage, martelées pour être comblées. Ce procédé qui tasse le métal, réduit la surface de l'entaille et resserre d'autant l'espacement entre les bandes qui s'y trouvaient (*voir l'encadré de la page 52*). Le motif rond, entre les barreaux de l'échelle, est connu sous le nom de rosace, et se retrouve sur certains des cimenterres les plus anciens. On l'obtient de manière analogue, en creusant des trous peu profonds dans le métal au même moment que les rainures.

Pourquoi le secret de fabrication des aciers damassés a-t-il été perdu il y a 200 ans ? Les quatre lames anciennes que nous avons analysées contenaient toutes du vanadium, présent à l'origine dans les lingots de wootz à partir desquels elles ont été forgées, et qui semble expliquer la présence des bandes de cémentite. Toutefois, on imagine facilement que si, en raison de l'évolution des échanges commerciaux, les lingots fournis ne contenaient plus les impuretés requises, les forgerons du Moyen-Orient ne pouvaient plus faire apparaître les merveilleux motifs de leurs lames, sans comprendre pourquoi. Si cet état de fait a persisté, après une ou deux générations, le secret de la légendaire épée de Damas a dû se perdre. Aujourd'hui, le voile recouvrant ce mystère semble avoir été levé.

John VERHOEVEN est professeur émérite de science des matériaux et d'ingénierie de l'Université de l'Iowa.

J.D. VERHOEVEN, A.H. PENDRAY et W.E. DAUKSCH, *Archaeotechnology : The Key Role of Impurities in Ancient Damascus Steel Blades*, in JOM : A Publication of

the Minerals, Metals and Materials Society, vol. 50, n° 9, pp. 58-64, septembre 1998.

Cyril S. SMITH, *History of Metallography : The Development of Ideas on the Structure of Metals before 1890*, MIT Press, 1988.

Leo S. FIGIEL, *On Damascus Steel*, Atlantis Arts Press, 1991.

L'âge des plus anciennes étoiles

BRIAN CHABOYER

Les plus anciennes étoiles de la galaxie semblaient plus âgées que l'Univers. Ce paradoxe est enfin levé grâce aux données fournies par le satellite Hipparcos et aux progrès de la physique stellaire.

Il y a quelques années, les débats sur le «paradoxe de l'âge de l'Univers» agitaient la communauté des astrophysiciens. Les mesures de la vitesse d'expansion de l'Univers semblaient indiquer qu'il ne s'était écoulé que 14 milliards d'années depuis le Big Bang, alors que certaines étoiles étaient bien plus âgées. À l'époque, la plupart des astronomes croyaient davantage aux méthodes de datations des étoiles qu'aux théories cosmologiques. Les cosmologistes étaient donc sommés de trouver la solution au problème.

Comme dans d'autres domaines, une question qui ne trouvait pas de réponse compatible avec les théories en usage nous a mis sur la piste d'une découverte fondamentale. Les débats sur l'âge de la Terre ont aidé Charles Darwin à formuler sa théorie de l'évolution par sélection naturelle ; les désaccords sur l'âge du Soleil n'ont pu être résolus qu'avec la découverte de la physique nucléaire, et les physiciens comme Albert Einstein n'abandonneront l'idée d'un Univers statique et éternel, pourtant remise en cause par la relativité générale, que lorsqu'Edwin Hubble observa que les galaxies s'éloignent de nous.

De la même façon, on peut dire que la crise ouverte par le paradoxe de l'âge de l'Univers fut le premier acte de la prise de conscience que l'Univers est dominé non pas par la matière ordinaire, mais par un type d'énergie dite sombre dont les cosmologistes ignorent presque tout, si ce n'est qu'elle semble accélérer l'expansion de l'Univers. Cette accélération cosmique a pour conséquence de reculer la date

calculée de l'origine de l'Univers et promet de lever le paradoxe.

La vitesse d'expansion de l'Univers faisait l'objet d'un débat souvent virulent depuis un demi-siècle (les estimations effectuées par différentes équipes variaient du simple au double!). En revanche, l'estimation de l'âge des plus anciennes étoiles de la Galaxie, réalisée notamment par Pierre Demarque de l'Université Yale, était, elle, très fiable. Depuis le milieu des années 1960, les modèles théoriques prédisaient que les étoiles les plus vieilles étaient âgées de 15 milliards d'années, et cette estimation était acceptée par l'ensemble des spécialistes de physique stellaire. Cette certitude a été ébranlée il y a cinq ans, quand les données fournies par le satellite de cartographie céleste en trois dimensions, *Hipparcos*, associées aux nouveaux modèles de l'évolution des étoiles, ont forcé les astronomes à revoir à la baisse l'âge des étoiles les plus anciennes : elles n'ont «que» 13 milliards d'années!

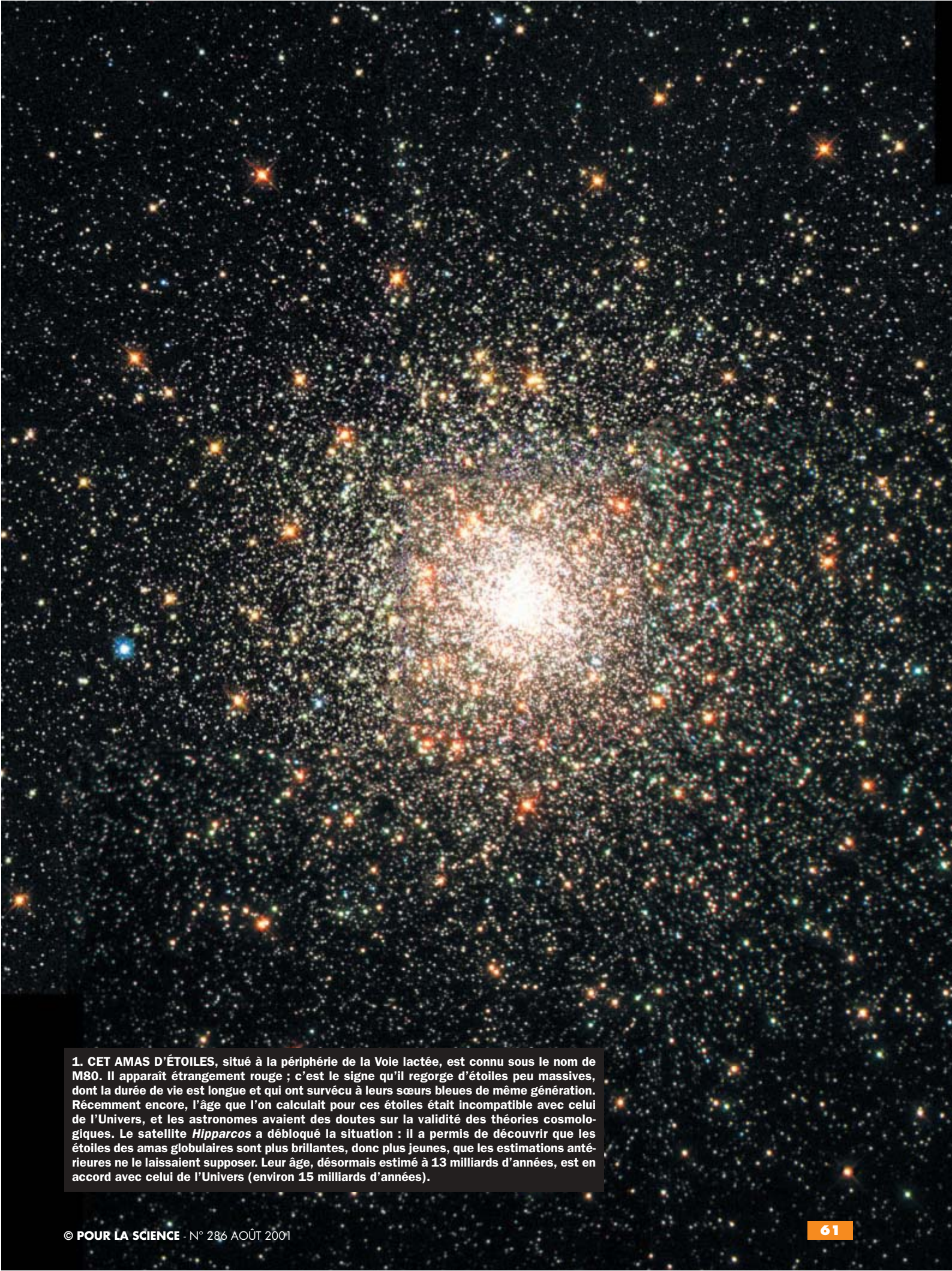
Consommation stellaire

Comment peut-on estimer l'âge d'une étoile? Imaginez que le compteur kilométrique de votre voiture ne fonctionne plus. Comment connaître la distance qu'elle a parcourue? Le problème est facile à résoudre si vous connaissez la capacité du réservoir et la consommation au kilomètre de votre véhicule : il suffit de diviser la quantité de carburant utilisée par la consommation. La méthode employée dans le cas des étoiles est analogue. La taille du réservoir est remplacée par la masse de l'étoile, et la

consommation au kilomètre par le rendement des réactions nucléaires.

Les étoiles sont des boules de plasma chaud en équilibre. Elles tendent à s'effondrer sur elles-mêmes sous l'effet de leur propre poids, mais l'énergie thermique interne et la pression exercée par la lumière qu'elles rayonnent les en empêchent. Comme les étoiles déversent de l'énergie dans l'espace, elles devraient perdre leur feu intérieur et se contracter rapidement en vieillissant (dans ce cas, le Soleil, par exemple, n'aurait vécu que quelques millions d'années en tout). Heureusement, des réactions thermonucléaires qui ont lieu dans leur cœur fournissent l'énergie nécessaire pour maintenir cet équilibre pendant très longtemps, parfois quelques milliards d'années.

Pendant l'essentiel de leur vie, les étoiles sont alimentées par la fusion thermonucléaire de l'hydrogène en hélium. Cette réaction ne peut avoir lieu qu'aux très hautes températures qui règnent dans le cœur des étoiles (de quelques millions à quelques centaines de millions de degrés). Dans ces conditions, la vitesse moyenne d'agitation des noyaux atomiques est suffisante pour leur permettre de se rencontrer malgré la répulsion électrostatique qu'ils exercent les uns sur les autres. Le bilan de la réaction est le suivant : quatre noyaux d'hydrogène (constitués chacun d'un unique proton) donnent un noyau d'hélium (comportant deux protons et deux neutrons). Quatre protons pèsent 0,7 pour cent de plus qu'un noyau d'hélium ; au cours de la fusion, la fraction de masse manquante a été convertie en énergie selon l'équation d'Einstein $E = mc^2$. Le



1. CET AMAS D'ÉTOILES, situé à la périphérie de la Voie lactée, est connu sous le nom de M80. Il apparaît étrangement rouge ; c'est le signe qu'il regorge d'étoiles peu massives, dont la durée de vie est longue et qui ont survécu à leurs sœurs bleues de même génération. Récemment encore, l'âge que l'on calculait pour ces étoiles était incompatible avec celui de l'Univers, et les astronomes avaient des doutes sur la validité des théories cosmologiques. Le satellite *Hipparcos* a débloqué la situation : il a permis de découvrir que les étoiles des amas globulaires sont plus brillantes, donc plus jeunes, que les estimations antérieures ne le laissaient supposer. Leur âge, désormais estimé à 13 milliards d'années, est en accord avec celui de l'Univers (environ 15 milliards d'années).

Soleil, par exemple, émet 4×10^{26} watts de rayonnement électromagnétique (essentiellement sous forme de lumière visible), ce qui équivaut à quatre millions de tonnes de matière transformées en énergie chaque seconde. Ainsi, chaque seconde, 600 millions de tonnes d'hydrogène sont transmutes en 596 millions de tonnes d'hélium.

À ce rythme, le Soleil brûle environ un pour cent de sa masse en un milliard d'années. Étant donné que seuls dix pour cent de la masse du Soleil seront utilisables comme combustible (c'est la proportion qui atteint, au centre de l'étoile, la température et la densité nécessaires), le Soleil tirera son énergie de la fusion de l'hydrogène pendant dix milliards d'années. Au cours de cette période, que l'on nomme séquence principale de l'étoile, sa luminosité et sa température resteront à peu près constantes.

La datation d'une étoile – ou plutôt d'une population d'étoiles – repose sur le fait que la durée de la séquence principale varie d'une étoile à l'autre. Les étoiles plus massives que le Soleil brûlent leur hydrogène beaucoup plus vite, si vite que, même avec une quantité initiale de combustible largement supérieure, elles épuisent leurs réserves plus rapidement. Cette tendance peut être déduite des lois physiques qui gouvernent la structure d'une étoile : la loi de l'équilibre hydrostatique (qui traduit l'équilibre entre la force de gravitation et la pression du gaz), la loi des gaz parfaits (qui relie la pression, la température et la densité) et la loi du transport radiatif de la chaleur (qui détermine le gradient de température nécessaire pour que l'étoile libère de l'énergie vers l'extérieur au même rythme qu'elle en produit dans son cœur). On en déduit que la luminosité d'une étoile est proportionnelle à sa masse à la puissance quatre. Par ailleurs, la quantité d'hydrogène disponible est, quant à elle, directement proportionnelle à la masse. Par conséquent, la durée de vie d'une étoile sur la séquence principale est approximativement proportionnelle à l'inverse du cube de sa masse. Une étoile 10 fois plus massive que le Soleil est 10 000 fois plus brillante, mais vit 1 000 fois moins longtemps, soit dix millions d'années environ. Les étoiles massives brûlent la chandelle par les deux bouts : elles brillent beaucoup, mais au prix d'un terrible gaspillage et d'une vie très courte.

Une étoile qui quitte la séquence principale est facile à reconnaître. Son

cœur se contracte et s'échauffe de sorte qu'il continue à produire des réactions nucléaires (par exemple en fusionnant les noyaux d'hélium). Les couches supérieures de l'étoile sont repoussées vers l'extérieur et l'astre gonfle comme un ballon de baudruche. Chaque unité de surface de l'étoile reçoit moins d'énergie en provenance du cœur et le disque stellaire rougeoie, au lieu d'être chauffé à blanc. L'étoile est devenue une géante rouge, un stade caractérisé par une plus grande luminosité, mais aussi par une température de surface inférieure. Cette évolution est facile à observer lorsqu'on classe les étoiles en fonction de leur couleur (qui dépend directement de la température de surface) et de leur éclat (qui dépend de l'énergie lumineuse émise totale). Un tel diagramme, dit de Hertzsprung-Russell, rassemble pratiquement toutes les données disponibles pour les astronomes. Les étoiles de la séquence principale se répartissent sur un segment de droite oblique qui va des étoiles petites, froides (donc rouges) et peu brillantes aux étoiles massives, chaudes (donc bleues) et très lumineuses. Quand l'étoile devient une géante rouge, elle quitte la séquence principale et se retrouve dans un domaine du diagramme correspondant aux basses températures mais à de grandes valeurs de l'éclat lumineux (voir la figure 5).

La datation des plus anciennes étoiles

Bien que les astronomes puissent calculer la durée de vie totale d'une étoile, il est difficile de savoir combien de temps elle a déjà vécu. Une étoile de la séquence principale est un modèle de stabilité et on ne sait pas lui attribuer un âge précis jusqu'à ce qu'elle commence à évoluer et trahisse ainsi son grand âge. Pour cette raison, les astronomes étudient généralement des populations entières d'étoiles dont ils peuvent supposer qu'elles sont nées à peu près au même moment. Dans un tel groupe, certaines étoiles – les plus massives – sont en train de quitter la séquence principale au moment où nous les observons, même si les autres ne portent encore aucun stigmate du passage du temps. On peut dater les étoiles qui quittent la séquence principale et attribuer leur âge au groupe tout entier.

Les plus anciennes étoiles semblent être localisées au sein de groupements stellaires nommés amas globulaires. Ce sont des concentrations stellaires com-

pactes et denses, renfermant de 100 000 à quelques millions d'étoiles au sein d'une sphère d'une centaine d'années-lumière de diamètre. Alors que 75 pour cent des étoiles de notre Galaxie (y compris le Soleil) se répartissent dans un grand disque aplati (la Voie lactée), les amas globulaires se trouvent dans un halo sphérique qui englobe tout le disque. D'autres grandes galaxies contiennent également des amas globulaires répartis de la même façon.

La localisation des amas nous renseigne assez bien sur leur âge. En effet, dans les années 1930, l'astronome d'origine allemande Walter Baade a montré que les étoiles de notre Galaxie se classent en deux catégories. La «population I» contient des étoiles brillantes et bleues qui, étant massives, ont une durée de vie courte et doivent être jeunes. On ne les trouve que dans le disque galactique. L'autre catégorie, la «population II», regroupe les étoiles du halo, qui sont en général moins brillantes et plus rouges. Aujourd'hui, nous connaissons l'origine de ces deux populations distinctes : le disque contient de nombreux nuages de gaz à partir desquels de nouvelles étoiles peuvent se former, ce qui explique qu'il renferme quantité de jeunes étoiles flamboyantes. À l'opposé, le halo de notre Galaxie manque de gaz, et peu d'étoiles nouvelles s'y forment.

En fait, les amas sont peut-être un reliquat des briques fondamentales qui ont contribué à la formation de notre Galaxie. Leurs étoiles contiennent peu d'éléments plus lourds que l'hélium. Ces éléments, que les astronomes nomment métaux (à la grande consternation des chimistes), constituent environ deux pour cent de la masse du Soleil, mais seulement 0,01 à 0,5 pour cent de la masse d'une étoile d'amas globulaire. Ils ne peuvent être créés que par les réactions thermonucléaires qui ont lieu dans le cœur des étoiles. La rareté de ces éléments dans les étoiles des amas globulaires indique qu'elles se sont formées peu après le Big Bang, à partir de matériaux qui n'avaient pas encore été «pollués» par les produits des générations successives d'étoiles.

Il semble que les étoiles d'un amas globulaire donné aient toutes le même âge. On constate cette homogénéité lorsque l'on place les étoiles d'un amas dans un diagramme de Hertzsprung-Russell. Dans la séquence principale, les étoiles de masse relativement faible et à longue durée de vie sont légion,



2. LA NÉBULEUSE NGC 3603 contient des étoiles à différents stades de leur évolution. Au centre, un amas de jeunes étoiles massives et bleues s'est formé il y a quelques millions d'années seulement (1). Elles émettent un intense rayonnement ultraviolet et un flux de particules qui éclairent leur matrice de gaz et de poussière et la repoussent. Des zones de plus forte densité (2) résistent mieux à cette érosion et forment des «piliers» de gaz qui pointent vers l'amas. Un zoom sur le sommet de structures semblables dans la nébuleuse de l'Aigle (2b) montre de petits ergots encore plus denses. Cette fragmentation du nuage en éléments de plus en plus concentrés est le prélude à la formation de globules de Bok (3), puis à leur effondrement en une masse sphérique protostellaire. Sur la

même image, on observe une protoétoile (4) qui ne survivra probablement pas au souffle intense de ses grandes sœurs. D'autres protoétoiles ont été photographiées dans la nébuleuse d'Orion (4b et 4c) : autour de l'étoile en train de briller de ses premiers feux, on observe un disque de poussière qui formera vraisemblablement un système de planètes. Arrivée à la fin de sa vie, une étoile massive devenue géante est prise de violents «hoquets» qui éjectent le gaz de ses couches supérieures (5 et 6). Elle explosera violemment en supernova et restituera dans l'espace la matière qu'elle aura transmuté tout au long de sa vie. L'image en médaillon (5b) montre les restes d'un tel cataclysme observé en 1987 dans le Grand nuage de Magellan.

mais les étoiles les plus massives ont toutes disparu : elles ont évolué en géantes rouges, puis sont mortes. Seules subsistent, sous forme de géantes rouges, celles qui sont en train de quitter la séquence principale à la date où nous observons. Ainsi, les étoiles de l'amas se répartissent sur une ligne en forme de coude : la séquence principale se termine de façon abrupte, là où la branche des géantes rouges la rejoint (voir la figure 5). Cette coupure de la séquence principale confirme que les étoiles de l'amas se sont toutes formées à la même période.

Dès lors, la détermination de l'âge des amas globulaires devrait être un exercice relativement simple. Les astronomes établissent un diagramme de Hertzsprung-Russell pour un large échantillon d'étoiles de l'amas. Le diagramme révèle les étoiles qui viennent d'épuiser leur réserve d'hydrogène. On déduit de la luminosité et de la température de surface de ces étoiles une masse et, par conséquent, un âge. Dans la pratique, trois facteurs compliquent la tâche. La composition chimique exacte des étoiles modifie leur structure et leur évolution. Par ailleurs, la méthode dépend beaucoup de la fiabilité des modèles théoriques qui décrivent le

fonctionnement des étoiles. Pour finir, il est difficile de connaître la luminosité réelle d'une étoile (sa luminosité intrinsèque), car nous n'avons accès qu'à son éclat apparent vu de la Terre.

De l'influence des «métaux» sur l'âge des étoiles

Bien que les métaux ne constituent qu'une toute petite fraction de la masse d'une étoile, ils agissent sur sa structure. Ces éléments contribuent à la masse de l'étoile, mais ne subissent pas de fusion. Ils réduisent l'efficacité de la chaudière nucléaire, de sorte que le cœur de l'étoile doit être plus chaud pour maintenir l'équilibre. De plus, les métaux absorbent la lumière et entravent l'évacuation de l'énergie stellaire dans l'espace. Sous l'effet de cette absorption, l'étoile enfle ; le même flux d'énergie est réparti sur une surface plus grande, et la température de surface décroît. En conséquence, une étoile pauvre en métaux est plus brillante qu'une étoile de même masse riche en métaux, et sa température de surface est supérieure. Quand les astronomes surestiment le contenu en métaux d'une étoile, ils surestiment sa masse et, par conséquent, sous-estiment son âge.

Pour établir la composition d'une étoile, les astronomes analysent son spectre. Le spectre visible d'une étoile, obtenu en décomposant la lumière que nous en recevons, est continu mais strié de raies sombres qui correspondent aux longueurs d'onde caractéristiques absorbées par les différents éléments chimiques présents dans les couches externes de l'astre. Depuis une vingtaine d'années, grâce à la construction des grands télescopes et à l'introduction de détecteurs électroniques très sensibles, les astronomes obtiennent des spectres dont la résolution réduit notablement les erreurs de mesure (elles sont divisées par trois). À l'aide du télescope Keck de l'Observatoire d'Hawaii, Judith Cohen, de l'Institut californien de technologie, Raffaele Gratton, de l'Observatoire astronomique de Padoue, et leurs collègues ont récemment déterminé l'abondance des métaux dans les amas globulaires NGC 6528 et NGC 6553 avec une précision inégalée.

Ces compositions chimiques étant connues, reste la deuxième difficulté : les modèles théoriques ne sont que des approximations de la situation réelle au sein des étoiles. L'étude approfondie du Soleil a récemment révélé les limites de ces modèles. Jørgen Christensen-Dalsgaard, de l'Université d'Århus au Danemark, David Guenther, de l'Université Saint Mary, en Nouvelle-Écosse, et leurs collègues ont, par exemple, précisé notre connaissance de l'intérieur du Soleil en étudiant comment les ondes sismiques – analogues à celles qui parcourent la Terre – se propagent à l'intérieur du Soleil. L'étude de la propagation de ces ondes nous renseigne sur les variations de pression et de densité dans le Soleil et indiquent la présence de courants de convection ou de zones turbulentes dans le plasma solaire. Leur modèle fait apparaître que l'hélium doit



R. Rich, K. et J. Neill, W. Freedman et NASA



D. Figer et NASA

3. L'AMAS GLOBULAIRE G1 est un groupement gigantesque d'étoiles (a) situé dans le halo de la galaxie d'Andromède (une galaxie géante semblable à la nôtre). L'amas des quintuplets (b), situé près du centre de notre Galaxie, est d'un genre très différent. Il s'agit d'un amas ouvert, un groupement très récent d'étoiles peu nombreuses. Il n'est pas stable, et les astres qui le composent dérivent dans l'espace et s'éloignent les uns des autres. Cependant, dans les deux cas, les étoiles regroupées en amas sont nées au même moment. On remarque que les étoiles ont des couleurs différentes correspondant à des températures de surface qui peuvent varier de quelques dizaines de milliers de degrés (en bleu) à environ 4 000 degrés (en rouge).

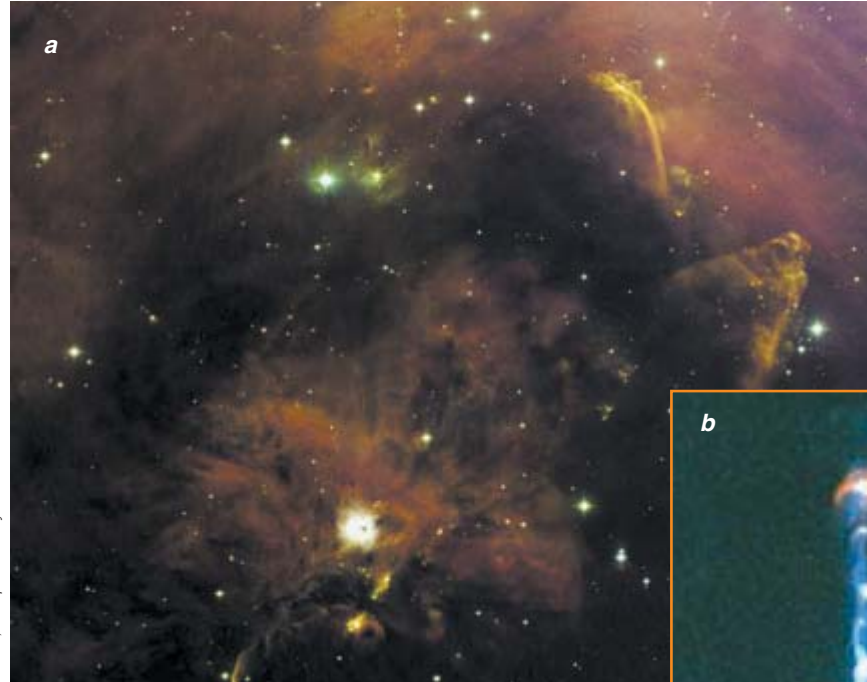
s'enfoncer lentement vers le cœur de notre étoile et y déloger l'hydrogène, phénomène qui réduit la quantité de carburant disponible et diminue l'espérance de vie du Soleil. Par ailleurs, nous avons précisé d'autres mécanismes, par exemple les échanges de chaleur par convection et les réactions du gaz solaire aux changements de température et de pression. Tous ces perfectionnements observationnels et théoriques ont eu pour effet de réduire de 14 pour cent les âges estimés des amas globulaires. Doit-on s'attendre à de nouvelles surprises ? Il est difficile de le dire. Les modèles stellaires ont été améliorés en les comparant au Soleil – la seule étoile que nous puissions étudier en détail – et ils le décrivent maintenant de façon très satisfaisante.

L'âge des incertitudes

La détermination de la luminosité absolue des étoiles reste la principale difficulté, car l'éclat apparent d'une étoile dépend à la fois de sa luminosité intrinsèque et de la distance qui nous en sépare et que nous savons mal évaluer. La voûte céleste semble sans profondeur et pour accéder à la troisième dimension, les astronomes doivent faire appel à diverses techniques, chacune adaptée à une échelle de distances différente.

Pour les objets assez proches, on recourt à la méthode dite de la parallaxe. La parallaxe désigne la modification apparente de position d'un objet lorsque notre point d'observation change. Vous pouvez constater ce phénomène en regardant votre index, bras tendu devant vous, avec un œil, puis avec l'autre : votre doigt semble se déplacer devant les objets situés à l'arrière-plan. Si vous rapprochez votre doigt de votre nez, vous remarquez que le changement apparent de position, la parallaxe, augmente. En vertu des règles trigonométriques, la parallaxe d'un objet – l'angle sous lequel on voit son déplacement apparent – est inversement proportionnelle à sa distance.

Pour mesurer la distance des étoiles, les astronomes cherchent à détecter leur parallaxe, c'est-à-dire leur déplacement apparent à mesure que la Terre tourne autour du Soleil en une année : les étoiles proches semblent se déplacer par rapport aux étoiles lointaines. Étant donné que le diamètre de l'orbite terrestre mesure 150 millions de kilomètres environ, une étoile qui se décale sur le ciel d'une seconde d'arc en six mois doit



4. LA NAISSANCE DES ÉTOILES est un phénomène violent. Le nuage interstellaire géant Orion A (a) est tout entier éclairé par les jeunes étoiles qui sont nées en son sein. Elles éjectent des jets de matière (b) et provoquent des ondes de choc qui déstabilisent le gaz environnant, dont certaines zones vont s'effondrer sous leur propre poids et donner naissance à de nouvelles étoiles. De ce fait, les naissances d'étoiles se propagent dans le milieu interstellaire à la manière d'une réaction en chaîne. Ainsi, les étoiles ont tendance à naître en groupes, ce qui explique que les astres qui constituent les amas ont tous le même âge.

être située à 3,26 années-lumière, ou, par définition, à un parsec. Dans la pratique, les télescopes au sol ne peuvent pas discerner de parallaxe inférieure à un centième de seconde d'arc, ce qui correspond à une étoile située à 100 parsecs. En fait, si l'on exige une précision meilleure que dix pour cent, les télescopes au sol sont incapables de déterminer la distance des étoiles au-delà de dix parsecs.

Malheureusement, à l'échelle galactique, une distance de dix parsecs est infime. De plus, les erreurs augmentent avec la distance. Les télescopes fonctionnant à leur limite de résolution surestiment les petites parallaxes et, par conséquent, sous-évaluent les distances. Afin de donner une base plus solide au calcul des distances cosmiques, l'Agence spatiale européenne a lancé, en 1989, le satellite *Hipparcos*. Sa mission consistait à établir une carte tridimensionnelle précise des étoiles situées à quelques centaines de parsecs. Doté d'une résolution d'un millième de seconde d'arc, il avait accès à des étoiles dix fois plus lointaines que les observateurs au sol. Bien sûr, cela reste la banlieue du Soleil et c'est insuffisant pour mesurer précisément la distance qui nous sépare des étoiles dans le plus proche amas globulaire (situé à 2 000 parsecs environ). Toutefois, *Hipparcos* nous a permis de déterminer précisément la distance d'étoiles voisines,

pauvres en métaux, assez semblables à celles présentes dans les amas globulaires. De ce fait, indirectement, les astronomes ont déterminé avec une assez bonne précision, la distance des amas globulaires en supposant que leurs étoiles ont la même luminosité intrinsèque que les étoiles proches de même composition chimique et de même couleur (c'est-à-dire de même température de surface).

Plus jeunes qu'on ne le pensait

On en déduisit que les amas globulaires sont plus éloignés qu'on ne le pensait d'au moins dix pour cent. Par conséquent, ils sont plus lumineux que prévu, et donc plus jeunes. Toutefois, ces nouvelles estimations ne font pas l'unanimité ; les modèles stellaires ne sont peut-être pas totalement fiables et notre estimation indirecte de la distance des amas globulaires est peut-être erronée.

Les astronomes ont cherché à confirmer ces estimations à l'aide de mesures indépendantes. Une des méthodes employées consiste à examiner le mouvement d'un grand nombre d'étoiles dans un amas globulaire. Le mouvement de chaque étoile a deux composantes : la vitesse radiale (le long de la ligne de visée)

La datation radioactive des étoiles

Pour estimer l'âge d'objets anciens de la période historique et préhistorique, on utilise souvent la datation radioactive. On se sert de l'isotope radioactif du carbone, le carbone 14, qui a une demi-vie de 5 570 ans. Cela signifie qu'au bout de ce laps de temps, la moitié des atomes de carbone 14 initialement présents dans un échantillon se seront désintégrés. Connaissant le rapport initial des abondances en carbone 12 (le carbone ordinaire, stable) et en carbone 14 dans un échantillon, on peut, en mesurant ce rapport aujourd'hui, en déduire son âge. À l'échelle de l'âge de l'Univers, on ne peut utiliser que des éléments ayant une demi-vie de plusieurs milliards d'années.

Les éléments chimiques présents dans les étoiles ont essentiellement trois origines. L'hydrogène et l'hélium, les plus abondants, sont «primordiaux» : ils se sont formés au cours des trois premières minutes de l'Univers. La plupart des éléments plus lourds, de l'hélium au fer, sont formés par fusion thermonucléaire dans le cœur des étoiles. Lorsque les étoiles les plus massives explosent en supernovae, elles restituent au milieu interstellaire ces éléments chimiques plus lourds que l'hélium qui entreront dans la composition de nouvelles étoiles. L'énergie disponible au cours de cette explosion permet de synthétiser une troisième famille d'éléments formée par exposition des noyaux de fer à un flux intense de neutrons. Les atomes de fer (et ceux de masse atomique proche) absorbent une partie des neutrons incidents, et le nombre de nucléons contenus dans leur noyau augmente. Ceci produit la suite des éléments chimiques jusqu'aux éléments les plus lourds, dont le thorium 232 et l'uranium 235 et 238, tous trois radioactifs.

Les premières tentatives de datation radioactive des étoiles reposaient sur la mesure du rapport des abondances en thorium 232 (radioactif) et en europium 151 (stable), deux éléments produits par capture de neutrons. Toutefois, la demi-vie du thorium 232 est d'environ 14 milliards d'années – plus longue que la vie des étoiles que l'on veut dater – et la précision de la méthode est mauvaise. Par ailleurs, Marcel Arnould et ses collègues

de l'Université libre de Bruxelles ont souligné que cette méthode repose sur une hypothèse fragile : on postule que le rapport initial des abondances en thorium et en europium est toujours le même d'une étoile à l'autre. Or, le nombre de nucléons contenus dans le thorium (232) est très supérieur à celui des nucléons contenus dans l'europium (151). Un flux de neutrons suffisant pour produire du thorium produira de l'europium en abondance, tandis qu'un flux de neutrons plus faible pourrait produire de l'europium en quantité notable, sans être assez intense pour produire du thorium. Ainsi, le rapport initial des abondances en thorium et en europium dépend de l'intensité du bombardement de neutrons qu'a subi la matière de l'étoile. Vraisemblablement, il diffère d'une étoile à l'autre.

On s'affranchit de ces difficultés en abandonnant l'europium pour l'uranium 238, dont la demi-vie est égale à 4,47 milliards d'années (deux à trois fois moins que l'âge des plus vieilles étoiles), et dont le nombre de nucléons est presque le même que celui du thorium. Malheureusement, on détecte difficilement l'uranium dans les étoiles, car sa raie spectrale la plus intense est perdue parmi les raies du fer, un élément abondant chez les étoiles de composition chimique semblable à celle du Soleil. Dans les étoiles les plus anciennes, les éléments chimiques tels que le fer sont rares, mais la raie de l'uranium est très faible. Pourtant, nous avons récemment réussi à détecter l'uranium dans l'étoile CS 31082-001, une géante de l'hémisphère Sud. Cette étoile contient environ 1 000 fois moins d'éléments courants (jusqu'au fer) que le Soleil, mais elle est riche en éléments très lourds formés par capture de neutrons, parmi lesquels le thorium et l'uranium. Par ailleurs, le spectre de CS 31082-001 que nous avons obtenu bénéficiait de l'excellente résolution conférée par le très grand télescope (VLT) de l'Observatoire européen austral (ESO).

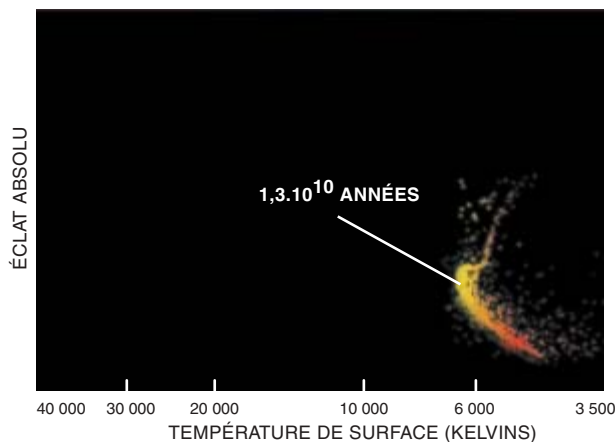
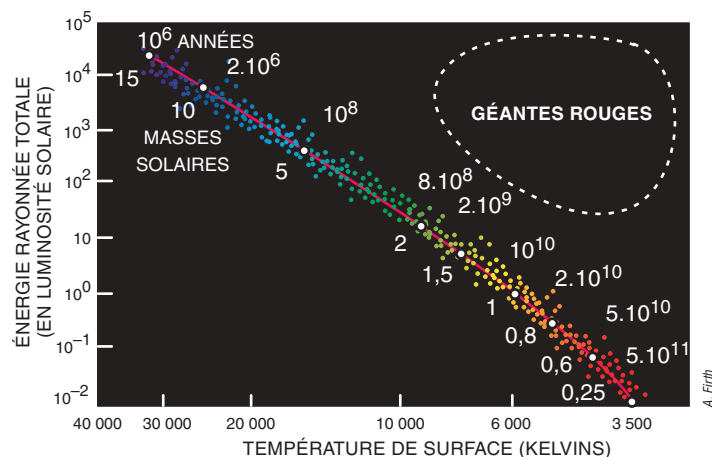
Nous avons constaté que les éléments très lourds, formés par capture de neutrons et proches de l'uranium (l'osmium et l'iridium, par exemple), sont présents avec des abondances qui représentent environ 12 pour cent des abondances solaires. Seules exceptions, le thorium et l'uranium sont encore plus rares puisqu'ils se désintègrent au cours du temps. En supposant que le thorium et l'uranium étaient initialement présents avec une abondance égale à 0,12 fois celle qui est la leur dans le Soleil, nous avons estimé qu'il se serait écoulé 12,5 milliards d'années (plus ou moins trois milliards) depuis la naissance de CS 31082-001. Par ailleurs, l'estimation de l'âge de cette étoile d'après les abondances en thorium et en europium est inacceptable (elle est proche de zéro!). Ceci confirme que le rapport initial thorium-europium n'est pas transposable d'une étoile à l'autre.

Nous connaissons encore mal le rapport actuel uranium-thorium dans CS 31082-001 et, surtout, le rapport initial au moment de la production de ces deux éléments. Il nous faudra encore améliorer ces deux valeurs pour réduire l'imprécision encore élevée sur la datation.

Roger CAYREL, Observatoire de Paris-Meudon



European Southern Observatory



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'attachèrent 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 Tree 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.

