

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'abandonnèrent 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