

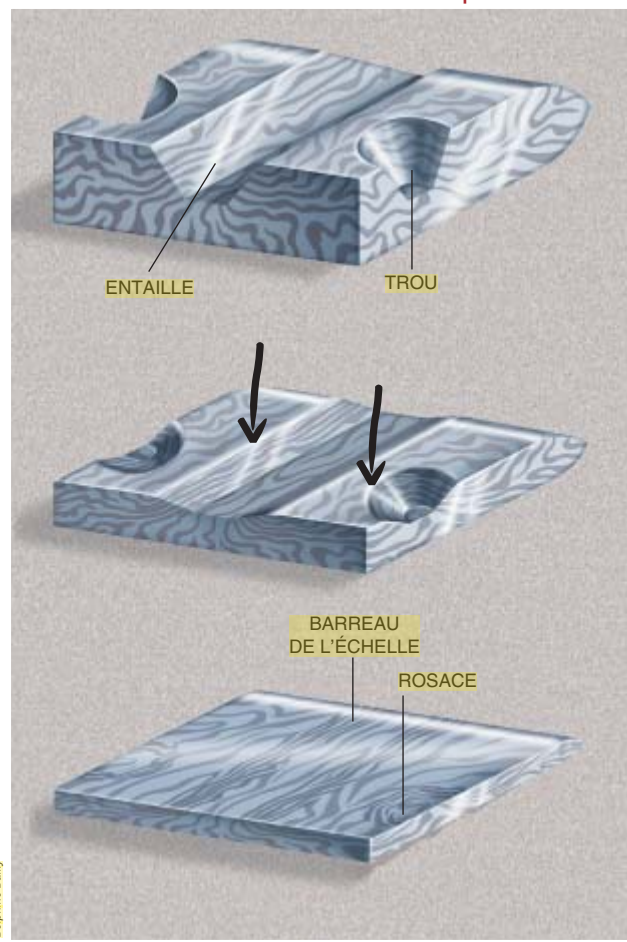
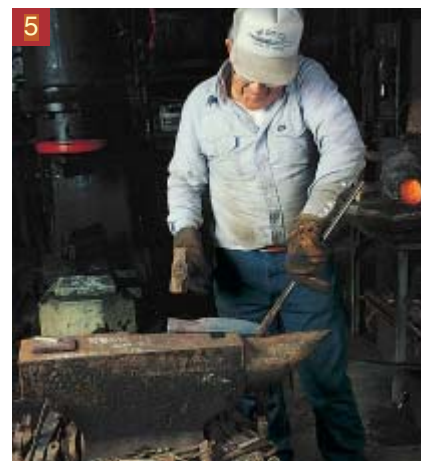
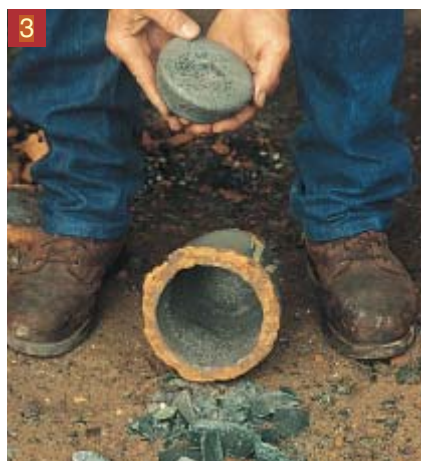
avoir cherché la réponse à notre question pendant deux ans, nous avons fini par comprendre que ces traces de vanadium étaient, en fait, essentielles.

Diverses expériences ont montré que des quantités aussi infimes de vanadium dans des alliages de fer et de carbone très purs suffisent à déclencher la formation des bandes de cémentite caractéristiques des aciers de Damas. Le molybdène participe également à l'effet désiré et, dans une moindre mesure, le chrome, le niobium et le manganèse. En revanche, d'autres éléments, tels le cuivre et le nickel, ne favorisent pas la formation de bandes de carbure. Une analyse microscopique

réalisée au moyen d'une sonde électronique a confirmé que les éléments efficaces sont précisément ceux qui subissent une microségrégation dans les régions interdendritiques lors de la formation du lingot, et il n'est pas nécessaire que leur concentration soit supérieure à 0,02 pour cent.

Nous en avons conclu que la formation de bandes de cémentite est due à la microségrégation de certaines impuretés qui favorisent à leur tour la microségrégation des particules de carbure de fer. Pour le vérifier, nous avons fait des expériences où nous empêchions la microségrégation des atomes d'impuretés lors de la for-

mation du lingot initial et nous avons observé si les bandes de carbure se formaient ou non au cours des opérations de forgeage suivantes. Comme métal de départ, nous avons sélectionné de petits morceaux de lames anciennes et modernes qui présentaient tous de belles bandes et nous les avons portés à des températures supérieures de 50 °C environ à la température critique A_{cm} . À cette température, toutes les particules de carbure de fer se dissolvent dans l'austénite. Ensuite, nous trempions les morceaux de métal chaud dans l'eau afin d'obtenir un refroidissement brutal de l'acier, un procédé bien connu



L'ÉCHELLE DE MAHOMET et les motifs en rosace peuvent être obtenus en façonnant des rainures et des trous dans la lame lorsqu'elle est proche de l'épaisseur désirée. Au cours des opérations suivantes de forgeage, le martelage du métal tasse le métal et comble les dépressions pratiquées à la surface du métal. Ainsi, les bandes présentes sur les faces verticales des trous et des rainures sont resserrées et forment les motifs que l'on observe sur les lames anciennes.

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.