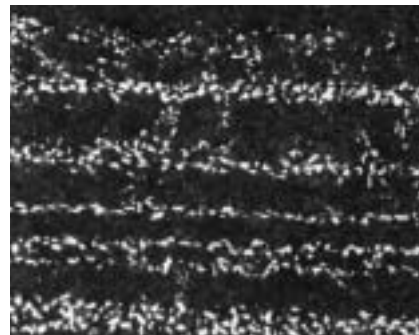
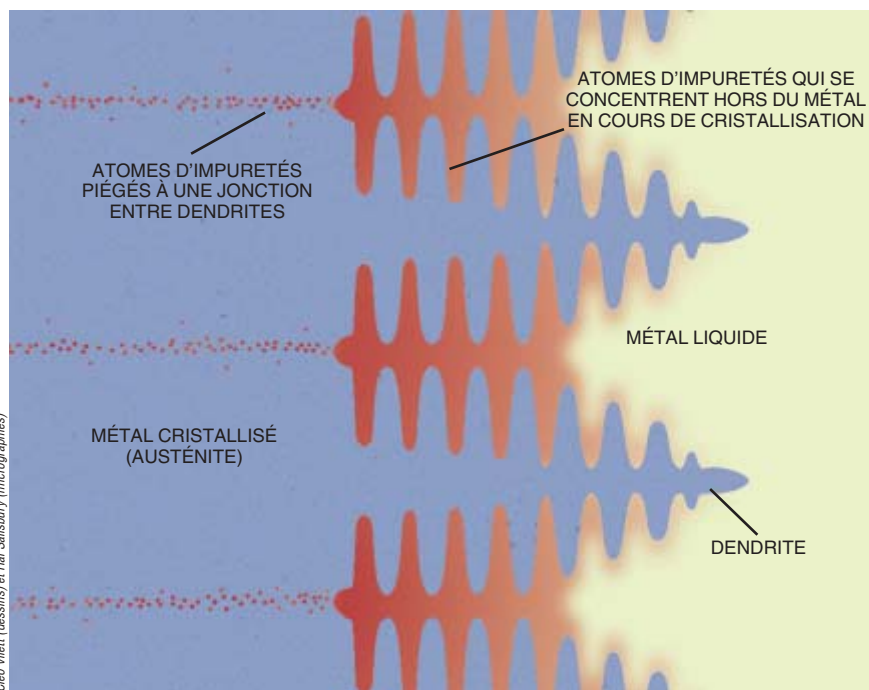




4. DANS UN LINGOT DE WOOTZ en cours de solidification, un front de métal froid progresse dans l'acier fondu. En cours de cristallisation, le front solide présente des ramifications nommées dendrites. Les atomes d'impuretés (en rouge), tel le vanadium, se séparent de l'acier solide et s'accumulent dans les régions situées entre les dendrites, où ils se trouvent piégés. Dans le lingot d'acier, les zones interdendritiques qui ont cristallisé les dernières contiennent de fortes concentrations en impuretés. Au cours des cycles ultérieurs de chauff-

fage et de refroidissement, ces atomes d'impuretés favorisent la croissance de particules de carbure de fer très dur (cémentite), qui forment les bandes claires de la lame damassée. La micrographie du haut montre les bandes claires et sombres d'une coupe pratiquée dans la lame d'une épée de Damas originale. Celle du bas montre une coupe d'une reconstitution réalisée par l'auteur. La similitude des deux structures semble indiquer que la technique moderne est une reproduction fidèle des procédés originaux.

à l'acier cinq ou six cycles de chauffage, suivis de lents refroidissements jusqu'à la température ambiante, ces particules se rassemblent en amas ou en bandes bien distinctes. Les particules de carbure se forment et, au cours du forgeage, les motifs de surface caractéristiques des lames de Damas apparaissent. Grâce à des tests effectués sur des morceaux de lames anciennes et modernes, nous avons montré que les bandes caractéristiques de cémentite résultent d'un phénomène qui se produit lors de la fabrication du lingot de départ : lorsque le métal liquéfié se refroidit et cristallise, certaines impuretés se rassemblent dans des régions microscopiques, un phénomène nommé microségrégation.

Lorsque le lingot chaud refroidit, un front solide d'acier cristallisé progresse dans le liquide. Le front de cristallisation est une surface très irrégulière formée de prolongements, nommés dendrites (voir la figure 4), lui donnant l'allure d'une forêt de sapins. Pour un alliage contenant 1,5 pour cent de carbone, l'acier qui cristallise derrière le front est une variété particulière, l'austénite, dont le réseau cristallin est cubique à faces

centrées (la maille élémentaire du cristal est constituée d'un cube où les atomes se répartissent aux sommets et au centre des faces de ce cube). Au cours de la cristallisation, le métal liquide est piégé dans les régions situées entre les dendrites (interdendritiques). Or, la structure de l'austénite est susceptible d'incorporer un nombre limité d'atomes étrangers (de carbone ou impuretés), inférieur au nombre de ces atomes que l'on peut dissoudre dans le métal liquide. Ainsi, à mesure que les dendrites d'austénite croissent, des atomes de carbone et d'impuretés se regroupent dans le liquide interstitiel. En raison de cette microségrégation, la concentration en impuretés dans les zones qui cristallisent en dernier est notablement supérieure à celle qui règne dans le reste du métal.

Une fois l'acier solidifié, les surfaces de jonction entre les dendrites forment des motifs tourmentés contenant un grand nombre d'atomes d'impuretés piégés dans la masse du métal. À ce stade, les motifs damassés n'apparaissent pas encore. Toutefois, lorsque le lingot subit, ultérieurement, les cycles de chauffage et de refroidissement nécessaires

au forgeage, ces atomes d'impuretés favorisent la croissance des chapelets de particules de cémentite dure à l'origine des bandes claires de l'acier damassé. On peut montrer que le maillage d'impuretés présent dans le lingot d'origine correspond bien aux bandes d'acier alternativement claires et sombres du wootz. Les dendrites sont distantes de un demi-millimètre environ, mais lorsque le lingot est travaillé, son diamètre diminue, de même que la distance entre les branches des dendrites : l'espacement final entre les dendrites correspond bien à la distance observée entre les bandes de l'acier damassé.

La recette pour obtenir les bandes

Pour obtenir un mélange d'austénite et de particules de cémentite à partir d'un lingot d'acier, on doit maîtriser la température au cours des opérations de forgeage. Lorsque la température du lingot est inférieure à un seuil critique, des particules de carbure de fer commencent à se former. Généralement, on note A la température au-dessus de laquelle tout l'acier d'un lingot cristallise sous forme d'austénite. Dans les aciers conte-

nant plus de 0,77 pour cent de carbone, c'est la formation de particules de cémentite qui rompt cette homogénéité et l'on note la température critique A_{cm} . Au-dessous de cette température, qui est de l'ordre de 1 000 °C pour un acier à 1,5 pour cent de carbone, des particules de cémentite apparaissent uniformément réparties dans la masse de l'acier austénitique.

Pourquoi le forgeage d'un petit lingot de wootz dont les impuretés se sont rassemblées provoque-t-il l'alignement des particules de cémentite? Pour le découvrir, nous avons examiné des coupes de lingots à mesure que nous les faisons passer de la forme de palet à celle de lame. Pour façonner un lingot, nous le chauffons jusqu'à une température assez élevée pour qu'il devienne malléable tout en restant sous la température critique A_{cm} afin de permettre l'apparition de particules de cémentite. Au cours du façonnage, le lingot refroidit, passant d'une température de l'ordre de 50 °C au-dessous de la température critique A_{cm} , à 250 °C au-dessous de cette même température (voir la figure 3). Pendant ce refroidissement, la concentration en particules de cémentite dans le métal augmente. Ensuite, nous faisons subir au lingot une succession de chauffages et de martelages entre ces deux mêmes valeurs de la température. L'expérience nous a montré qu'il nous fallait environ 50 cycles pour obtenir une lame proche des originales, c'est-à-dire d'environ 45 millimètres de largeur et 5 millimètres d'épaisseur.

Nous pensons que les bandes de cémentite se forment de la façon suivante. Au cours des 20 premiers cycles, les particules dures de carbure se forment au hasard et se répartissent de façon relativement homogène dans la masse du lingot. Puis, au cours des cycles ultérieurs, elles ont tendance à s'aligner de mieux en mieux dans le réseau des régions interdendritiques : chaque fois que l'acier est chauffé, certaines de ces particules de carbure se dissolvent ; mais la présence d'impuretés ralentit la vitesse de dissolution, de sorte que là où ces impuretés sont les plus concentrées, les particules de carbure de fer survivent en plus grand nombre. Comme les impuretés sont surtout concentrées dans les régions interdendritiques, c'est aussi là que, de cycle en cycle, les particules de carbure se concentrent. Cependant, comme chaque cycle de chauffage et de refroidissement n'augmente pas

beaucoup le nombre de particules de carbure, plusieurs cycles sont nécessaires pour l'obtention de bandes distinctes.

Les bons éléments

Nous pensions depuis longtemps que les impuretés jouent un rôle clé dans la formation des bandes, mais nous ignorions quelles sont les plus importantes. Nous avons découvert que le silicium, le soufre et le phosphore, dont la présence dans les anciens aciers wootz était connue, ne semblent pas jouer un rôle essentiel. Toutefois, en éliminant des éléments, nous ne répondions pas à la question.

Nous avons obtenu la réponse, par hasard, lorsque nous avons utilisé, pour fabriquer nos lingots, un métal venu de Sorel, au Québec. Tiré d'un important gisement d'ilménite, situé près du lac Tio, sur le Saint-Laurent, ce métal est un alliage de fer et de carbone d'une grande pureté, contenant 3,9 à 4,7 pour cent de carbone (il s'agit d'une fonte). Le minerai d'origine contient des traces de vanadium, de sorte que le métal de Sorel en renferme 0,003 à 0,014 pour cent. Dans un premier temps, nous avons négligé cette impureté, car nous ne pouvions croire qu'une concentration aussi faible avait une influence quelconque. Après

La fabrication d'une lame damassée

1. On rassemble les éléments qui seront déposés dans le four : du fer très pur, du fer de Sorel, du charbon, de petits morceaux de verre et des feuilles vertes. Fer, charbon, et acier de Sorel (contenant du vanadium) imposent les proportions de fer, de carbone et d'impuretés présentes dans le lingot.

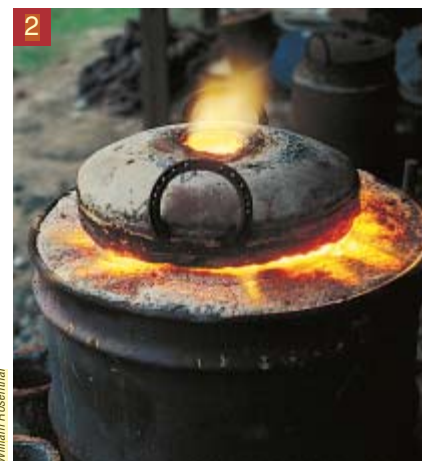
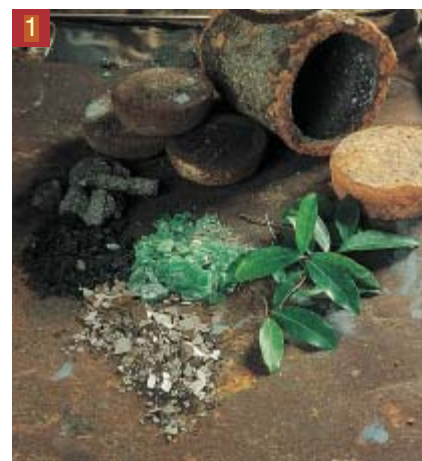
2. On chauffe le creuset. Pendant cette phase, le verre fond, formant une couche qui protège le lingot de l'oxydation. Les feuilles dégagent de l'hydrogène, qui favorise la combinaison du carbone et du fer. La concentration en carbone du fer s'élève à 1,5 pour cent, une bonne proportion pour former les particules de carbure de fer dur dont l'agglutination en bandes confère aux lames damassées leurs motifs de surface ondulés caractéristiques. Les feuilles et le verre empêchent les lingots de se fissurer au cours du martelage.

3. Lorsque le creuset s'est refroidi, on retire le lingot. Celui-ci ressemble aux lingots de wootz utilisés par les anciens forgerons.

4. On forge le lingot, c'est-à-dire qu'on le frappe à l'aide d'un marteau pour le déformer légèrement tant qu'il est chaud. Lorsque le lingot est trop froid pour se déformer sans fissures, on le réchauffe et on le forge à nouveau. On a photographié quatre étapes successives du forgeage du lingot, chacune étant le résultat de plusieurs cycles de chauffage et de martelage. Près de 50 cycles sont nécessaires pour l'obtention d'une lame à partir du lingot d'origine.

5. On découpe la lame pour lui donner sa forme finale et on forge les détails.

6. On pratique des entailles à la surface de la lame et on perce des trous pour créer une échelle de Mahomet et les motifs en rosaces. On forge la lame à nouveau pour l'aplanir et on polit la surface pour donner à la lame son aspect presque définitif.



William Rosenthal



La lame terminée présente une «échelle de Mahomet» et des «rosaces».

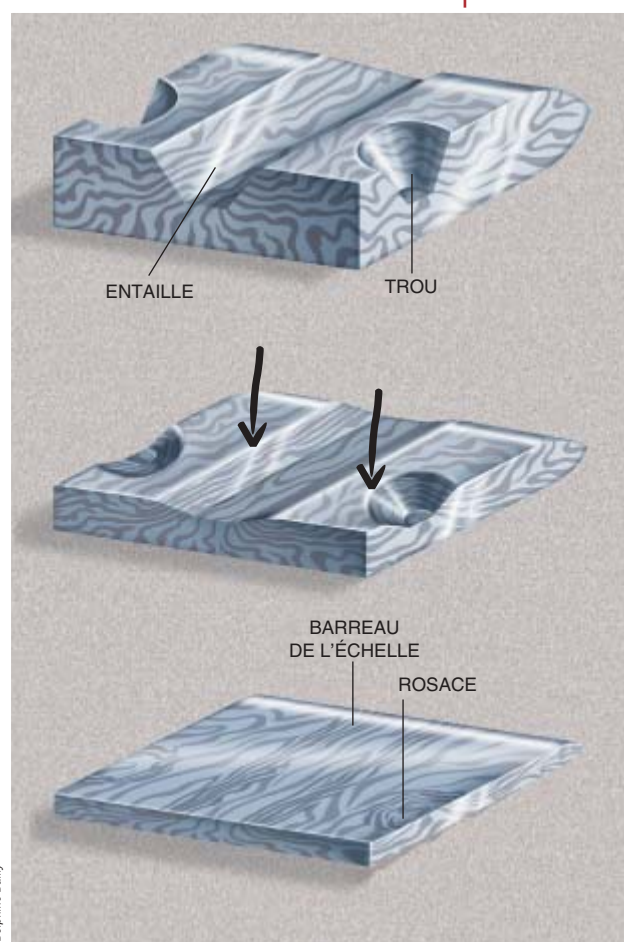
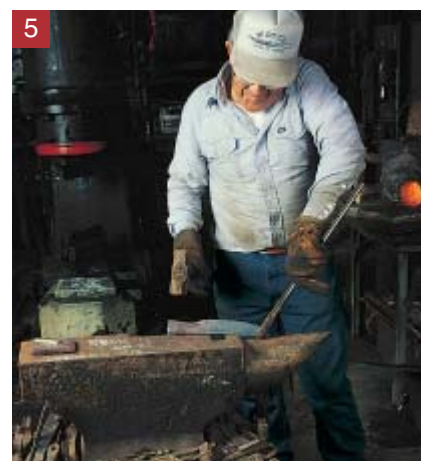
avoir cherché la réponse à notre question pendant deux ans, nous avons fini par comprendre que ces traces de vanadium étaient, en fait, essentielles.

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.