

en forme de bandes. Ces bandes sont elles-mêmes espacées l'une de l'autre de 30 à 70 micromètres, et alignées parallèlement à la surface de la lame, comme les veines du bois sur une planche. Traité par un acide, l'acier de ces lames laisse apparaître le carbure de fer sous forme de lignes blanches au sein d'une matrice d'acier sombre. Tout comme les cernes de croissance d'un arbre produisent les motifs ondoyants caractéristiques d'une coupe, les ondulations des bandes de carbure de fer forment les motifs damassés complexes observés sur la surface de la lame. Les particules de carbure sont extrêmement dures, et cette combinaison de bandes d'acier dur au sein d'une matrice plus tendre d'acier souple, semble conférer aux armes damassées un tran-

chant très résistant, associé à une souplesse remarquable.

J'ai d'abord tenté de reproduire les microstructures de l'acier damassé en wootz lors d'une expérience de laboratoire. J'ai rapidement compris qu'il me faudrait l'aide d'un spécialiste dans l'art du façonnage des armes tranchantes. Le maître-forgeron Alfred Pendray, à Gainsville (Floride), cherchait alors, lui aussi, à résoudre l'énigme des lames damassées. Il avait fabriqué de petits lingots dans un four chauffé au gaz et les avait utilisés pour forger des lames. Il avait ainsi obtenu des microstructures très proches de celles des lames anciennes de la meilleure des qualités. Toutefois, il n'était pas parvenu à reproduire une «véritable» lame de Damas.

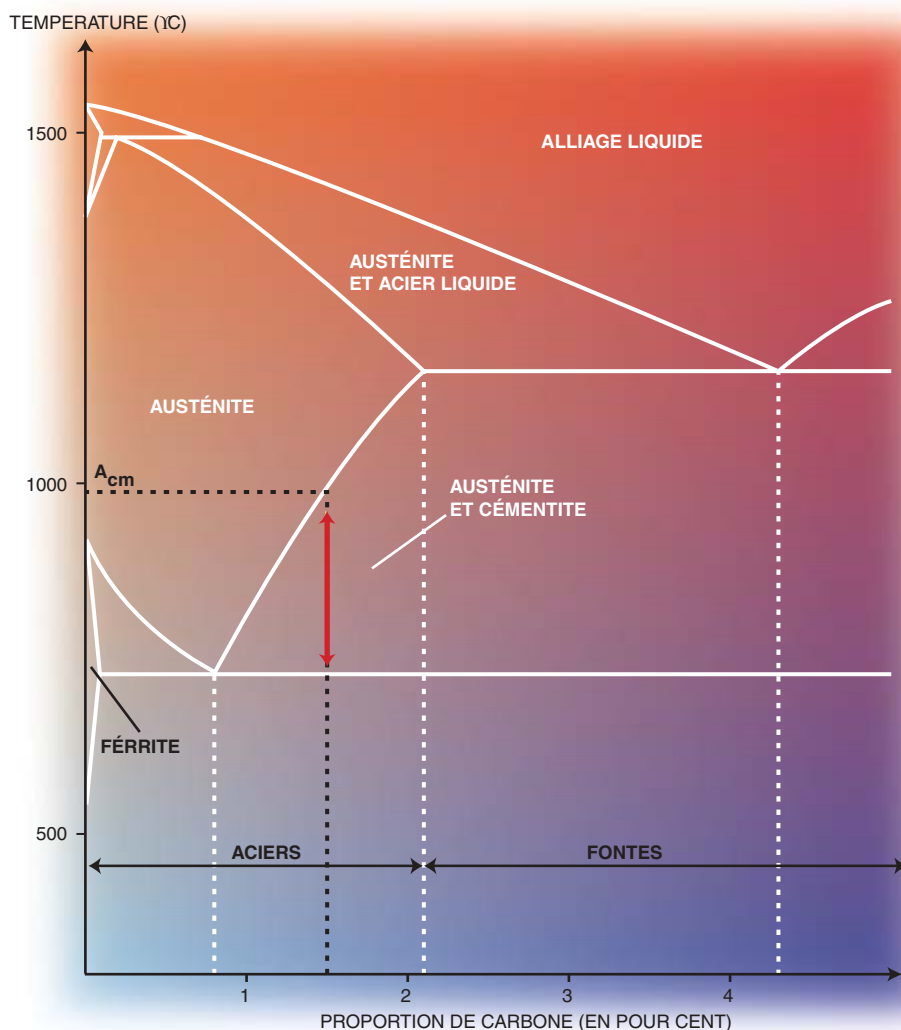
Nous avons commencé à travailler ensemble en 1988. Pour que nos techniques soient reproductibles, il nous fallait étayer nos théories avec des données scientifiques précises et contrôler de façon rigoureuse les détails de nos expériences. En 1993, nous avons installé à la forge de A. Pendray un thermocouple commandé par ordinateur et un pyromètre à infrarouge qui enregistrait les températures lors des phases de fusion et de martelage que nous allions expérimenter.

Tout d'abord, nous avons essayé de produire des lames de Damas en utilisant la méthode proposée par Jeffrey Wardsworth et Oleg Sherby, de l'Université Stanford, mais nous n'avons réussi à obtenir ni la microstructure interne ni les motifs damassés de surface. Au cours des années suivantes, nous avons mis au point une technique qui permet à A. Pendray de reproduire des lames d'acier damassé en wootz ; il recrée même le motif dit de l'«échelle de Mahomet», que l'on retrouve sur certaines des plus fines épées arabes. L'échelle de Mahomet regroupe les motifs damassés en alignements verticaux (les barreaux de l'échelle), perpendiculaires au fil de la lame. Elle symboliserait l'ascension du fidèle au Paradis.

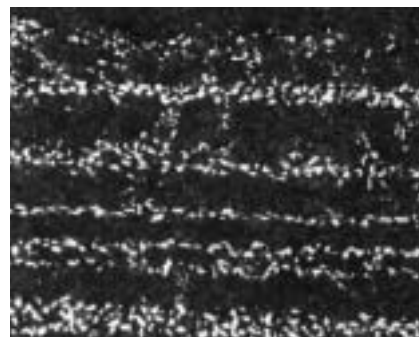
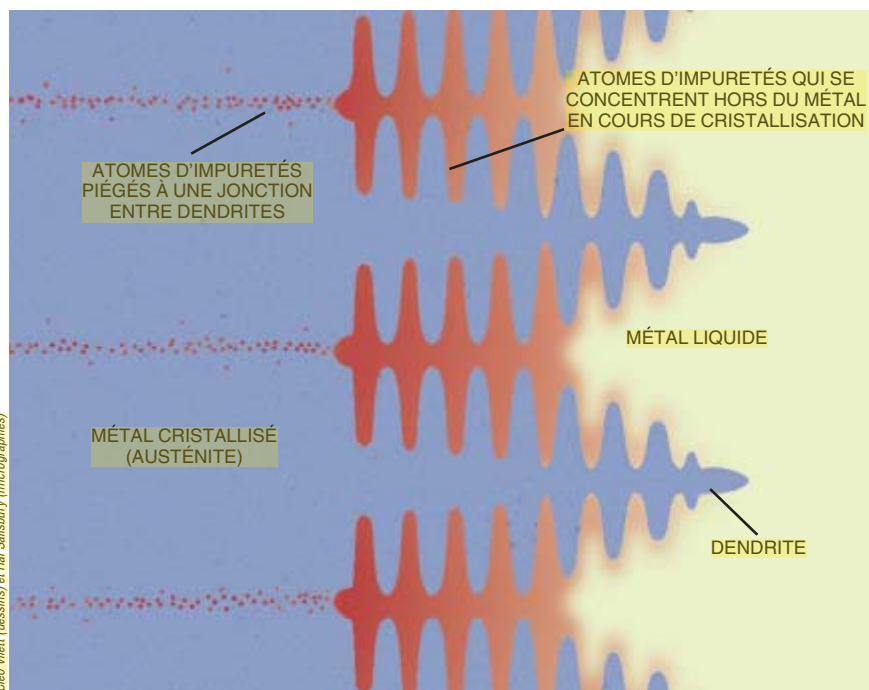
Histoire d'acier

Par bien des aspects, notre technique ressemble à celles qui avaient déjà été proposées. Nous produisons un petit lingot d'acier de composition donnée dans un creuset fermé hermétiquement et nous le forçons ensuite pour façonner une lame. Toutefois, à la différence des méthodes antérieures, nous choisissons précisément les proportions du fer, du carbone et des autres éléments (tels le vanadium et le molybdène, que nous désignons sous le nom d'impuretés), et nous imposons une durée de chauffage et une température du four précises. La qualité d'une lame damassée dépend également de la technique utilisée lors des opérations de forgeage successives.

Des particules de carbure de fer sont susceptibles de se développer dans un acier – dit hypereutectoïde – contenant environ 1,5 pour cent de carbone. Quand on y ajoute certains éléments chimiques sous forme de traces (à des concentrations infimes, de l'ordre de 0,03 pour cent), et que l'on fait subir



3. LE DIAGRAMME DE PHASES des alliages fer-carbone, montre les variétés d'aciers ou de fontes qui cristallisent à différentes températures pour différentes concentrations en carbone. L'alliage nommé wootz, qui sert à la fabrication des lames de Damas, est un mélange contenant environ 1,5 pour cent de carbone. En dessous de 1 000 °C, cet alliage initialement sous forme d'austénite s'enrichit en particules de carbure de fer nommé cémentite. Durant les cycles de chauffage et de forgeage, le lingot subit des transformations (selon le segment rouge) au cours desquelles les particules de cémentite s'accumulent dans l'acier le long des zones où les impuretés sont concentrées.



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-