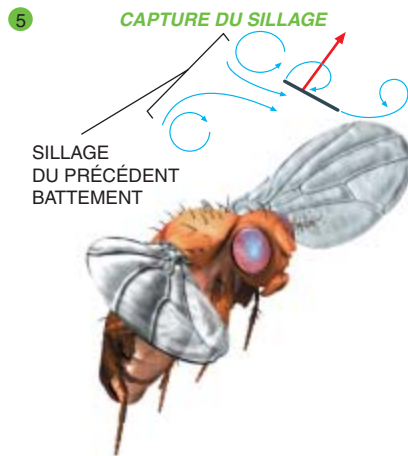




logue à celle d'une balle de tennis en rotation. Au début de la levée de l'aile, celle-ci retransverse le sillage créé par l'aile quand elle était abaissée. L'aile est orientée de façon que le surplus d'écoulement d'air produit crée davantage de portance : ce phénomène est dénommé la capture de sillage (5)

Magnus). Quand l'aile se retourne plus tard, au début du battement suivant, le bord d'attaque se déplace vers l'avant par rapport à la direction de déplacement : la force qui en résulte est dirigée vers le bas.

Toutefois, un autre pic de forces dirigées vers le haut a été décelé au début de chaque abaissée et de chaque levée d'aile. Plusieurs expériences ont montré que ce pic était dû au phénomène nommé capture de sillage, c'est-à-dire la collision de l'aile avec le tourbillon du sillage créé par le précédent battement.

Chaque coup d'aile laisse derrière lui un tourbillon composé des remous qu'il a produits lors de son déplacement et de son retournement pendant le cycle précédent. Lorsque l'aile inverse sa direction, elle retransverse cette turbulence et récupère ainsi une partie de

l'énergie « contenue » dans le sillage. Nous avons testé cette capture de sillage en arrêtant les ailes après un mouvement de l'aile vers l'avant, puis vers l'arrière. Les ailes immobiles continuaient de créer une force, car le fluide environnant était toujours en mouvement.

La capture de sillage a probablement lieu au début de chaque mouvement, de la même façon que la circulation rotationnelle. Cependant, la mouche modifie sans doute l'intensité et la direction de la force selon l'instant du retournement de l'aile. Quand l'aile se retourne tôt, elle a un angle d'attaque favorable à l'instant où elle entre en collision avec le sillage, et crée ainsi une force intense dirigée vers le haut. À l'inverse, lorsque l'aile se retourne plus tard, la force est dirigée vers le bas.

La capture de sillage et la circulation rotationnelle expliquent à parts égales l'aérodynamisme de la commande de vol, c'est-à-dire comment la mouche se dirige. Pendant certaines manœuvres, l'aile à l'extérieur du virage se retourne plus tôt et produit plus de portance, tandis que l'aile à l'intérieur se retourne plus tard et crée moins de portance : au total, la mouche s'incline et tourne. La mouche dispose de nombreux capteurs, tels les yeux, les ailes postérieures atrophiées, nommées haltères, qui jouent le rôle de gyroscopes et les récepteurs mécaniques des ailes, afin de régler précisément le moment du retournement et l'amplitude du battement...

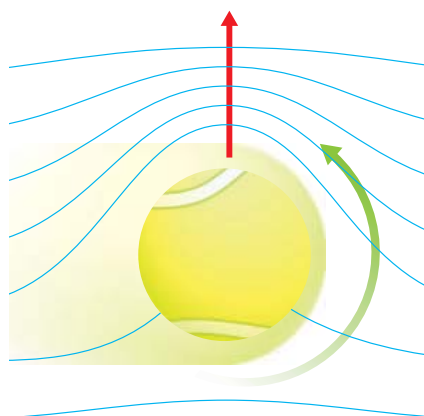
La plupart des études ont porté sur le vol stationnaire, car c'est le cas le plus difficile à expliquer du fait que l'insecte ne tire aucun avantage des

courants d'air. Leurs résultats forment un tout de plus en plus cohérent, mais ne résolvent pas tous les problèmes. Comment pouvons-nous appliquer les résultats obtenus sur la drosophile aux autres insectes ? La tâche est difficile : les morphologies, les tailles et les comportements des insectes sont très divers. Pour illustrer la diversité, citons les minuscules thrips, les grands sphingidés, les chrysopes (des petits insectes verts aux yeux dorés), qui ont deux paires d'ailes légèrement désynchronisées pendant le vol, les coléoptères dont les deux élytres, qui forment la carapace au sol, sont dressés et immobiles pendant le vol...

Grâce aux six moteurs du robot, nous recréerons le mouvement des ailes de plusieurs types d'insectes. Pour compléter ces résultats, nous construisons aujourd'hui un autre robot mouche qui évoluera dans une cuve suffisamment grande pour simuler, par exemple, comment les mouches prennent des virages particulièrement serrés en ajustant le décalage de leurs battements d'ailes.

Comprendre le vol des insectes résoudra une ancienne énigme scientifique, mais aura peut-être aussi des applications pratiques. Par exemple, des ingénieurs tentent de mettre au point des robots volants miniatures (voir la figure 1) pour la recherche et le sauvetage, la surveillance de l'environnement, la détection de mines et l'exploration des planètes. Bien que l'être humain construise des avions de la taille des oiseaux, personne n'a jamais construit d'avion de la taille d'une mouche. La viscosité de l'air a plus d'importance à ces échelles et prime sur le type d'écoulement qui maintient les avions en l'air.

Les insectes battent des ailes, non pas parce qu'ils n'ont jamais « inventé » les roues, les réacteurs et les gouvernails, mais parce que leurs dimensions imposent d'autres mécanismes aérodynamiques. N'oublions pas que l'évolution est, selon Francis Crick, plus intelligente que nous (et que son assistant, Orgel).



7. L'ÉCOULEMENT DE L'AIR autour d'une balle de tennis en rotation crée une portance. Sous la balle, la vitesse de l'air en rotation s'oppose à celle due à la translation de la balle : la pression de l'air est supérieure sur le dessus. Les insectes utilisent ce phénomène en tournant les ailes à la fin de chaque battement.

Michael DICKINSON est professeur de biologie à l'Université de Berkeley.

R. DUDLEY, *The biomechanics of insect flight : form, function, evolution*, Princeton University Press, 2000.

Le site Internet de l'auteur : <http://socrates.berkeley.edu/~flymanmd/>

Le mystère des épées de Damas

JOHN VERHOEVEN

Au Moyen Âge, les artisans du Moyen-Orient forgeaient des lames d'acier aux qualités inégalées. Le secret de cet acier de Damas a été perdu au XIX^e siècle, mais il semble avoir été retrouvé grâce à diverses expériences récentes de métallurgie.

De l'âge du bronze à la fin du XVIII^e siècle, l'épée fut l'une des principales armes des guerriers. Les armées dont les soldats avaient les meilleures épées jouissaient d'un avantage tactique sur leurs ennemis. Les armes équipées de lames de Damas – que les Européens découvrirent lors des Croisades – furent longtemps considérées comme les meilleures du monde.

Ces lames, dont le nom vient vraisemblablement de l'atelier médiéval de Damas (aujourd'hui capitale de la Syrie), se distinguent de leurs homologues européennes par deux caractéristiques principales. D'abord, elles présentent des motifs ondulés qui en décorent la surface (*voir les figures 1 et 2*), et, surtout, leur tranchant peut être très acéré. Selon une légende, un sabre en acier damassé aurait été capable de couper en deux un mouchoir de soie flottant dans le vent... Un exploit qu'aucune arme européenne n'aurait égalé.

Très réputées, les lames en acier de Damas étaient répandues au Moyen

Âge et servaient également à la fabrication de poignards, de haches et de fers de lances. Pourtant, malgré cette abondante utilisation, les Occidentaux ne purent découvrir les secrets de fabrication de cet acier. Les métallurgistes et les forgerons européens les plus habiles furent incapables de reproduire les armes islamiques, même après en avoir ramené des modèles et après les avoir observées en détail. Puis, il y a 200 ans, le procédé de fabrication des lames de Damas a été perdu, dans leur pays d'origine lui-même : les experts s'accordent généralement sur le fait qu'aucune épée de Damas de bonne qualité n'a plus été forgée en Orient après le début du XIX^e siècle. Heureusement, nous avons sans doute percé le secret de ces épées.

Nous ne sommes pas les premiers à annoncer une solution au mystère des aciers damassés, mais nous sommes les premiers à avoir réussi à fabriquer des répliques fidèles de ces armes légendaires. Pour valider un procédé de fabrication des épées et des poignards de Damas, il nous fal-

lait façonner des répliques à partir de matériaux semblables à ceux qui furent utilisés par les anciens forgerons. De surcroît, une fois achevées, les armes produites devaient porter le motif damassé caractéristique et avoir la même structure chimique et microscopique.

Les caractéristiques de l'acier de Damas

Les lames de Damas anciennes ont été fabriquées à partir de petits lingots d'un mélange de fer et de carbone – un acier – importé d'Inde. Ce matériau est connu sous le nom de wootz depuis le début du XIX^e siècle. Les lingots de wootz avaient une forme de palets, d'environ dix centimètres de diamètre et cinq centimètres d'épaisseur. Le wootz contient environ 1,5 pour cent de carbone, ainsi que de faibles quantités d'impuretés, tels le silicium, le manganèse, le phosphore et le soufre.

Les premiers observateurs anglais en Inde rapportèrent que les épées damassées étaient fabriquées



en façonnant directement les lingots de wootz pour leur donner la forme de la lame désirée, au cours d'opérations répétées de chauffage et de martelage. Comment le simple fait de forger de petits lingots d'acier peut-il faire apparaître les étonnantes caractéristiques des lames de Damas ?

Notons d'abord que les motifs de surface peuvent être reproduits de différentes façons. Certains artistes-forgerons actuels sont capables, par exemple, au cours du forgeage, de souder des couches alternées d'acier à haute et à basse concentration en carbone, formant ainsi un mélange qui ressemble à l'acier damassé. Cette technique est connue en Occident depuis l'Antiquité romaine, et on trouve des procédés similaires en Indonésie et au Japon. Toutefois, la structure interne de ces lames est totalement différente de celle des lames forgées dans le wootz. Pour éviter toute confusion entre ces deux modes de fabrication, je désignerai les lames composites soudées par forgeage sous le nom de «damas soudé» et réserverai le terme «damas en wootz» aux armes qui nous intéressent ici.

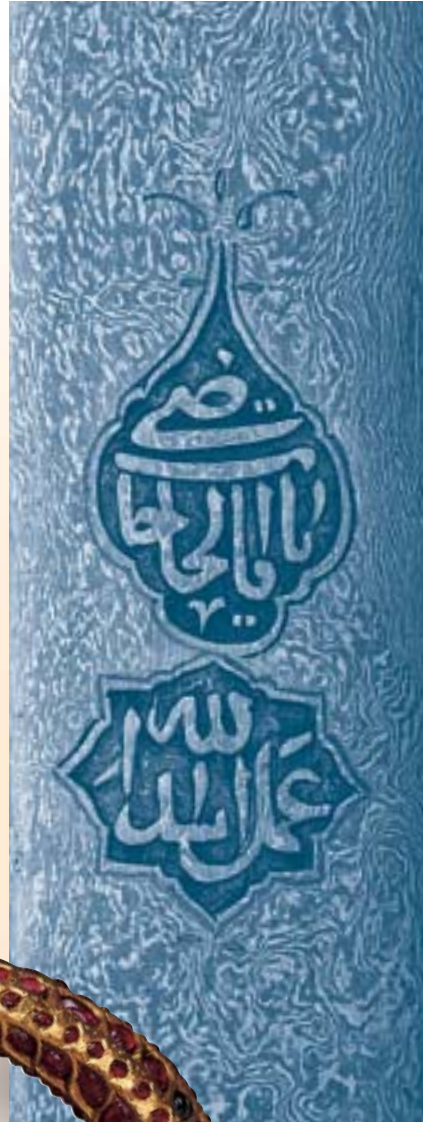
En 1819, l'Anglais Michael Faraday émit l'hypothèse que les propriétés remarquables de l'acier damassé pouvaient être obtenues par l'ajout de petites quantités de silice et d'alumine. L'hypothèse était erronée, mais stimula un inspecteur de l'Office des monnaies de Paris, Jean Robert Bréant, qui démontra que l'exceptionnelle dureté de l'acier damassé provenait de sa haute teneur en carbone. En 1824, Bréant et, un peu plus tard, Pavel Anosoff, en Russie, annoncèrent qu'ils avaient réussi à découvrir le secret des maîtres-forgerons arabes ; tous deux

1. LES MOTIFS DAMASSÉS présents sur la lame d'une épée du XVII^e siècle sont constitués de bandes claires et sombres entremêlées. L'inscription nous apprend que cette excellente lame a été fabriquée en 1691 ou en 1692 par Assad Allah, le plus renommé des forgerons persans de cette époque.

affirmèrent qu'ils avaient reproduit les lames identiques aux armes originales. Au cours du XX^e siècle, d'autres solutions ont été proposées, mais aucun artisan moderne n'a jamais réussi, en utilisant ces méthodes, à produire des lames satisfaisantes, qui présentaient à la fois l'aspect extérieur moiré et la structure interne des lames anciennes.

La comparaison des caractéristiques chimiques et microscopiques des lames de wootz modernes et de leurs homologues anciennes a longtemps été impossible, parce que les armes damassées, dignes de figurer dans les musées, sont des objets d'art de grande valeur et sont rarement sacrifiées à la science pour que leur structure interne soit étudiée. En 1924, pourtant, un collectionneur fit don de quatre épées à un métallurgiste : la première étude chimique et microstructurale eut enfin lieu. Les morceaux restants furent donnés au Musée de Berne, en Suisse, qui m'en confia quelques-uns pour que je les étudie.

Lorsque j'examinai ces précieux échantillons, je découvris qu'ils contenaient des bandes d'un matériau constitué de particules de carbure de fer (Fe_3C), nommé cémentite. Ces particules mesurent entre six et neuf micromètres (millionièmes de mètre) de diamètre. Elles sont bien arrondies et étroitement agglomérées formant des incrustations



Autorisation de Butterfields



2. CE POIGNARD à lame d'acier damassée a été fabriqué en Inde vers 1585. La lame de haute qualité est épaissie près de la pointe afin de pouvoir transpercer une armure ; la poignée en or est incrustée d'émeraudes et de rubis.

©1985 Metropolitan Museum of Art

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.

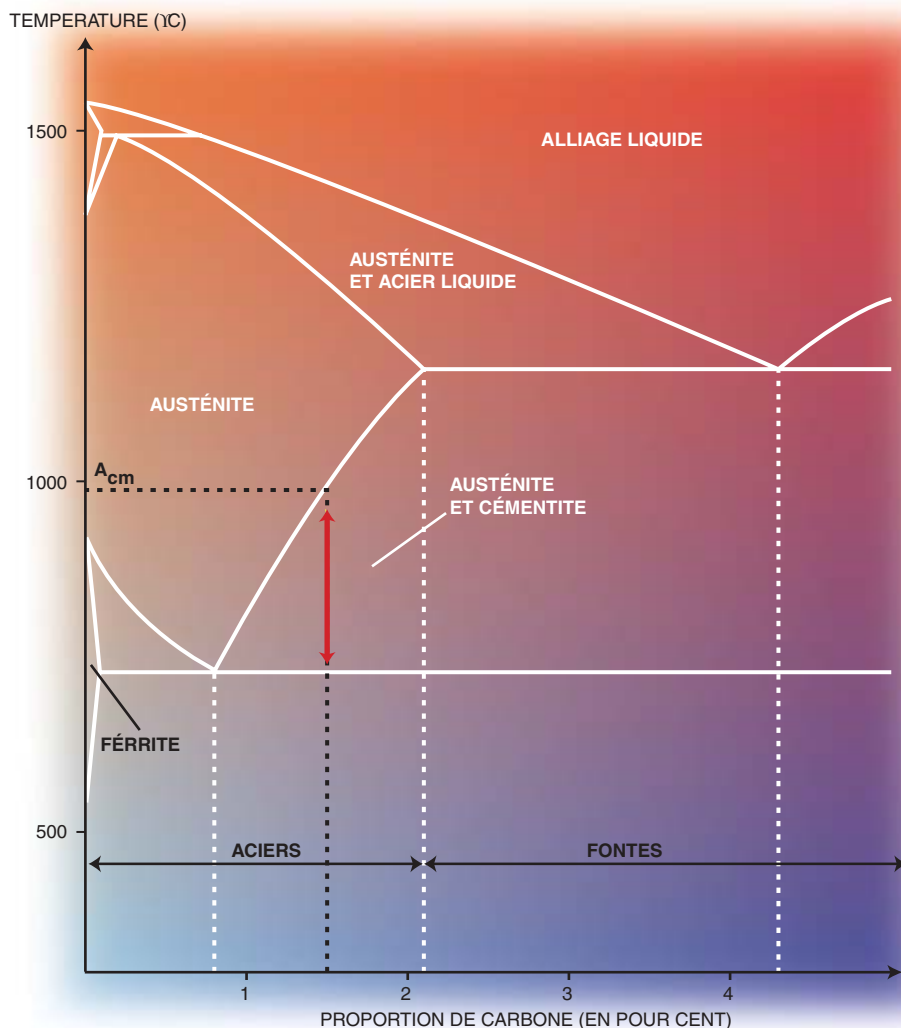
Nous avons commencé à travailler ensemble en 1988. Pour que nos techniques soient reproductibles, il nous fallait étayer nos théories avec des données scientifiques précises et contrôler de façon rigoureuse les détails de nos expériences. En 1993, nous avons installé à la forge de A. Pendray un thermocouple 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.

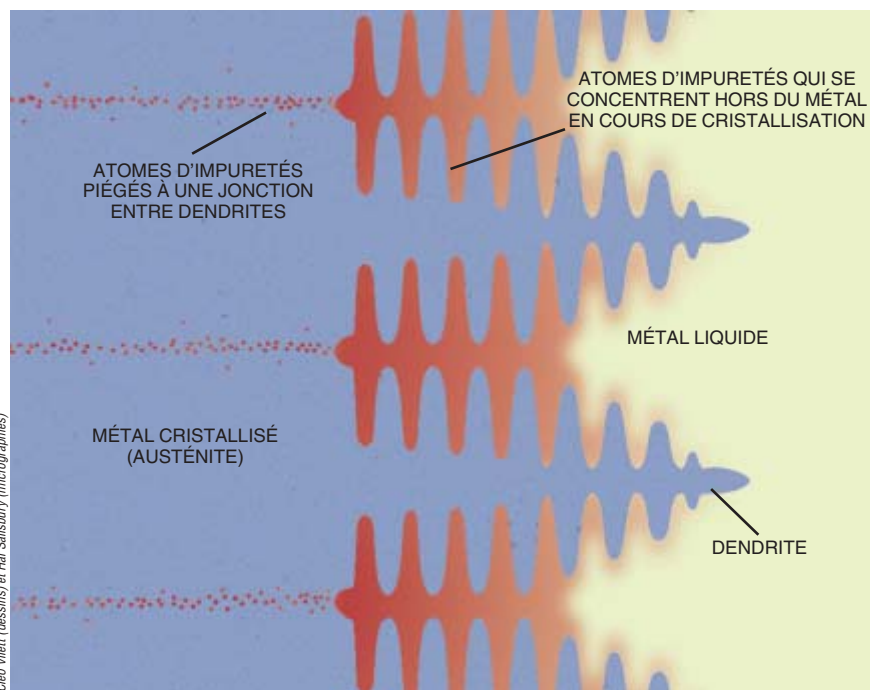
Histoire d'acier

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

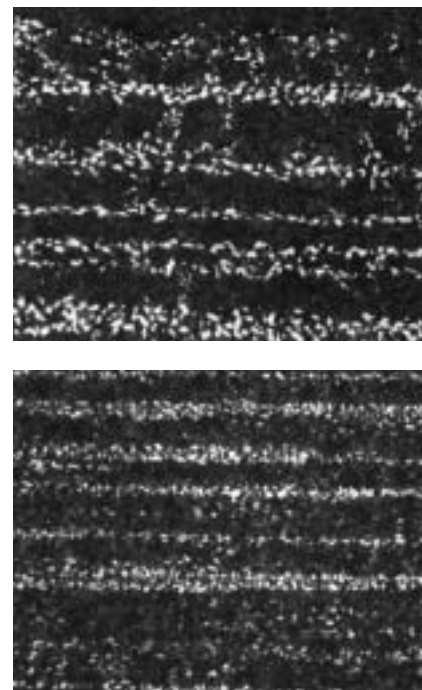
centrées (la maille élémentaire du cristal est constituée d'un cube où les atomes se répartissent aux sommets et au centre des faces de ce cube). Au cours de la cristallisation, le métal liquide est piégé dans les régions situées entre les dendrites (interdendritiques). Or, la structure de l'austénite 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-



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.

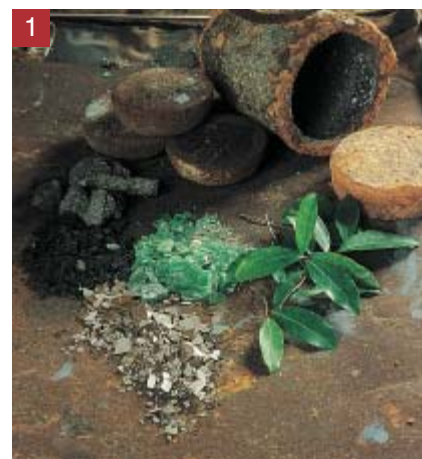
2. On chauffe le creuset. Pendant cette phase, le verre fond, formant une couche qui protège le lingot de l'oxydation. Les feuilles dégagent de l'hydrogène, qui favorise la combinaison du carbone et du fer. La concentration en carbone du fer s'élève à 1,5 pour cent, une bonne proportion pour former les 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.

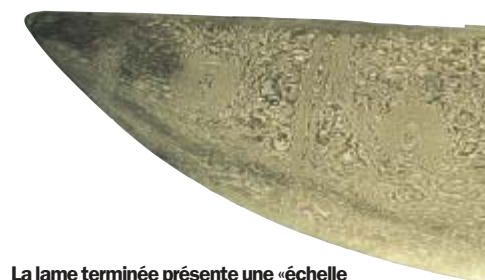
4. On forge le lingot, c'est-à-dire qu'on le frappe à l'aide d'un marteau pour le déformer légèrement tant qu'il est chaud. Lorsque le lingot est trop froid pour se déformer sans fissures, on le réchauffe et on le forge à nouveau. On a photographié quatre étapes successives du forgeage du lingot, chacune 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».

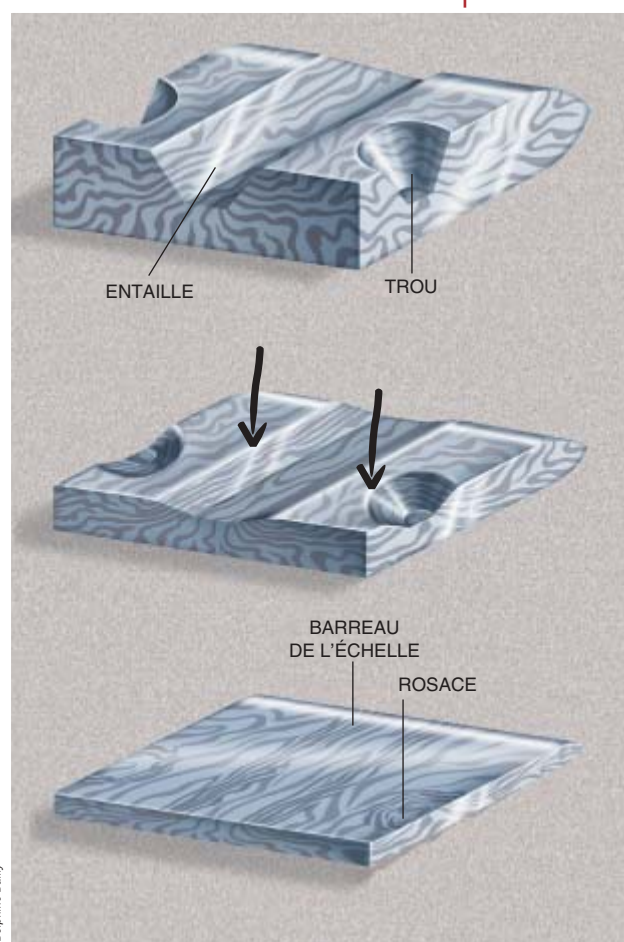
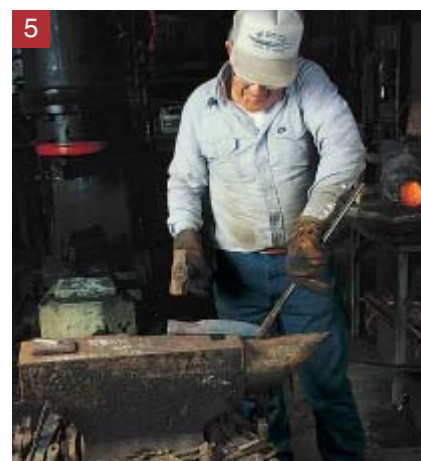
avoir cherché la réponse à notre question pendant deux ans, nous avons fini par comprendre que ces traces de vanadium étaient, en fait, essentielles.

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.

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.
