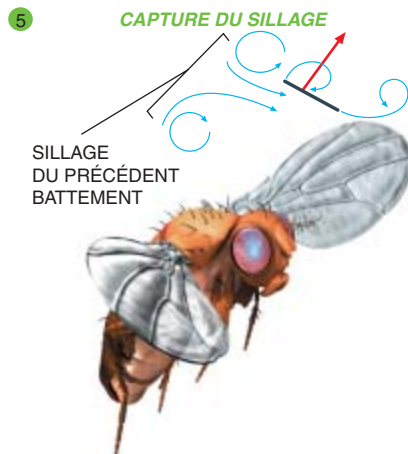




logue à celle d'une balle de tennis en rotation. Au début de la levée de l'aile, celle-ci retransverse le sillage créé par l'aile quand elle était abaissée. L'aile est orientée de façon que le surplus d'écoulement d'air produit crée davantage de portance : ce phénomène est dénommé la capture de sillage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

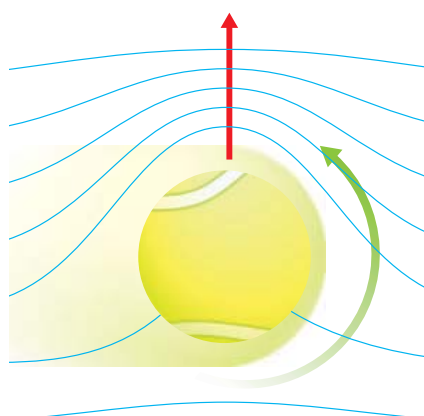
Comprendre le vol des insectes résoudra une ancienne énigme scientifique, mais aura peut-être aussi des applications pratiques. Par exemple, des ingénieurs tentent de mettre au point des robots volants miniatures (voir la figure 1) pour la recherche et le sauvetage, la surveillance de l'environnement, 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 par 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).

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/~fly-manmd/>



**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.

# 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<sup>e</sup> siècle, mais il semble avoir été retrouvé grâce à diverses expériences récentes de métallurgie.*

**D**e l'âge du bronze à la fin du XVIII<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> siècle. Heureusement, nous avons sans doute percé le secret de ces épées.

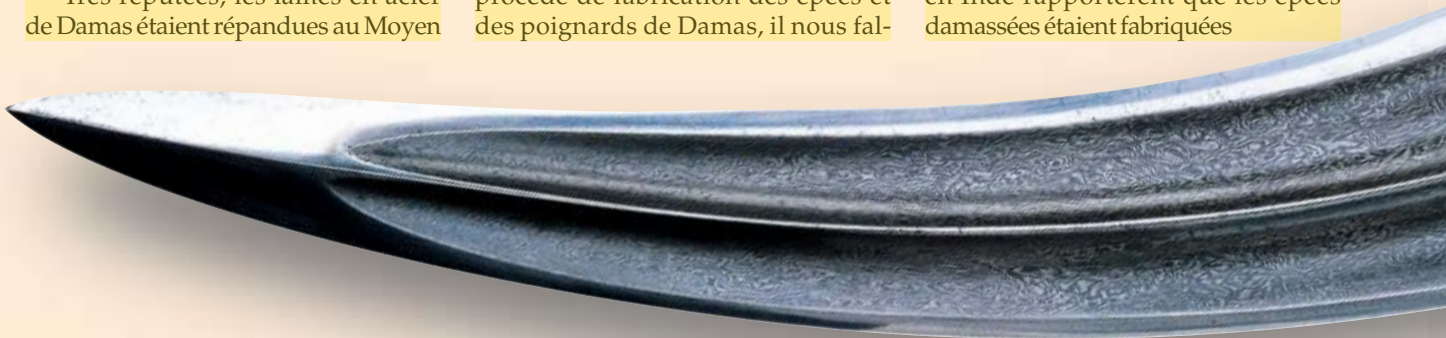
Nous ne sommes pas les premiers à annoncer une solution au mystère des aciers damassés, mais nous sommes les premiers à avoir réussi à fabriquer des répliques fidèles de ces armes légendaires. Pour valider un procédé de fabrication des épées et des poignards de Damas, il nous fal-

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<sup>e</sup> 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.

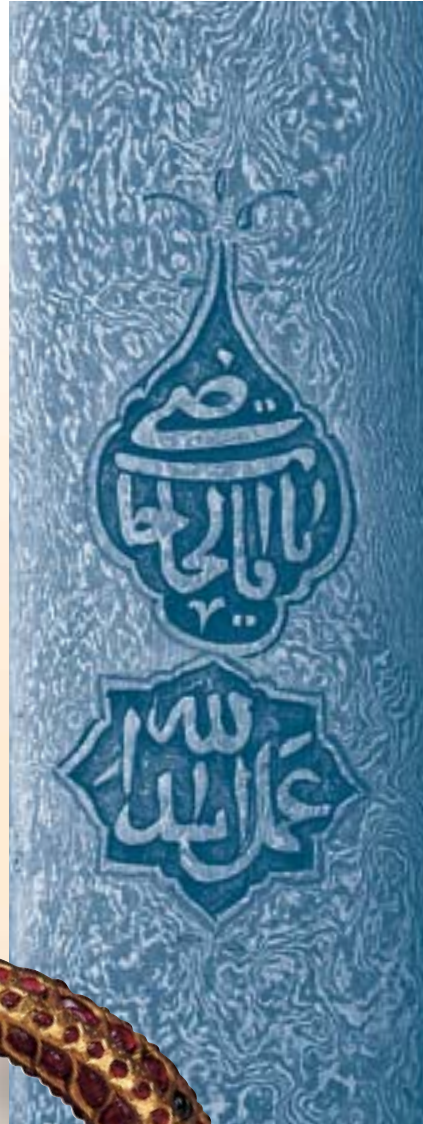
En 1819, l'Anglais Michael Faraday émit l'hypothèse que les propriétés remarquables de l'acier damassé pouvaient être obtenues par l'ajout de petites quantités de silice et d'alumine. L'hypothèse était erronée, mais stimula un inspecteur de l'Office des monnaies de Paris, Jean Robert Bréant, qui démontra 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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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 ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), 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.

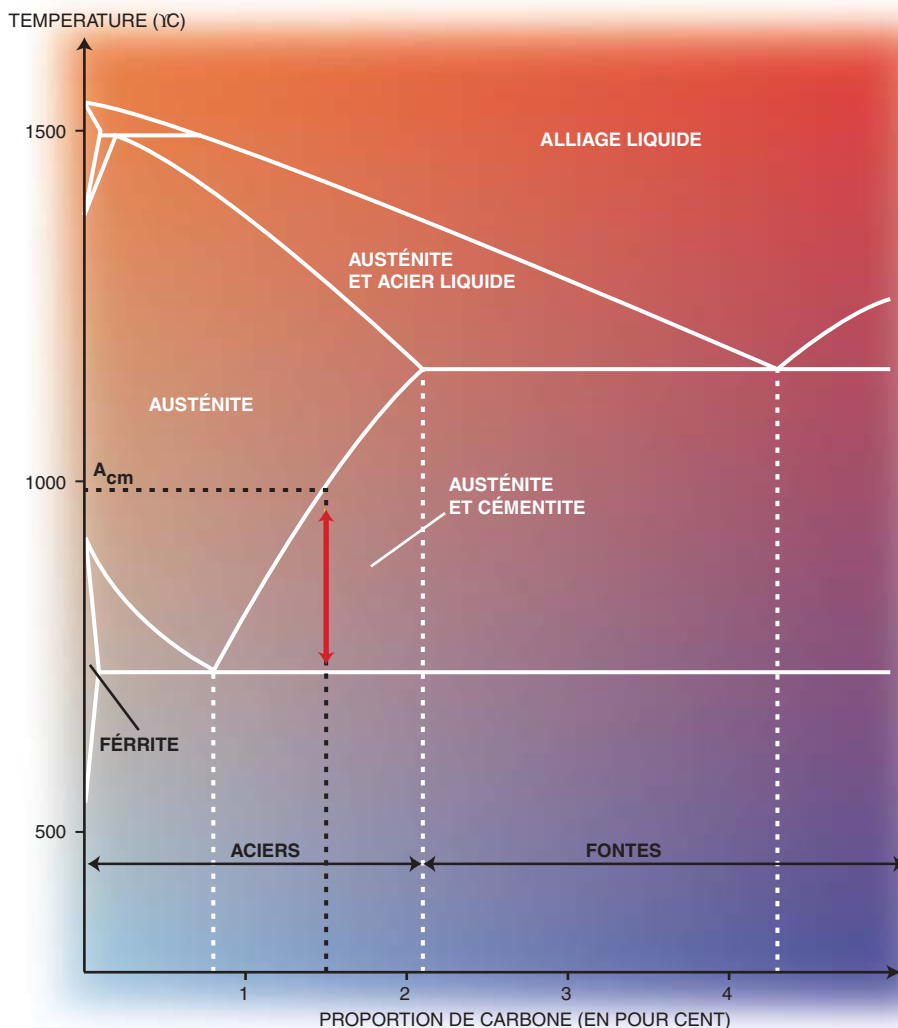
Nous avons commencé à travailler ensemble en 1988. Pour que nos techniques soient reproductibles, il nous fallait étayer nos théories avec des données scientifiques précises et contrôler de façon rigoureuse les détails de nos expériences. En 1993, nous avons installé à la forge de A. Pendray un thermocouple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