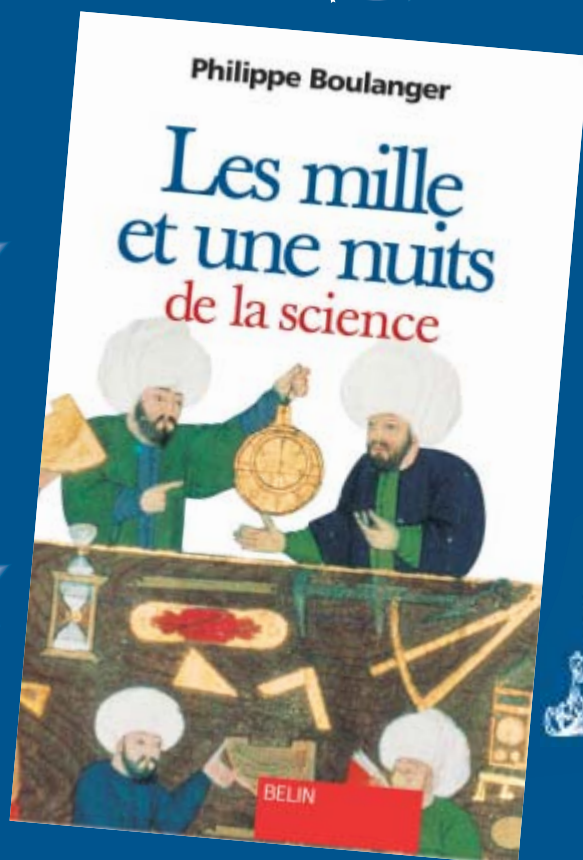


Entrez dans l'ambiance orientale
des mille et une nuits et laissez-vous
charmer par l'imagination
de Shéhérazade contant la science
et les tribulations des savants



«Dans ce livre, Philippe Boulanger,
Directeur de la revue Pour la Science,
réussit le tour de force de vulgariser des
concepts difficiles en charmant son lecteur
par une subtile danse... des neurones».

Hervé Ponchelet
Le Point

Code 2445 • 240 pages • Prix 100 F
Voir bon de commande p. 98

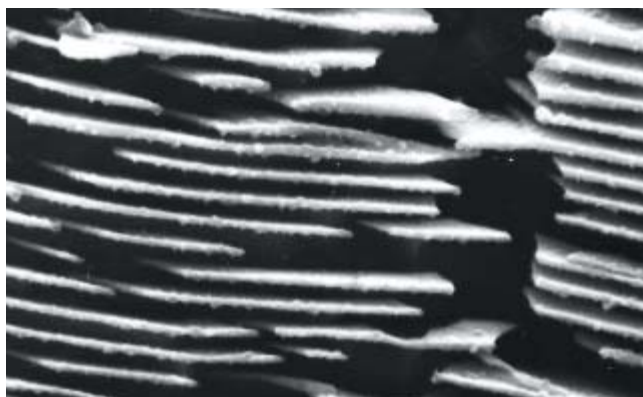
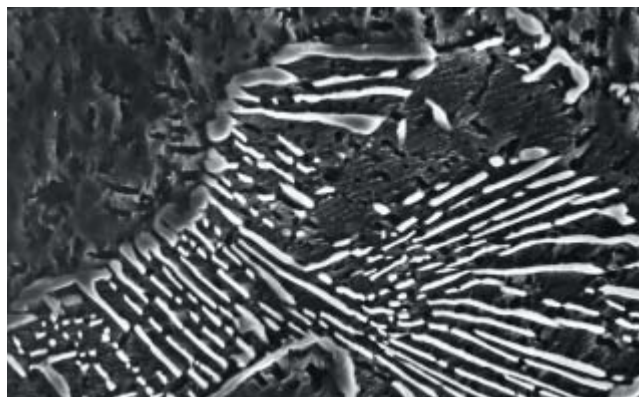
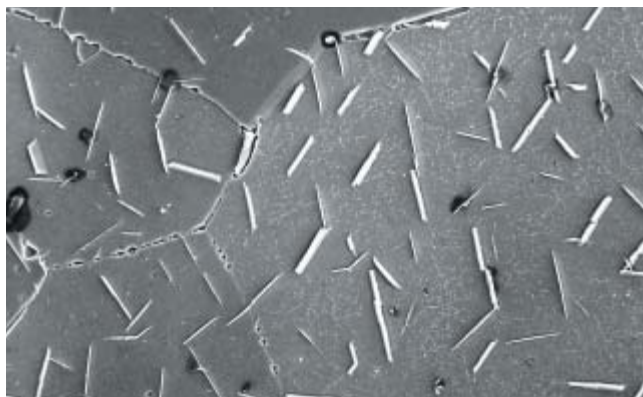
BELIN • POUR LA SCIENCE

choisi d'étudier les évolutions de la microstructure métallique avec le temps.

Lorsqu'un acier vieillit, le carbone diffuse lentement. Le fer existe sous deux formes cristallines : aux basses températures et jusqu'à 910 °C, les atomes de fer sont disposés suivant un réseau cubique centré (il est constitué de cubes juxtaposés avec des atomes de fer aux sommets de chaque cube et en leurs centres) ; aux températures comprises entre 910 °C et 1 392 °C, le réseau cristallin du fer est du type cubique à faces centrées (il est constitué de cubes juxtaposés avec des atomes de fer aux sommets et aux centres des faces de chaque cube) ; au-dessus de 1 392 °C et jusqu'au point de fusion, à 1 535 °C, le fer retrouve la structure cubique centrée. Un acier est un alliage de fer et de moins de deux pour cent de carbone. Les différentes phases qui le constituent résultent de la solubilité différente du carbone dans chacune des formes cristallines du fer. Ainsi, la «solution» de carbone dans le fer cubique à faces centrées est l'austénite, tandis que la solution de carbone dans le fer cubique centré est appelée ferrite (on parle de solution, mais il s'agit de solution solide, c'est-à-dire que des atomes de carbone se «dissolvent», ou plutôt s'insèrent, dans le réseau cristallin du fer).

La cémentite précipite

Comme le carbone est peu soluble dans le fer, un troisième constituant apparaît dans l'acier : la cémentite, c'est-à-dire du fer et du carbone sous forme de carbure de fer (Fe_3C). Ainsi, un acier, alliage de fer et de carbone, est constitué à la température ordinaire d'un mélange de ferrite et de cémentite. Toutefois, en fonction des conditions de chauffage et de refroidissement, plusieurs autres structures peuvent apparaître : la martensite (solution instable de carbone dans de la ferrite déformée), la perlite (constituée d'agrégats microscopiques de ferrite et de cémentite), la bainite (constituée d'agrégats de plaquettes en forme d'aiguilles de ferrite et de particules de cémentite),... Au moment de la trempe, un acier se fige en une structure, laquelle évolue ensuite. Les changements sont décelables au microscope électronique à balayage. Ainsi, dans les ferrites le carbone s'accumule dans des cristaux en forme de prismes. Ce phénomène, la précipitation de la cémentite (carbure) est de grande ampleur. La cémentite



A. Criado, J. Martínez, J. Jiménez et R. Calabrès

6. STRUCTURES D'ACIER MODIFIÉES PAR LE VIEILLISSEMENT. En haut à gauche, des cristaux de carbure de fer précipités dans la ferrite d'une fibule trouvée dans la nécropole ibérique de Villanueva de Teba (IV^e-II^e siècles avant notre ère) dans la région de Burgos. En haut à droite, des plaques de cémentite sont noyées dans la perlite de l'acier d'une boucle de la même nécropole. En bas à gauche, des plaques cristallines sont présentes dans l'acier hypereutectoïde d'un clou romain du

Haut-empire de la villa romaine de Cerro Muriano (entre -100 et 100). En bas à droite : Tizona. On distingue une écorce de perlite fine associée à de la ferrite dans la zone de transition entre le noyau et la zone dure externe. Ces formes vieilles d'acier ne peuvent être reproduites en laboratoire parce qu'elles sont le résultat de centaines d'années d'évolution lente. Toute tentative de reproduction de telles structures à haute température conduit à des morphologies différentes.

tite se concentre dans la perlite sous forme de plaques en forme de prismes. Dans la bainite et la perlite, des blocs de ferrite se forment, au sein desquels la cémentite s'accumule sous des formes sphéroïdes. La précipitation de la cémentite se produit le long de certains plans des cristaux de ferrite. À mesure qu'il vieillit, le métal perd sa souplesse et sa résistance mécanique. Le processus de vieillissement dépend surtout de la diffusion lente du carbone dans la ferrite, et les formes les plus stables sont sélectionnées.

Ces phénomènes dus au vieillissement ont été observés dans tous les aciers et dans les fers archéologiques déjà étudiés. Avec le temps, les carbures s'accumulent et la taille moyenne des particules dépend du temps écoulé depuis l'élaboration de l'acier.

Afin de calculer l'âge de Tizona, nous avons construit un modèle mathématique reproduisant les phénomènes dus au vieillissement. Pour le valider, nous avons évalué l'âge de pièces antiques et médiévales dont on sait à quel moment elles ont été fabriquées,

et obtenu des résultats raisonnables. D'après notre modèle, Tizona daterait d'environ 950 ans, c'est-à-dire qu'elle aurait bien été forgée dans la première moitié du XI^e siècle, à l'époque du Cid. Nous espérons pouvoir bientôt préciser cette datation à dix ans près.

Nul ne sait comment une arme typiquement mauresque aurait pu devenir la propriété du Cid, même si ce dernier a longtemps servi un maître musulman. Par ailleurs, rien ne permet d'affirmer que la lame d'acier que nous avons étudiée, a effectivement appartenu à

l'homme de Burgos. A l'époque du Cid ou avant, les chevaliers chrétiens étaient nombreux à préférer les armes sarrasines. Ainsi, Roland, qui avait guerroyé longtemps en Espagne avant d'être tué au col de Roncevaux, en utilisait une, la célèbre *Durandal*. Charlemagne de son côté utilisait *Joyeuse*, elle aussi d'origine mauresque. De nombreuses questions restent ouvertes quant à l'origine de Tizona. Notre étude n'a établi avec certitude que deux choses : Tizona est une lame d'acier d'origine mauresque et elle date du XI^e siècle.

José CRIADO, Juan Antonio MARTÍNEZ, José Manuel JIMÉNEZ, et Rafael CALABRÈS appartiennent tous à l'équipe de recherches sur les techniques anciennes et l'archéométallurgie de la Faculté des sciences chimiques de l'Université Complutense de Madrid. Criado et Martínez sont professeurs au département de sciences des matériaux et d'ingénierie métallurgique, où Jiménez et Calabrès présentent leur doctorat.

Antonio J. CRIADO et al., *Metallographic Study of the Steel Blade of the Sword Tizona*, in *Practical Metallography*, vol. 37, n° 7 : 2000

Poema del mio Cid, Anonyme, Édition de Colin Smith, Ediciones Altaya S.A. Barcelona 1993. Ed en fr : *Le poème du Cid*, La renaissance du livre, s.d.

Le Cid : personnage historique et littéraire : anthologie de textes arabes, espagnols, français et latins avec trad., réunis par Mikel de Epalza, Suzanne Guel-laz, Paris Maisonneuve, 1983.

Un monde de spins

BRIAN HAYES

Tout au long du XX^e siècle, les physiciens ont étudié le modèle d'Ising, une représentation simplifiée de l'aimantation. Après de francs succès à une et deux dimensions, ils simulent le modèle à trois dimensions sur ordinateur...

Pierre-Simon de Laplace, mécanicien céleste, pensait que l'Univers est entièrement régi par les forces que les particules exercent les unes sur les autres. Il avait donc conçu un projet d'une ambition immense, qu'il pensait réaliser à l'aide d'un plan d'une extrême simplicité : il voulait mesurer toutes les forces et toutes les vitesses à un certain instant, puis reconstituer, par le calcul, l'évolution complète de l'Univers – passée, présente et future. Deux siècles de progrès scientifiques plus tard, le projet de Laplace n'a toujours pas abouti ; au contraire, la mécanique quantique, puis la théorie du chaos, l'ont rendu caduc. Pourtant, il existe des situations où le projet de Laplace semble réalisé : la modélisation des phénomènes physiques. Quand nous étudions un modèle plutôt que l'Univers réel, nous pouvons, en principe, suivre toutes les forces et tous les mouvements, inven-

ter et imposer des lois physiques. Pourtant, notre compréhension d'un tel modèle n'est souvent que partielle. Même si, avec ce modèle, nous parvenons à suivre les particules une à une, nous ignorons comment elles interagissent quand elles sont des millions. En d'autres termes, nous sommes alors incapables de prévoir des phénomènes thermodynamiques aussi élémentaires que l'ébullition ou le gel.

Un tel modèle, fut élaboré dans les années 1920 par les physiciens Wilhelm Lenz et Ernst Ising pour établir une théorie simplifiée du ferromagnétisme expliquant l'aimantation des barreaux de fer. Cette théorie est nommée modèle d'Ising, parce qu'Ernst Ising en fit le sujet de la thèse de doctorat, dirigée par Lenz, qu'il obtint à l'Université de Hambourg. S'il est une situation où le projet de Laplace avait un sens, c'est bien le ferromagnétisme décrit à la façon d'Ising!

Tout au long du XX^e siècle, les physiciens se sont passionnés pour ce modèle. Après le travail de pionnier d'Ising en 1925, Rudolf Peierls réalisa son importance en 1936 et Lars Onsager parvint en 1944 à déterminer par un calcul exact la transition de phase du système à deux dimensions, c'est-à-dire la température à laquelle il s'aimante brusquement. Une transition de phase est une transformation drastique d'un matériau, comme la solidification de l'eau à 0 °C. Le modèle d'Ising à trois dimensions a résisté, en revanche, aux efforts intenses entrepris pour l'explorer ; aujourd'hui, les physiciens s'évertuent toujours à le comprendre et à y identifier la transition de phase. Comme les calculs exacts demeurent hors de portée, les physiciens tentent aussi de réaliser le projet de Laplace... à l'ordinateur. Simuler ainsi le monde sur ordinateur est une gageure, car les résultats

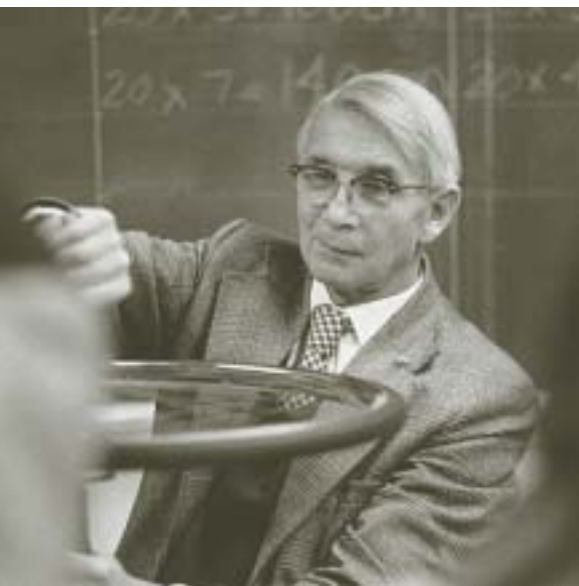
obtenus peuvent être une propriété réelle, mais aussi un artefact de calcul.

Le modèle d'Ising est une description naïve d'un réseau cristallin d'atomes de fer. Les éléments de base du modèle sont symbolisés par des flèches qui pointent, soit vers le haut, soit vers le bas ; elles représentent les spins, c'est-à-dire les moments cinétiques des atomes. Ces spins d'Ising sont disposés sur un réseau dont la maille élémentaire est carrée (ou rectangulaire). Des spins voisins «préfèrent» pointer dans la même direction, ce qui traduit le fait que l'énergie du système est petite lorsque des spins adjacents sont parallèles et grande lorsqu'ils sont antiparallèles ; dans ce modèle, les spins n'interagissent qu'avec leurs voisins les plus proches. Les spins ne sont pas tous orientés parallèlement à cause de la température : l'énergie thermique perturbe l'arrangement parfait de spins parallèles. Enfin, les spins sont soumis à une contrainte supplémentaire : un champ magnétique extérieur tend à les aligner dans sa direction.

Un modèle simple d'aimant

Ce modèle d'Ising est l'un des plus simples inventés par les physiciens pour décrire un grand nombre de particules qui ont un comportement «solidaire». Toutefois, il induit des calculs redoutables, et ce, même avec toute la puissance des calculateurs modernes.

Le modèle d'Ising reproduit bien les principaux aspects de la réalité. Les spins d'Ising correspondent à ceux des électrons en rotation autour des atomes de fer, lesquels sont rangés suivant un réseau cristallin dont la maille est cubique centrée ou cubique à face centrée. La disposition des spins d'Ising sur un réseau régulier à maille carrée ou cubique reproduit cette propriété.



Bradley University, Peoria, IL

1. ERNST ISING (1900–1998) était passionné par l'enseignement de la physique. Originaire d'Allemagne, il fut nommé «meilleur professeur de l'année aux États-Unis», en 1971.