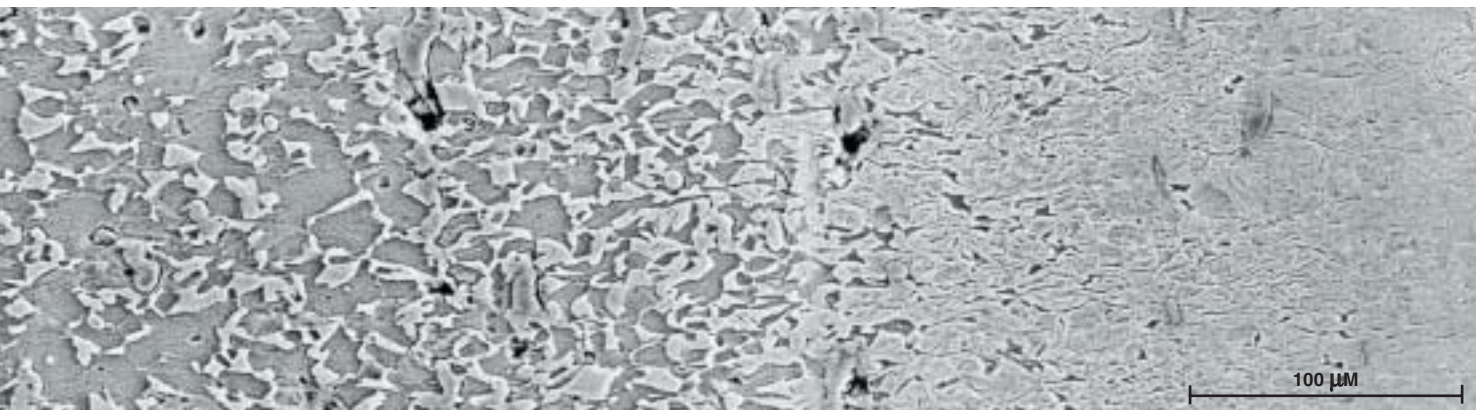




A. Criado, J. Martínez, J. Jiménez et R. Calabrés

**4. LA TRANSITION** entre l'acier doux du cœur de la lame (à gauche) et l'écorce extérieure en acier dur (à droite) est très progressive. Le cœur de l'épée doit sa souplesse à la faible proportion de carbone qu'il contient : 0,1 pour cent en masse. L'écorce extérieure

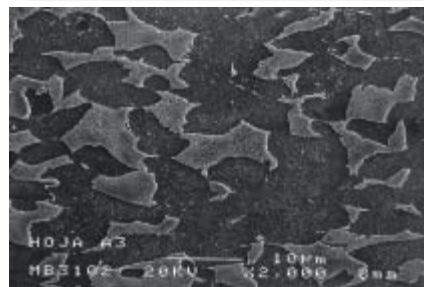
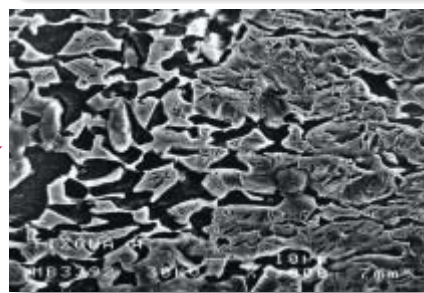
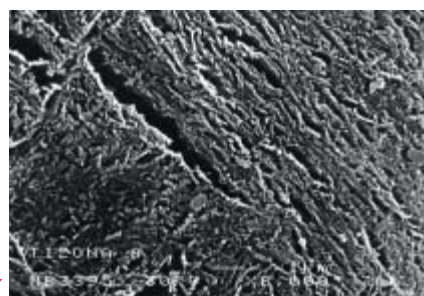
doit sa dureté à sa proportion supérieure de carbone : 0,9 pour cent en masse. Une telle transition indique que le maître de forge trempait la lame dans une solution salée : le refroidissement plus lent explique la transition observée.

provenance arabo-andalouse de Tizona, nous avons comparé les caractéristiques des minerais des aciers espagnols à celles de minerais d'origines européenne ou africaine : seule une origine arabo-andalouse de Tizona est envisageable. Nous avons aussi procédé à une analyse des isotopes du plomb présents dans certaines impuretés contenues dans les aciers : l'hypothèse que l'acier de Tizona provient d'Andalousie a été confirmée par cette méthode.

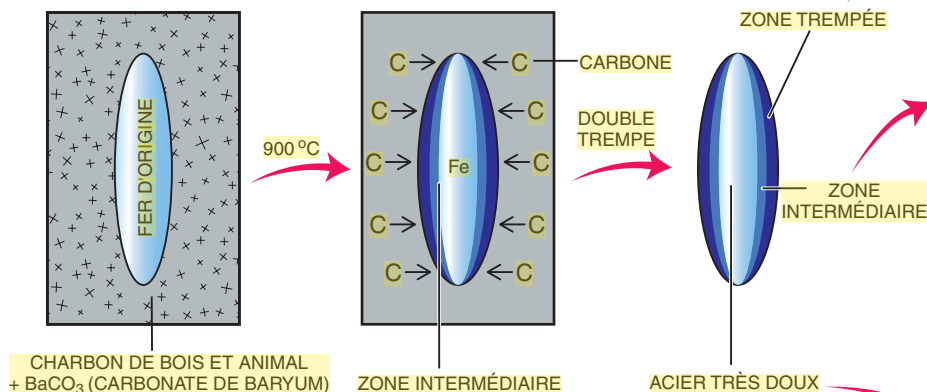
La datation de Tizona posait un problème particulier à cause des inscriptions qui ornent les gouttières et la poignée. D'après le type de la garde et celui des caractères, Tizona serait postérieure au XI<sup>e</sup> siècle. La poignée et la garde actuelles, réalisées en fer forgé, présentent les « caractères impériaux » typiques de l'époque de Charles I<sup>er</sup> (1516-1556). Ainsi, chacune des deux branches de la croix que forme l'épée (les quillons)

est tournée vers le bas, percée et unie à l'épée par un renfort, l'entourant et revenant en angle droit vers l'intérieur. Le pommeau a une forme de feuille de poirier. La poignée, en bois parcheminé, a été rehaussée aux métaux nobles (on en découvre les restes sur les radiographies). D'après les chroniques de l'époque de Charles I<sup>er</sup>, la poignée d'origine aurait été ornée d'or, d'argent, de pierreries, d'ivoire et d'autres matières précieuses, mais non de fer forgé. Les inscriptions en lettres de la renaissance sont très probablement un autre héritage de l'époque de Charles I<sup>er</sup>. Elles ont été réalisées à l'acide, par quelqu'un qui, manifestement, ignorait la structure interne de la lame d'acier, et la virtuosité technique nécessaire à sa réalisation. Ces gravures n'ont pu être l'œuvre de l'artisan qui façonna Tizona, qui n'aurait pas accepté de détruire la couche carburée, et de rendre ainsi l'épée inutilisable au combat. Quant à

la légende «*io soi...*», elle apparaît anachronique, si on la suppose du XI<sup>e</sup> siècle. Comment une épée mauresque aurait-elle pu être datée en castillan d'après le calendrier chrétien ? Le même argument s'applique à l'inscription «*ave maria gratia plena dominus mecun*», chrétienne et donc impensable dans un contexte islamique. La poignée et les inscriptions étant manifestement postérieures à la fabrication de Tizona, il nous restait à dater la lame. Pour ce faire, nous avons



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



**5. TROIS COUPES DE LA LAME DE TIZONA.** L'écorce se compose de deux zones : la zone intermédiaire, où la perlite prédomine, sert d'ancrage pour la couche externe ; la zone externe (*en haut*), très dure, où la bainite et la martensite prédominent. Le cœur de l'arme (*en bas*) est constitué d'une structure ferritique. Le procédé de trempage a doté la lame de Tizona d'excellentes propriétés mécaniques : flexibilité, dureté, ténacité et tranchant inusable.

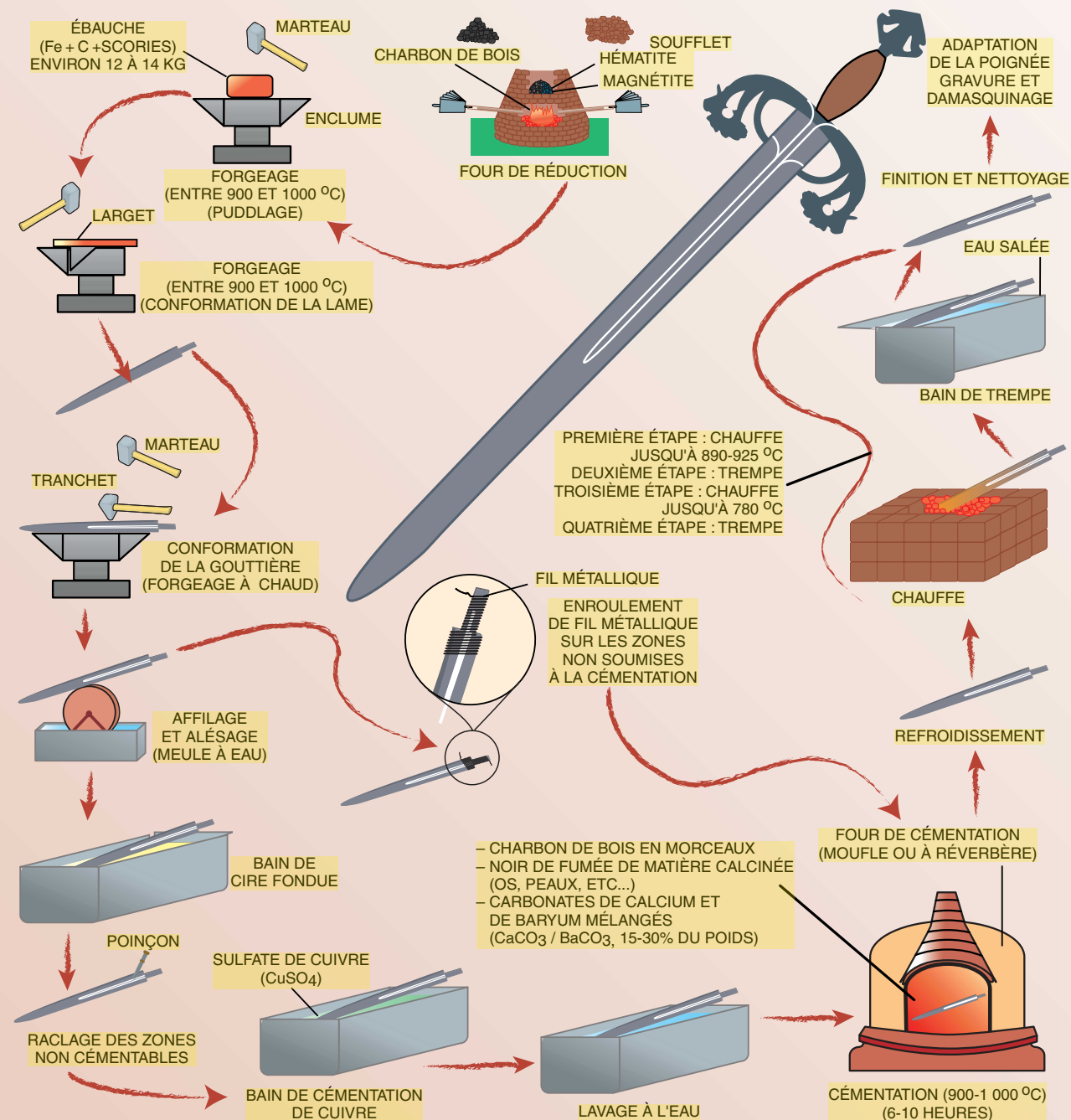
## Comment Tizona fut façonnée

**A**près avoir mené des essais dans notre laboratoire, nous pensons avoir reconstruit le procédé de fabrication de Tizona. Dans un premier temps, le minerai de fer est réduit à l'aide de charbon de bois. On passe ensuite à un forgeage à chaud entre 900 et 1 000 °C d'un noyau de fer, que l'on aplatit. Un tranchet sert à former les gouttières de cette future lame, laquelle est aplanie et effilée au moyen d'une meule. Les zones où le carbone ne doit pas diffuser, tel le manche de la poignée, sont ensuite protégées à l'aide de fil métallique, puis plongées dans un bain de sulfate de cuivre ; ensuite, ces zones, qui ne doivent pas être cémentées, sont recouvertes d'une couche de cire.

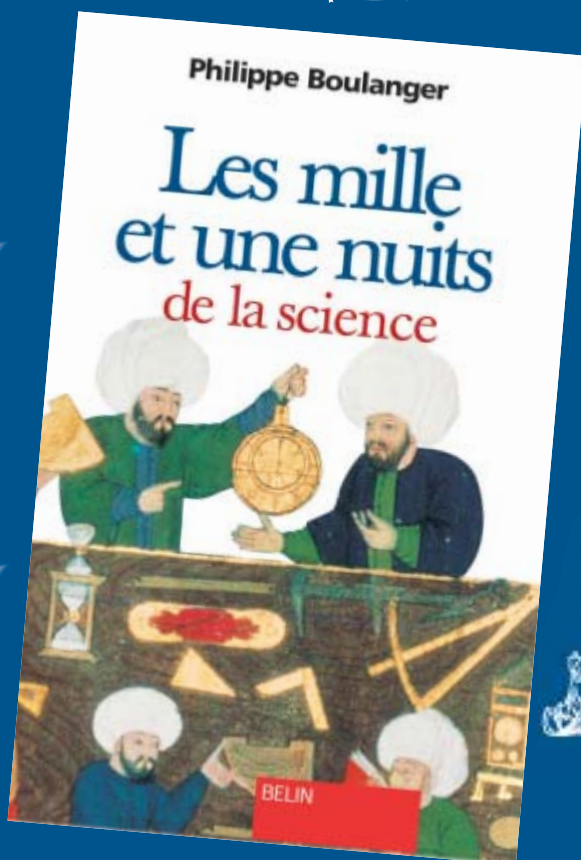
Puis, les forgerons passent à la cémentation. Ils la réalisent dans un four dont la température est située entre 900 et 1 000 °C ; l'opération dure de 6 à 10 heures. La pièce est placée dans le four

en compagnie de morceaux de charbon de bois, de matière organique (des os, des morceaux de peau animale) et d'un mélange de carbonate de calcium et de carbonate de baryum (15 à 30 pour cent de la masse totale).

Après la cémentation, vient la trempe. Celle-ci se déroule en deux étapes : la première a lieu entre 890 et 925 °C et la seconde à 780 °C. La lame est plongée par la pointe dans un bain d'eau salée jusqu'à refroidissement complet de l'acier. Procédure complexe, cette trempe associe des structures dures, et résistantes. Plusieurs phases de l'acier sont ainsi associées dans des proportions variables en fonction de la zone : la martensite, la bainite, la perlite fine et l'austénite. Le tout produit des propriétés mécaniques différentes de la pointe à la poignée. L'épée est finalement nettoyée et pourvue d'une poignée.



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 ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). 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