

Les propriétés des nanotubes de carbone

PROPRIÉTÉ	NANOTUBES À PAROI UNIQUE	POUR MÉMOIRE
 TAILLE	0,6 à 1,8 nanomètre de diamètre.	La lithographie par faisceau électronique peut créer des lignes de 50 nanomètres de large et de quelques nanomètres d'épaisseur.
 DENSITÉ	1,33 à 1,40 gramme par centimètre cube.	L'aluminium a une densité de 2,7 grammes par centimètre cube.
 RÉSISTANCE	45 milliards de pascals.	Les alliages en acier les plus résistants se brisent à environ deux milliards de pascals.
 ÉLASTICITÉ	Ils peuvent être fortement courbés sans déformation irréversible.	Les métaux et les fibres de carbone se fracturent au niveau des limites entre les grains.
 CAPACITÉ DE TRANSPORT DU COURANT	Estimée à un milliard d'ampères par centimètre carré.	Les fils de cuivre grillent à environ un million d'ampères par centimètre carré.
 ÉMISSION DE CHAMP	Ils peuvent activer le phosphore à une tension comprise entre 1 à 3 volts quand les électrodes sont éloignées de un micromètre.	Des pointes de molybdène requièrent des champs électriques de 50 à 100 volts par micromètre et ont des durées de vie très limitées.
 TRANSMISSION DE LA CHALEUR	Elle serait de 6 000 watts par mètre et par kelvin à température ambiante.	Un diamant quasi pur transmet 3 320 watts par mètre et par kelvin.
 STABILITÉ THERMIQUE	Stables jusqu'à 2 800 °C dans le vide, 750 °C dans l'air.	Les fils métalliques des microprocesseurs fondent entre 600 et 1 000 °C.
 COÛT	5 000 francs par gramme.	L'or valait 70 francs le gramme en octobre 2000.

Laurie Grace

de carbone comme émetteurs de champ. La Société *Ise Electronics*, à Ise au Japon, utilise des composites de nanotubes pour fabriquer des lampes à vide. Elles existent en six couleurs, sont deux fois plus lumineuses, ont une durée de vie supérieure et consomment dix fois moins d'énergie que les ampoules classiques. Le premier prototype a fonctionné pendant plus de 10 000 heures et fonctionne toujours. Par ailleurs, des ingénieurs de la Société *Samsung*, à Séoul, ont appliqué un mince film de nanotubes sur un circuit électronique de contrôle et l'on recouvert d'un verre enduit de phosphore. Ils ont ainsi réalisé un prototype d'écran plat. Ils espèrent commencer à produire cette année cet écran plat, aussi lumi-

neux qu'un tube cathodique, mais consommant dix fois moins d'énergie.

Les nanotubes de carbone, objets extrêmement petits, présentent des propriétés électroniques particulières liées à leur taille. À cette petite échelle, le concept de résistance électrique d'un fil n'a plus de sens et doit être remplacé

par un modèle quantique. Aujourd'hui, les physiciens étudient comment les électrons se déplacent le long d'un nanotube. Il semble que dans les nanotubes sans défauts, les électrons se déplacent de façon «balistique», c'est-à-dire sans collision, mécanisme qui confère leur résistance aux fils métalliques. Quand des électrons se propagent sur de longues distances sans collision, ils restent dans le même état quantique, ce qui est indispensable pour que les ondes associées interfèrent. L'absence de collision expliquerait pourquoi les électrons conservent leur état de spin (une propriété quantique de l'électron) lorsqu'ils se propagent le long des nanotubes. Des physiciens essaient de tirer parti de ce comportement inhabituel pour fabriquer des dispositifs «spintroniques» qui commutent selon l'état de spin des électrons, et non simplement en fonction de leur charge, comme le font les dispositifs électroniques.

Dans un nanotube, le flux des électrons peut être contrôlé avec une précision presque parfaite. Un phénomène, nommé blocage de Coulomb, a récemment été mis en évidence dans les nanotubes : les électrons «s'opposent» à ce que l'on introduise plus d'un électron à la fois dans un nanotube. Ce phénomène pourrait faciliter la construction de transistors à électron unique, l'idéal de l'électronique ultra-sensible.

Avant de réaliser de nouveaux dispositifs quantiques, il reste des problèmes à résoudre. Tous les dispositifs moléculaires, y compris les nanotubes, sont par exemple très sensibles aux fluctuations électriques, thermiques et chimiques. Des agents contaminants, tel l'oxygène, perturbent aussi leurs propriétés électriques. Cela pourrait être utile pour des détecteurs chimiques extrêmement sensibles, mais c'est un obstacle pour la fabrication de circuits à molécule unique. Aujourd'hui, la question n'est plus de savoir si les nanotubes deviendront des composants de l'électronique du futur, mais simplement comment et quand.

Philip COLLINS travaille au Centre de recherche Thomas Watson d'IBM. Phaedon AVOURIS dirige le groupe «nanoscience et nanotechnologie» d'IBM.

B. VIGOLO, A. PÉNICAUD, C. COULON, C. SAUDER, R. PAILLER, C. JOURNET, P. BERNIER et P. POULIN, *Macroscopic Fibers and Ribbons of Oriented Carbon Nanotubes*, in *Science*, n° 290, pp. 1331-1334, 2000.

Cees DEKKER, *Carbon Nanotubes as Molecular Quantum Wires*, in *Physics Today*, vol. 52, n° 5, pp. 22-28, mai 1999.

Carbon Nanotubes, in *Physics World*, vol. 13, n° 6, pp. 29-53, juin 2000.

Mildred. DRESSELHAUS, Gene. DRESSELHAUS et Phaedon. AVOURIS, *Carbon Nanotubes*, Springer-Verlag, 2000.

L'épée du Cid

A.-J. CRIADO • J.-A. MARTIN • J.- M. JIMÉNEZ • R. CALABRÈS

L'épée tenue en Espagne pour celle du Cid date bien du siècle du fameux chevalier castillan. Cette belle arme mauresque a traversé les siècles, malgré des rénovations maladroites.

L'âme du guerrier est la lame de son épée, dit la tradition. L'Espagne espère avoir conservé celle de son guerrier le plus mythique : le Cid. Du nom de Rodrigo Díaz de Vivar, cet aristocrate du XI^e siècle fut longtemps commandant en chef des troupes du roi de Castille. Au cours de sa carrière, il changea plusieurs fois de camp, vendant notamment son savoir-faire de général vaincu au roi musulman de Saragosse. Il se rendit célèbre dans toute l'Espagne chrétienne en reprenant Valence aux musulmans, et devint, après sa mort, héros national castillan et le sujet récurrent de nombreuses œuvres littéraires. Depuis des siècles, les aristocrates espagnols se transmettent une épée qui aurait été son arme préférée. Elle est si importante dans la tradition espagnole qu'elle servait à sacrer les rois d'Espagne avant l'arrivée des Bourbons. Cette épée, dénommée Tizona, n'avait jamais été étudiée en détail. Chercheurs en archéométaballurgie à l'Université Complutense de Madrid, nous avons eu le privilège de le faire. Nous avons analysé la façon dont elle a été forgée, et montré qu'elle provient presque sûrement d'un atelier arabo-andalou situé dans le Sud de la péninsule. L'arme a une poignée et porte des inscriptions qui datent de la Renaissance, de sorte que les historiens spécialisés dans les armes n'y voyaient qu'une imitation du XV^e siècle. Nos résultats indiquent que la lame de Tizona est plus ancienne. Elle aurait bien été forgée au cours de la première moitié du XI^e siècle, comme la tradition le rapporte.

L'objectif de notre étude était de répondre à trois questions. Quel est l'âge réel de Tizona ? D'où provient-elle ? Comment a-t-elle été fabriquée ? Pour y parvenir, nous avons réalisé toute une série de mesures mécaniques et analysé

les caractéristiques du métal. Naturellement, nous avons commencé par un examen de l'acier, d'abord à l'œil nu, puis au microscope et au microscope électronique à balayage. Nous avons ensuite réalisé des mesures par diffraction des rayons X. Afin d'évaluer la qualité du métal, il nous fallait aussi mesurer sa dureté. Nous avons aussi analysé les impuretés chimiques incluses dans l'acier de Tizona afin d'en déterminer l'origine. Nous avons effectué une étude métallurgique quantitative du vieillissement de la microstructure du métal. Tous nos résultats ont été comparés à ceux que produisent des aciers anciens d'époques diverses, bien datés.

Le temps des taifas

Avant de commencer, nous avons étudié divers documents sur l'industrie militaire de l'époque du Cid et sur les types d'armes qu'elle produisait. Au début du XI^e siècle, le califat de Cordoue, c'est-à-dire l'Espagne musulmane unie, vient de se désintégrer. De petits royaumes musulmans, nommés taifas, apparaissent, lesquels ne vont cesser pendant trois siècles de s'espionner et de se quereller. Dans le même temps, ces taifas doivent faire face à la pression militaire constante des royaumes chrétiens du Nord, au premier rang desquels la Castille. Les textes arabes de l'époque du Califat de Cordoue et des royaumes taifas attestent que Tizona est une épée d'acier courante à l'époque, un type d'arme que l'on désignait en Castille sous le terme de tizona. Sa lame courte, large et de faible épaisseur la classe parmi les armes de chasse et de combat à cheval. Des représentations de ce type de lame se retrouvent sur les bas-reliefs de l'époque arabo-andalouse, notamment sur celui du coffret d'ivoire

de la cathédrale de Pampelune, réalisé pour le chef de guerre Abd al-Malik al-Muzafar, fils de Almanzor, en 1005.

Les chroniques de al-Hulal al-Mawsiyya, qui décrivent la période de transition entre les royaumes taïfas et l'arrivée de la dynastie nord-africaine des almoravides, en plein XI^e siècle, contiennent un élément intéressant sur les armuriers de l'époque. On y apprend que les almoravides se sont procurés des chevaux dans les marais du Guadalquivir ainsi que dans les campagnes et les montagnes de Cordoue ; ils recrutèrent ensuite des soldats et obtinrent des armes en Al Andalus, c'est-à-dire dans le califat qui existait alors en Andalousie. Ce texte atteste donc qu'Almanzor avait mis en place une industrie militaire de tout premier ordre afin de mener à bien sa guerre sainte contre les chrétiens du Nord.

Or, nous possédons un témoignage sur cette industrie de la fin du X^e siècle et du début du XI^e siècle. Un informateur d'Ibn Hyyan à Cordoue raconte que Abu-al-Abbas al-Bagdadi, d'origine orientale et maître-artisan à Cordoue, fabriquait, avec l'aide de son esclave Talha, 12 000 arcs arabes et turcs chaque année dans ses ateliers de Madinat al-Zahara. La production de flèches atteignait 12 000 unités mensuelles !

Des armuriers réputés

Le savoir-faire réputé des armuriers arabo-andalous était constamment renouvelé par les apports des artisans et forgerons immigrés d'Irak, de Perse ou même d'Inde. L'industrie artisanale de l'acier connaît un essor encore supérieur à partir du règne de Abd al-Rahman, à Cordoue et Tolède. Les forgerons arabo-andalous fabriquaient des armes blanches raffinées qu'ils exportaient. Le géographe égyptien Ibn Jurdadhbeh (mort vers 885) signale que les échanges furent importants dès le IX^e siècle. Au milieu du XI^e siècle, l'émir Yousouf ben Taxoufin offre à son premier frère, l'émir Abu Bakr ibn Ibrahim, 50 tizonas, dont 20 avec une poignée d'or et 30 avec une poignée d'argent, toutes fabriquées en Al Andalus.

Avant d'étudier l'épée, nous l'avons d'abord préparée afin de la préserver. Aujourd'hui propriété du marquis de Falcès, Tizona a depuis longtemps un caractère quasi sacré en Espagne, statut qui est à la fois un atout et une malchance. Ce statut, s'il a protégé l'arme au cours des siècles passés, a

aussi entraîné plusieurs réfections, qui l'ont à moitié... détruite ! Lorsque l'arme est arrivée dans notre laboratoire, elle était recouverte d'une couche de laque métallisée. Déposée par petites touches encore visibles, cette laque cachait la couleur originale de l'acier, et dissimulait les traces d'un intense polissage destiné à éliminer la rouille. Selon toute probabilité cette opération fut la plus destructrice de toutes celles qui ont été pratiquées sur la lame. Toutefois, le va-et-vient entre les ancêtres du marquis de Falcès et les rois d'Espagne a aussi contribué à la détérioration de Tizona. L'épée devait être polie à chaque cérémonie. À cela, s'ajoutent le remplacement de la poignée originale à l'époque des Rois Catholiques (1474-1516), et l'apposition de deux inscriptions placées sur chacune des gouttières (sillon central de la lame). L'une, en latin, se lit «*ave maria gratia plena dominus mecum*», c'est-à-dire «Je te salue Marie, pleine de grâce, le Seigneur est avec toi» et l'autre, en castillan du XVI^e siècle, «*io soi tizona fue fecha en la era de mil quatroenta*», c'est-à-dire «Je suis Tizona, faite en l'an de grâce mille quarante». C'est la face qui porte l'inscription «*ave maria gratia...*» qui est la plus abîmée. La couche superficielle dure a partiellement disparu. Comme toutes les épées d'acier, Tizona a subi une corrosion au cours du temps. Sa surface est marquée de nombreuses piqûres, petites blessures ponctuelles qui traversent la couche dure jusqu'au noyau de fer doux et dégradent l'ancrage. La pointe est détériorée. Les tensions accumulées lors de chaque intervention ont aussi légèrement induit une légère courbure de la lame. On remarque aussi la présence de petites crevasses et d'une zone brûlée, lesquelles montrent que l'arme a été reforgee, probablement lors d'une réparation. Les radiographies indiquent que la partie où est fixée la poignée a peut-être été raccourcie, soit pour réparer l'épée, soit lors du montage de la garde actuelle. Si la pointe est détériorée, elle aussi, les études réalisées dans notre laboratoire montrent que le reste de la lame n'a pas été modifié depuis l'origine.

1. TIZONA fut, selon la tradition espagnole, l'épée du Cid, un chevalier castillan du XI^e siècle. D'une longueur totale de 933 millimètres, sa lame mesure 785 millimètres pour une largeur de 43 millimètres au niveau de la garde. L'épée a été rénovée (à gauche avant la rénovation et à droite après) ; on constate que la poignée en fer forgé, montée à la Renaissance, est asymétrique.



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