

La sonde atomique tomographique et les nanosciences

D. Blavette, S. Duguay, I. Mouton, R. Lardé, E. Talbot

Normandie Université, GPM, UMR CNRS 6634, Rouen

La sonde atomique tomographique (SAT) est le seul microscope analytique produisant des cartographies 3D de la distribution des espèces chimiques avec une résolution atomique dans un petit élément de volume ($50 \times 50 \times 500 \text{ nm}^3$). La figure ci-dessous en donne un exemple (figure 1). Le principe repose sur l'évaporation par effet de champ des atomes de l'échantillon par des impulsions électriques. Le premier prototype français fut conçu dans les années 90ⁱ puis commercialisé par la société CAMECA aujourd'hui leader mondial dans le domaine. L'instrument a produit des résultats marquants en métallurgie physique notamment sur les premiers stades de précipitation dans les alliages métalliques ou une confrontation des images 3D (figure 1 ci-dessous) peut être faite avec celles produites par simulation Monte-Carlo sur réseau rigideⁱⁱ. L'apport majeur de la SAT est ici de permettre de mesurer la composition des tous petits germes de précipités. La SAT fut aussi la première technique capable de montrer la ségrégation d'impuretés le long d'une ligne de dislocation en 3D et à l'échelle atomique (atmosphères de Cottrell)ⁱⁱⁱ.

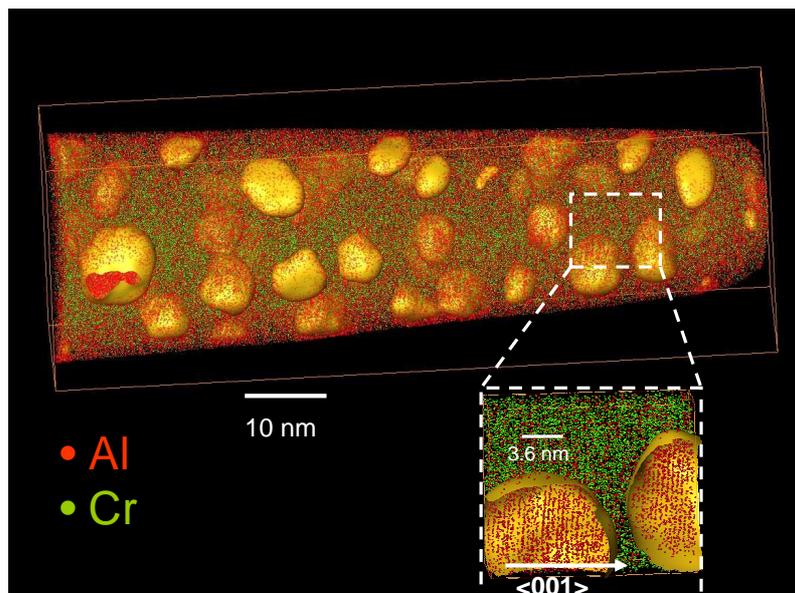


Figure 1. Reconstruction 3D de la distribution des atomes d'Al et de Cr dans un superalliage modèle comportant de petits précipités ordonnés Ni_3Al (7nm) dans une matrice riche en Cr (le Ni n'est pas représenté pour préserver la transparence). Les plans riches Al s'alternent avec des plans sans Al dans les précipités γ' ordonnés.

Avec le développement des techniques d'amincissement par **faisceau d'ions focalisés** (FIB-focused ion beam), la technique s'est ouverte aux nanosciences (vannes de spin^{iv}, nanofils, nanopoudres...). Par ailleurs, l'instrument d'abord limité aux matériaux bons conducteurs de l'électricité s'est ouvert aux matériaux peu conducteurs de l'électricité (semi-conducteurs) ou même isolants (oxydes) en remplaçant les impulsions électriques par des flashes Laser ultra-rapides (350 fs)^v. Parmi les résultats récents, citons la mise en évidence d'amas de dopants dans le silicium implanté^{vi}, ou encore de ségrégations de dopants sur les boucles de dislocation ou joints de grains. L'instrument est désormais utilisé de manière routinière pour étudier divers nano-objets (nanofils semi-conducteurs^{vii}, couches minces par exemple pour le solaire^{viii} ou la spintronique^{ix} (e.g. GeMn, figure 2). Une approche corrélative combinant la SAT et la microscopie électronique s'est par ailleurs révélée tout à fait séduisante pour l'étude

de nano-dispositifs 3D de la nano-électronique^x. Après une brève présentation des principes de la tomographie atomique, j'illustrerai le potentiel de l'instrument dans ces différents domaines.

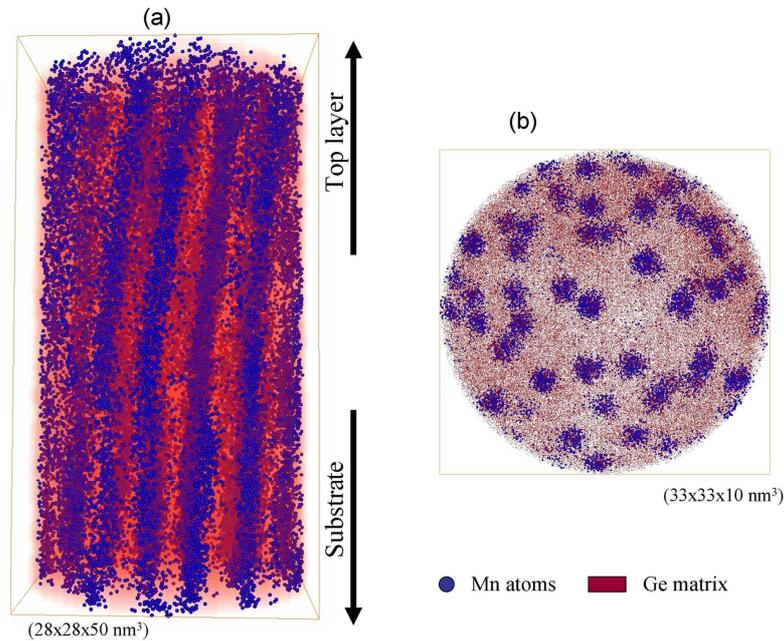


Figure 2. Image 3D mettant en évidence les nano-colonnes (3 nm) de Mn dans un film mince GeMn (6%at) épitaxié par MBE à 100°C (0,02 nm/s) sur un substrat de Ge.

ⁱ D. Blavette, A. Bostel, J. M. Sarrau, B. Deconihout And A. Menand

An atom-probe for three dimensional tomography, Nature 363 (1993) 432-435

ⁱⁱ C. Pareige, F. Soisson, G. Martin, And D. Blavette

Ordering and phase separation in NiCrAl alloys: Monte Carlo simulation and 3D atom probe study

Acta Met Mater. 47-6 (1999) 1889-99

ⁱⁱⁱ D. Blavette, E. Cadel, A. Fraczkiwicz, A. Menand

Three-dimensional atomic-scale imaging of impurity segregation to line-defects, SCIENCE Dec 17 (1999)

2317-2319

^{iv} R. Larde, L. Lechevallier, A. Zarefy, A. Bostel, J. Juraszek, J.M. Le Breton, B. Rodmacq, B. Diény,

Structural analysis of a (Pt/Co)(3)/IrMn multilayer: Investigation of sub-nanometric layers by tomographic atom probe, Journal of Applied Physics, 2009. 105(8).

^v B. Gault, F. Vurpillot, A. Vella, M. Gilbert, A. Menand, D. Blavette, B. Deconihout

Design of a femto-second laser assisted Tomographic Atom Probe, Rev. Sci. Instr. 77, 043705 (2006)

^{vi} O. Cojocaru-Miredin, E. Cadel, F. Vurpillot, D. Mangelinck, D. Blavette

3D atom-scale imaging of boron clusters in implanted silicon, Scripta Mater. 60 (2009) 285-288 DOI:

10.1016/j.scripta mat.2008.10.008

^{vii} W. H. Chen, R. Larde, E. Cadel, T. Xu, B. Grandidier, J. P. Nys, D. Stievenard, And P. Pareige

«Study of the effect of gas pressure and catalyst droplets number density on silicon nanowires growth, tapering and gold coverage», Journal of Applied Physics, 2010. 107, 084902

^{viii} E. Cadel, N. Barreau, J. Kessler, P. Pareige, Atom probe study of sodium distribution in polycrystalline

Cu(InGa)Se₂ thin film, ACTA MATERIALIA Volume 58, Issue 7, April 2010, Pages 2634-2637

^{ix} I. Mouton, R. Larde, E. Talbot, C. Pareige, D. Blavette, Formation of self organised nanocolumns in thin

films: Monte-Carlo simulation versus experiments, JAP 115, 053515 (2014)

^x A. Grenier, R. Serra, G. Audoit, Jp Barnes, S. Duguay, D. Blavette, N. Rolland, F. Vurpillot, P. Morin, P.

Gouraud, 3D imaging and analysis of a single nano-device at the ultimate scale using correlative microscopy techniques, Applied Physics Letters 106, 213102 (2015); doi: 10.1063/1.4921352