

Objectifs du projet

La sonde atomique tomographique (TAP) classique est une technique de nanoanalyse qui permet de reconstruire l'image d'un petit morceau de matière, atome par atome, avec une résolution quasi-atomique [1]. Les atomes sont évaporés de la surface d'une pointe très fine ($R = 50$ nm) par effet de champ et projetés sur un détecteur spatial résolu en temps. Leur nature chimique est identifiée par spectrométrie de masse à temps de vol. A cause de la nécessité d'appliquer des impulsions H.T. à l'échantillon, la technique n'était pas applicable sur les matériaux peu conducteurs ou isolants. L'objectif de ce projet était donc d'amener des champs électriques optiques intenses à l'extrémité d'un matériau peu conducteur [2]. En outre, l'utilisation d'impulsions de champ très brèves (100 fs) permet d'accroître le champ de vision de en éliminant les dispersions dans les instants d'évaporation des atomes. L'idée était donc de substituer des impulsions lasers ultracourtes aux impulsions H.T ns utilisées jusqu'à présent.

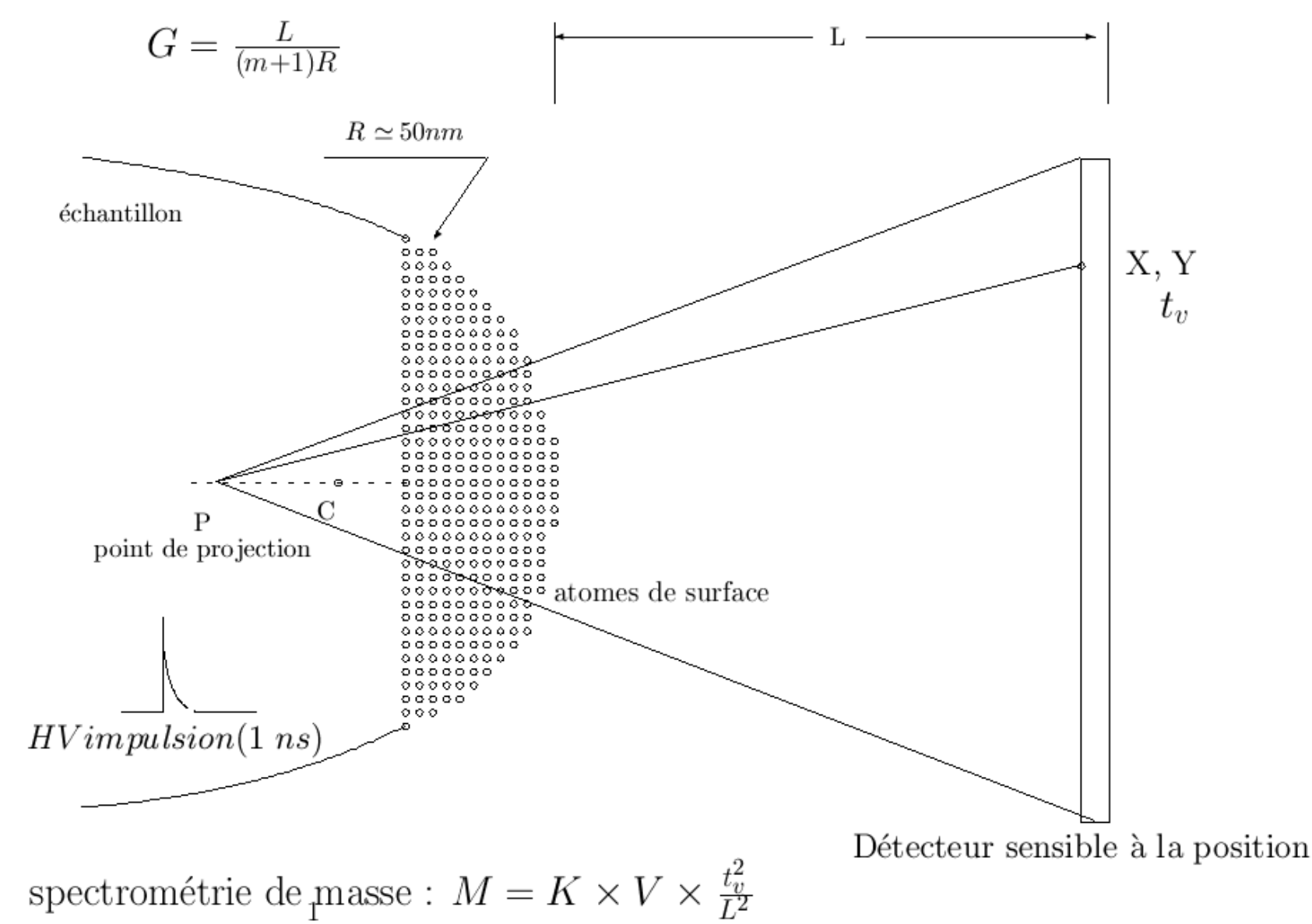


Fig. 1 : principe de la sonde atomique tomographique

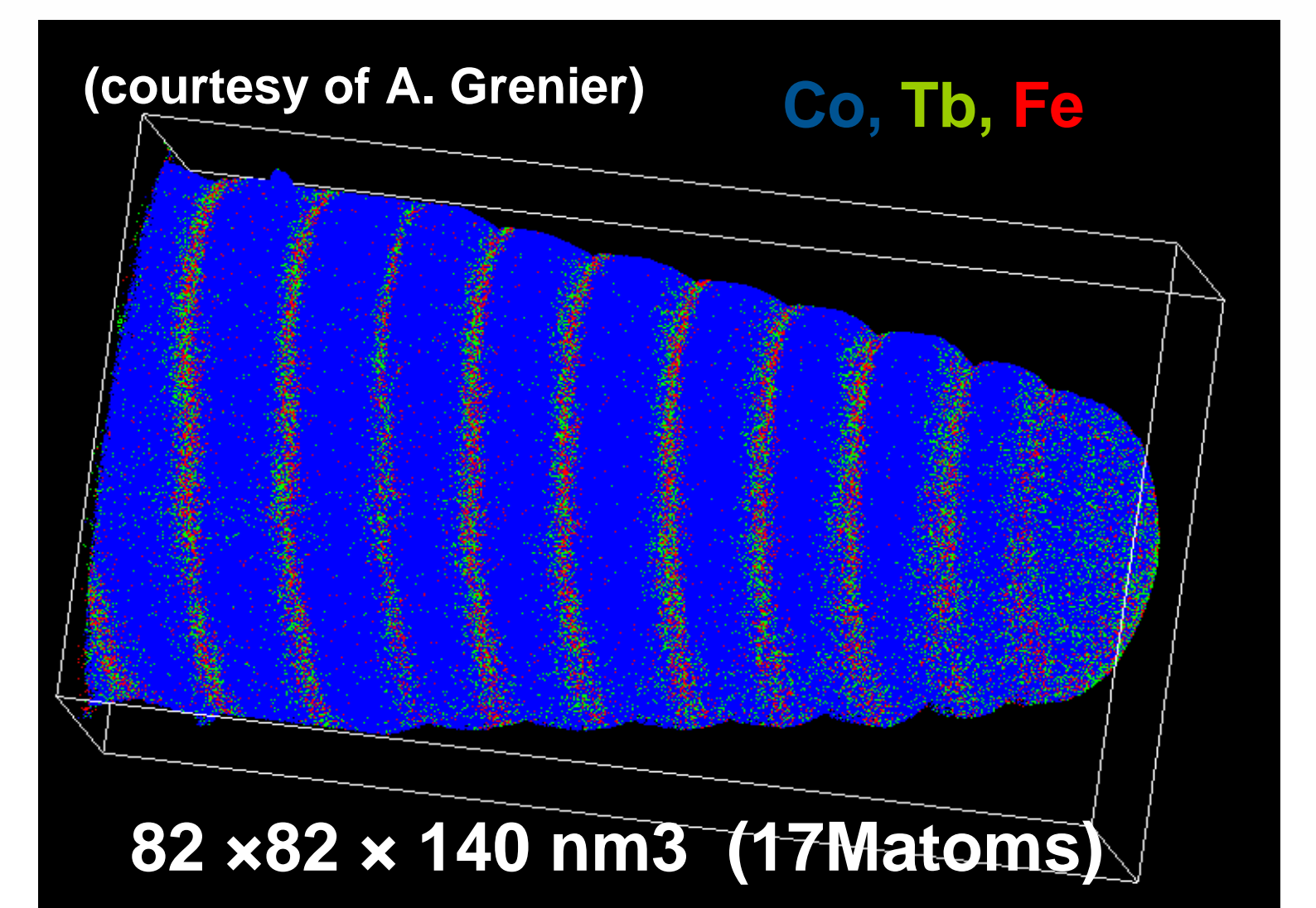


Fig. 2 : image d'un multicouche magnétostrictive [TbFe/Co] x 20. Chaque point est un atome..

Physique de l'effet de champ sous illumination laser fs

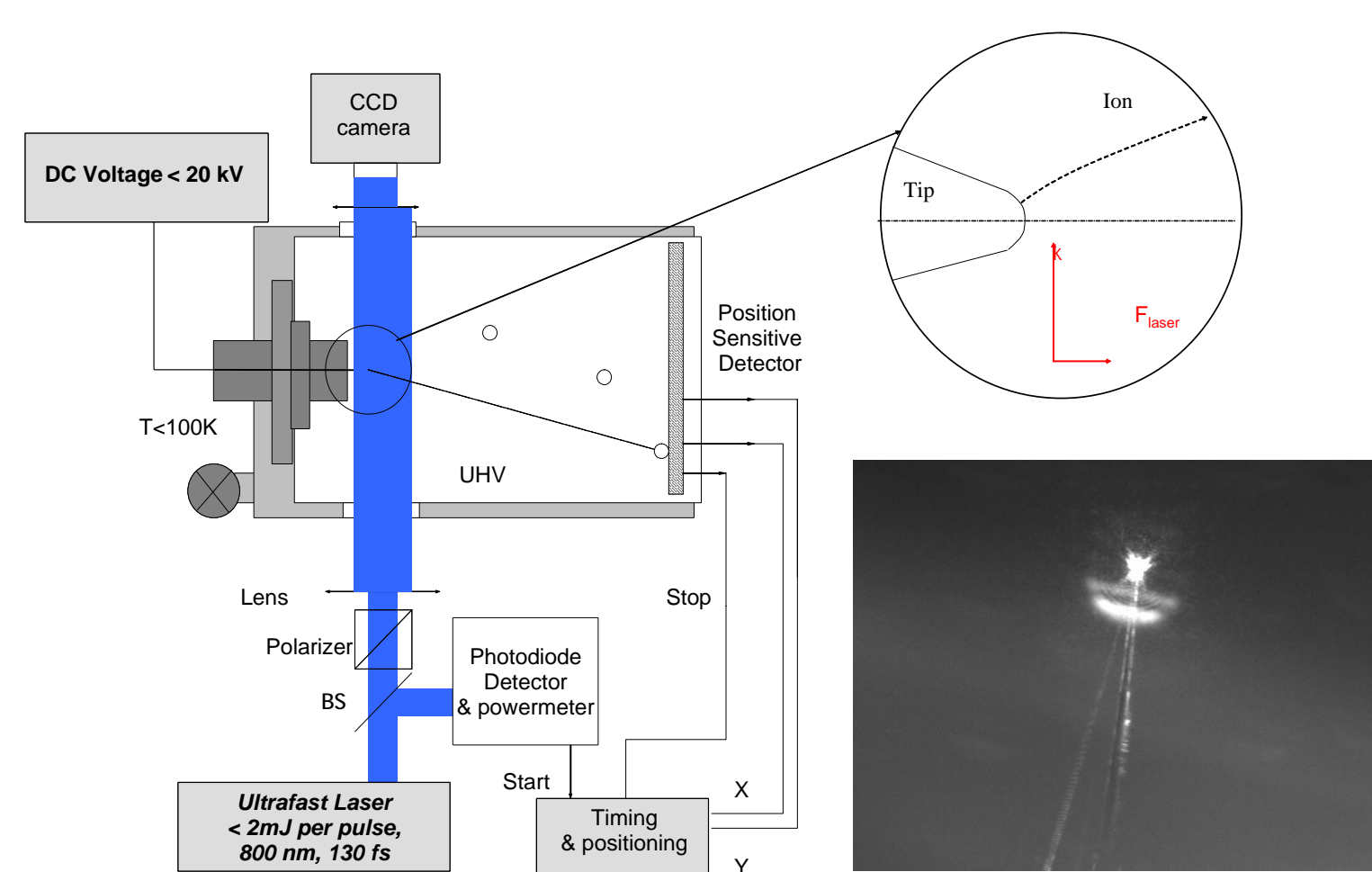


Fig. 3 : dispositif expérimental

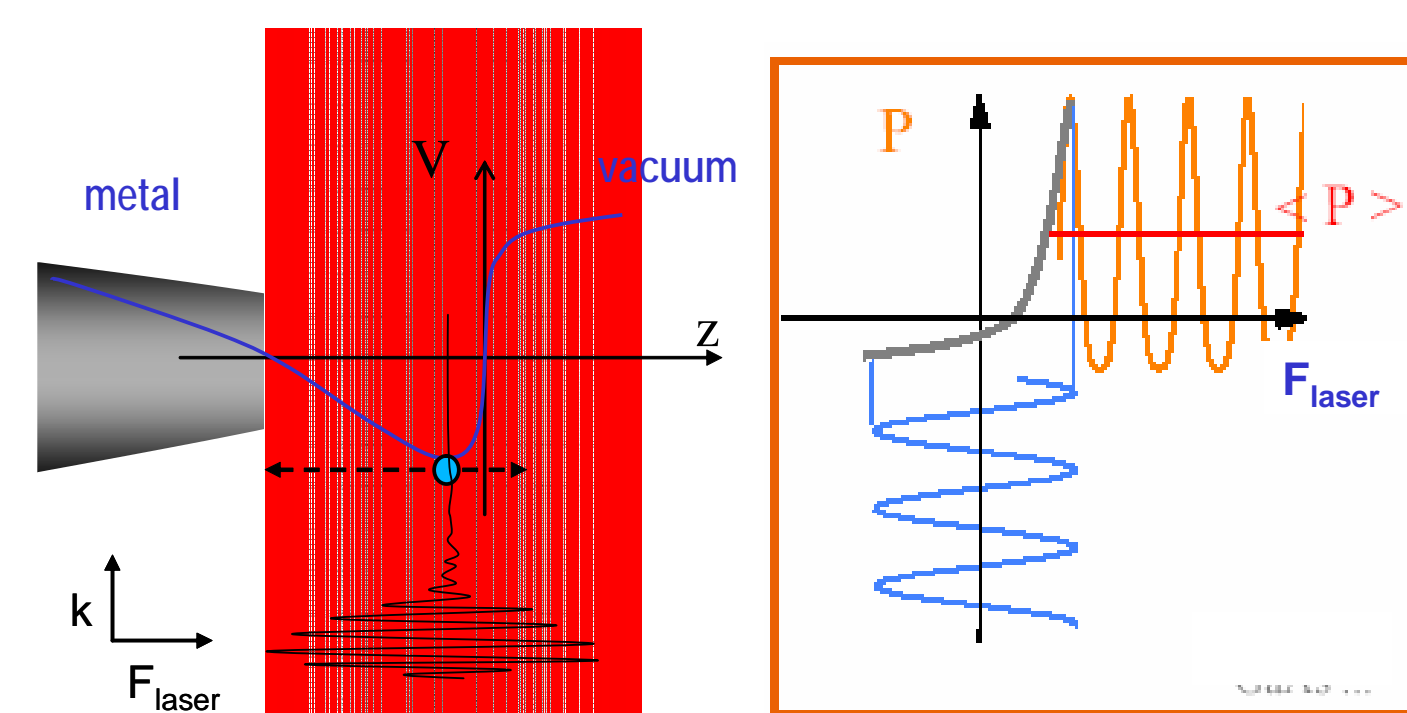


Fig. 4 : principe du redressement du champ optique à la surface.

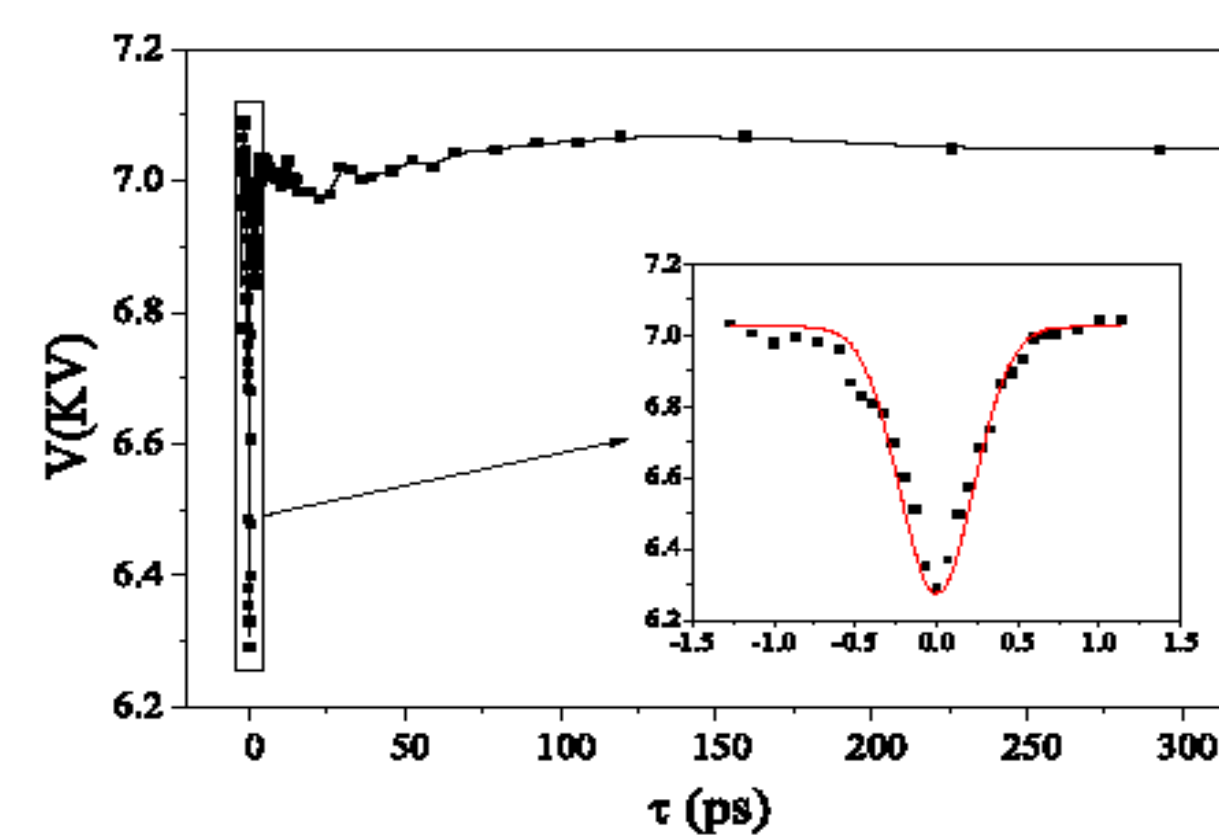


Fig. 5 : mise en évidence de l'évaporation assistée par redressement optique obtenue par des mesures pompe-sonde. Les atomes sont évaporés pendant 150 à 200 fs

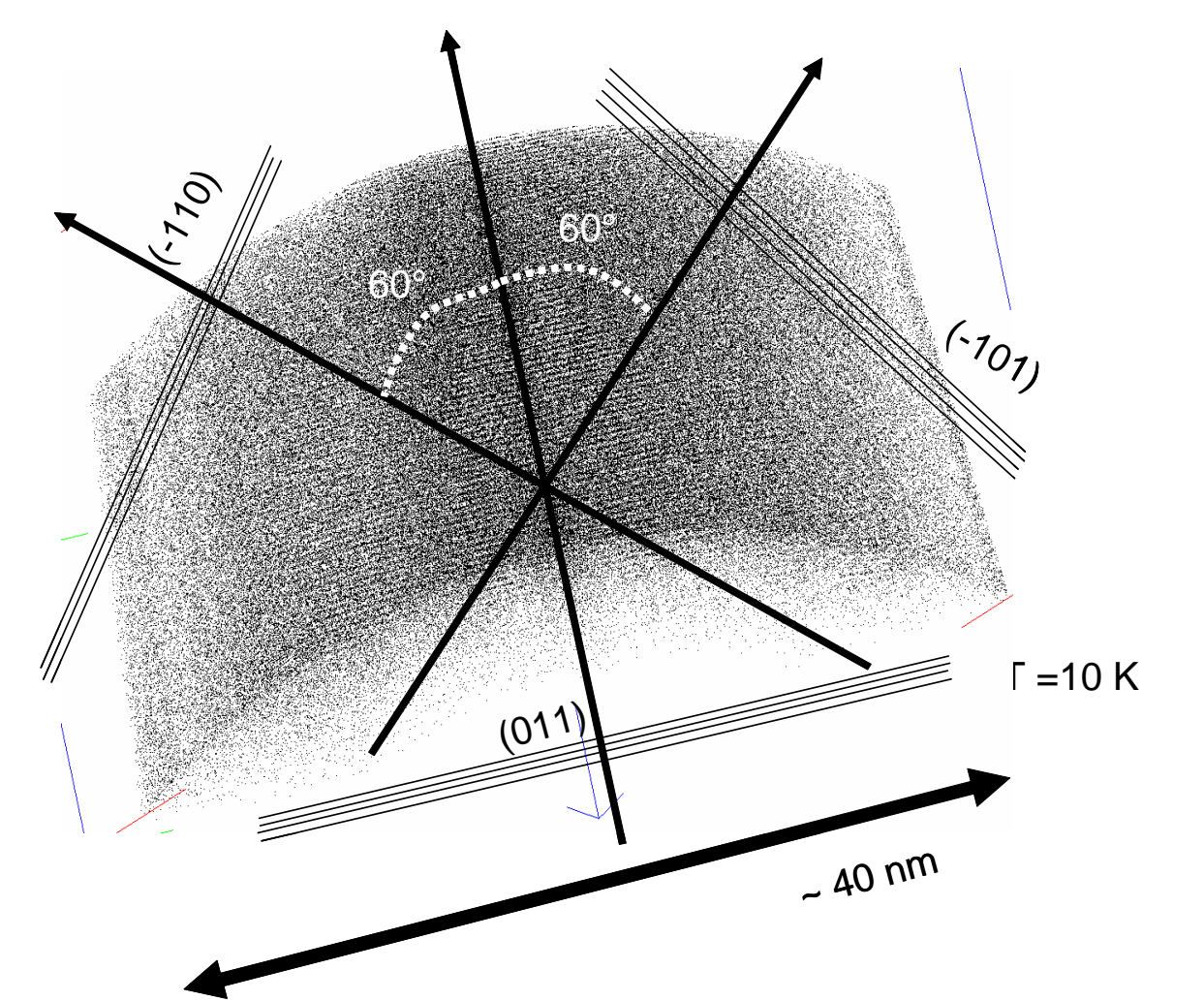


Fig. 6 : distribution 3D des atomes de W obtenue en Laser Assisted Wide Angle TAP.

Les impulsions laser ($\lambda = 800$ nm, $10 \mu J/pulse, 130$ fs) sont légèrement focalisées sur l'extrémité de la pointe avec une simple lentille (Fig. 3). Cela rend l'alignement aisé et permet de s'affranchir des vibrations de l'échantillon toujours possibles. Les atomes de surface vibrent à des fréquences proches de 10^{12} Hz très supérieures aux fréquences optiques. Bien que le champ optique puisse atteindre plusieurs $V.nm^{-1}$, champ proche du champ d'évaporation des atomes, il ne peut donc pas permettre l'évaporation. L'évaporation s'effectue grâce à un effet de redressement du champ optique qui engendre une impulsion de quelques centaines de fs. Ce mécanisme est possible grâce à l'exaltation du champ laser due aux dimensions sub-longueur d'onde de la pointe et à l'anhamornicité du puits de potentiel des électrons près de la surface, qui agit comme une diode optique [3,4] (Fig. 4). Cette impulsion THz a pu être mesurée récemment au moyen de techniques pompe-sonde (Fig. 5). L'idée d'utiliser des impulsions de durée inférieure au temps de couplage électrons-phonons était aussi d'éviter tout échauffement important de l'échantillon durant l'analyse. Nous avons réalisé des expériences pompe laser - sonde impulsion H.T. et démontré que la température maximale de l'échantillon restait inférieure à 200 K une ns après l'impulsion de lumière [5]. Cela permet de préserver la résolution spatiale de la sonde atomique qui fait son unicité. On le voit sur la Fig. 6, les plans atomiques sont résolus 3D dans plusieurs directions cristallographiques dans le cas d'une analyse de W en sonde grand-angle laser fs.

Analyse de matériaux peu conducteurs à l'échelle atomique

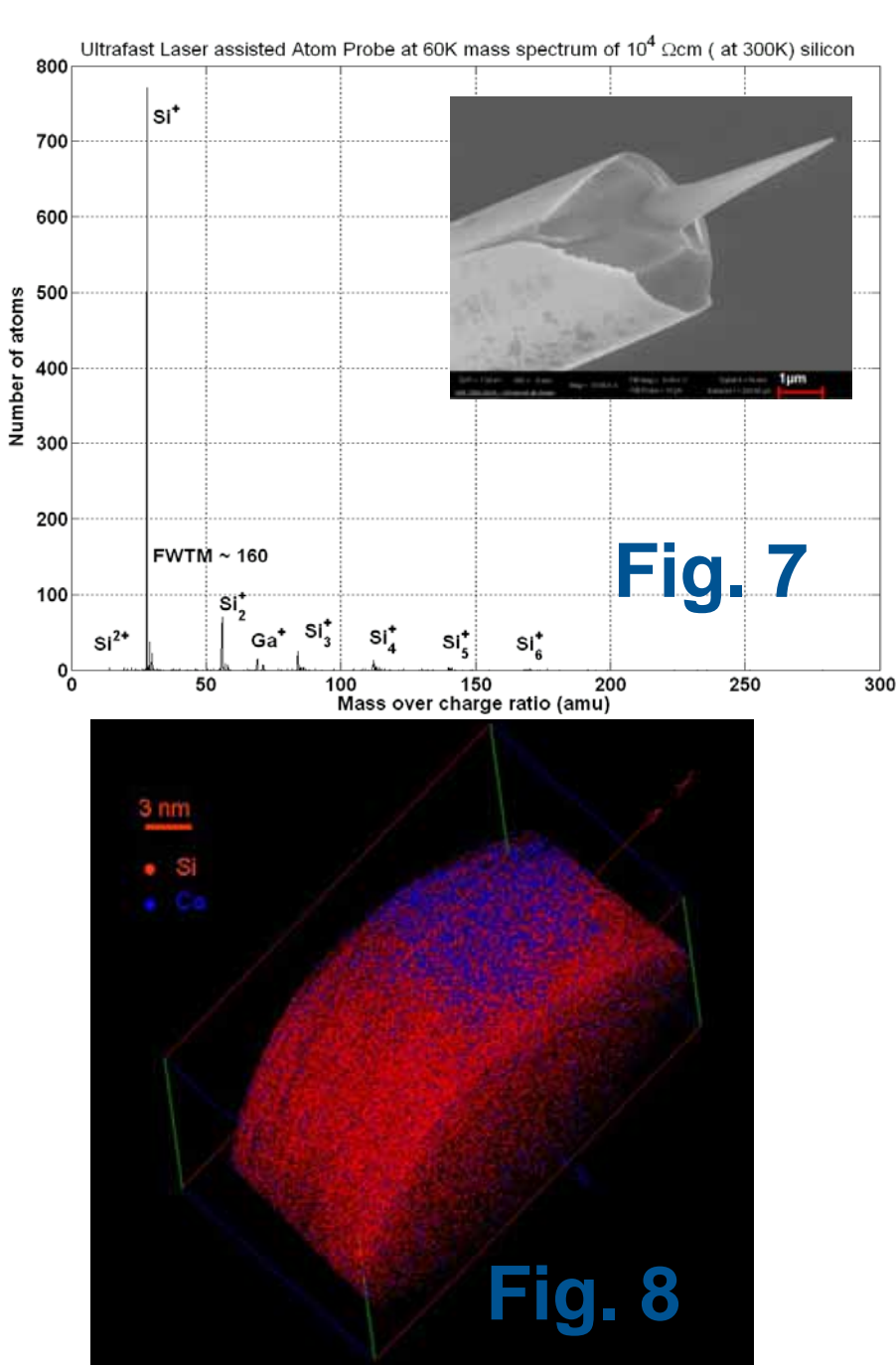


Fig. 7

La possibilité nouvelle de créer des impulsions de champ ultracourtes permet d'évaporer des matériaux peu conducteurs [6]. La Fig. 7 montre un spectre de masse relatif à l'analyse d'une pointe de Si préparée par usinage ionique (FIB). Ce Si contient un taux d'impuretés très faible ($10^{11} cm^{-3}$), et l'analyse a été faite à 60K. Cela tend à démontrer l'applicabilité de la technique aux matériaux très mauvais conducteurs. Nous avons pu également imager des Siliciures de Co [9], (Fig. 8) ou des Siliciures de Ni dopés au Pt dont les applications en microélectronique sont nombreuses. Pour la première fois, il est possible de suivre en 3D et à l'échelle atomique le mécanisme de croissance de ces phases utilisées pour établir des contacts en nanoélectronique [8]. Cela laisse entrevoir des applications nouvelles comme celle de la cartographie atomique de dopants dans les semi-conducteurs.

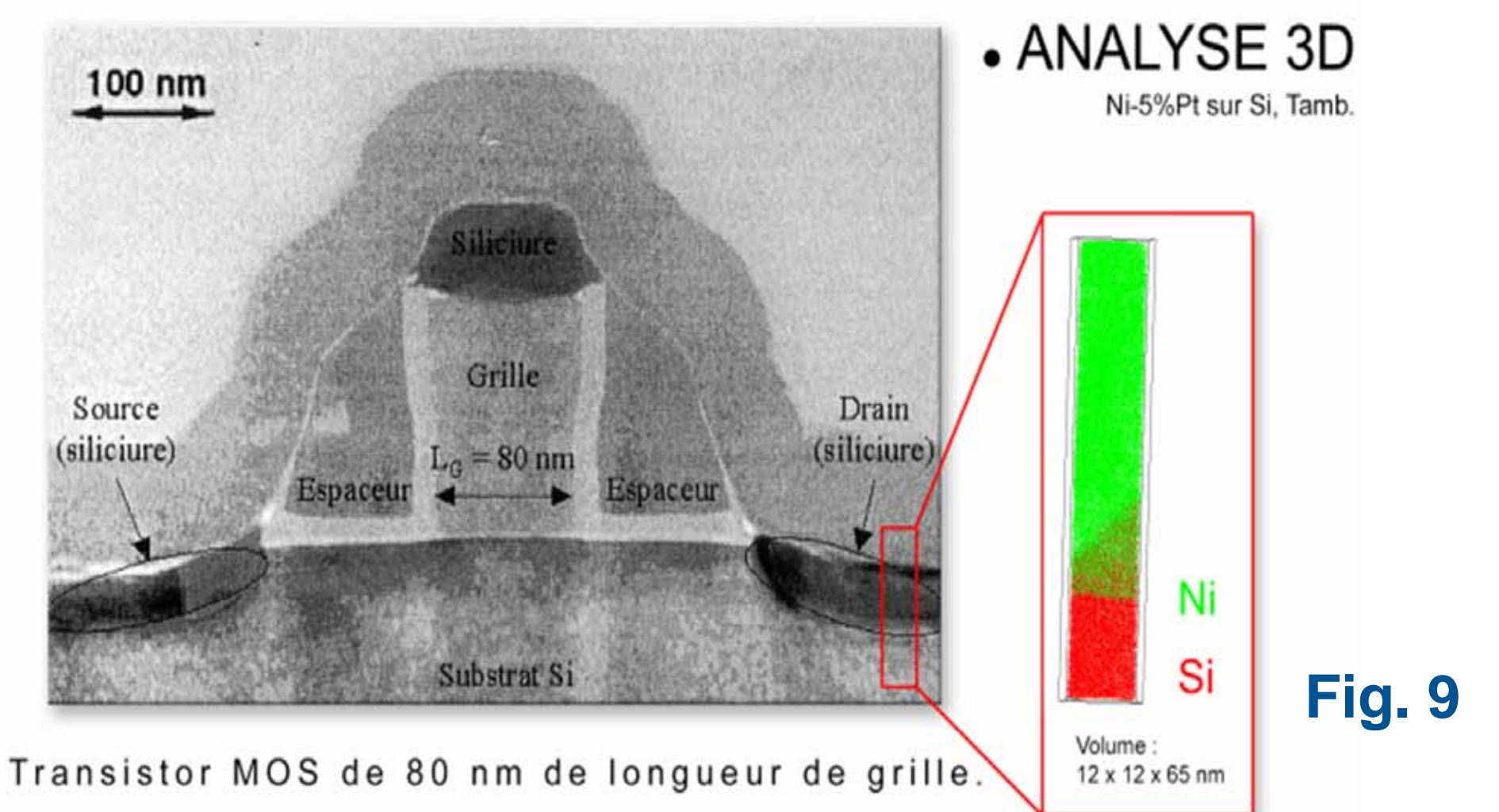


Fig. 9

Transfert technologique

Un prototype commercial de sonde atomique tomographique a été réalisé en collaboration avec la société CAMECA (Gennevilliers, France) bien implantée sur le marché des semi-conducteurs (SIMS, Shallow Probe). Les clients potentiels sont nombreux (ST-micro, IMEC, Samsung, Fujitsu, IBM). Une première sonde a été vendue en Corée cette année. Cette ACI a permis de prendre un avantage décisif par rapport à la concurrence nord américaine, et a permis l'embauche de deux Doctorants par la société CAMECA. D'autre part, une sonde laser devrait être installée chez IMEC a Louvain qui constitue une vitrine internationale de la métrologie appliquées nanosciences. Outre cette ACI, ce projet a reçu le soutien du CNRS (DAE, STRIC et SPM) de la société CAMECA et de la région Haute-Normandie



Références :

1. D. Blavette, A. Bostel, J.M. Sarrau, B. Deconihout and A. Menand, *Nature*, vol 363, 3 june 1993
2. B. Deconihout, F. Vurpillot, B. Gault, G. Da Costa, M. Bouet, A. Bostel, A. Hideur, G. Martel, M. Brunel and D. Blavette, *Surface and Interface Analysis*, 38 (2006)
3. Gault B., Vurpillot F., Bostel A., Menand A. and Deconihout B., *Applied Physics Letters*, 86, 094101 (2005).
4. A. Vella, F. Vurpillot, B. Gault, A. Menand and B. Deconihout, *Phys. Rev. B*, 73, 165416 (2006)
5. F. Vurpillot, B. Gault, A. Vella, A. Menand and B. Deconihout, *Applied Physics Letters* 88 094105, (2006).
6. B. Gault, F. Vurpillot, M. Gilbert, A. Vella, A. Menand, D. Blavette and B. Deconihout, *Review of Scientific Instruments* 77, 043705 (2006)
7. B. Gault, A. Menand, F. De Geuser, R. Danoix, and B. Deconihout, *Applied Physics Letters* 88, 114101 (2006)
8. K. Hoummada, E. Cadel, D. Mangelinck, C. Perrin-Pellegrino, D. Blavette and B. Deconihout, accepted in *Applied Physics Letters* (2006).
9. M. Gilbert, F. Vurpillot, A. Vella, H. Bernas and B. Deconihout, accepted in *Ultramicroscopy* (2006)

Contact : Prof. B. Deconihout, GPM UMR CNRS 6634, Université et INSA de Rouen
bernard.deconihout@univ-rouen.fr

Groupe de Physique des Matériaux, UMR CNRS 6634, Université et INSA de Rouen
Complexe de Recherche Interprofessionnel en Aérothermochimie (CORIA) UMR CNRS 6614, Université et INSA de Rouen
Centre de Spectrométrie Nucléaire et de Spectrométrie de Masse (C.S.N.S.M.), Université Paris XI, Orsay,
Société CAMECA, 29 Quai des Grésillons, 92622 Gennevilliers Cedex - France