

10 Chapitre 10 : Techniques 3D et Tomographie

10.1 Microscopie en 3D

La microscopie par émission de champ (FEM) et la microscopie par ionisation de champ (FIM) sont des techniques avancées permettant l'observation des surfaces à l'échelle atomique. Le système utilise une pointe extrêmement fine, caractérisée par un rayon de courbure $R \approx 0.1 \mu\text{m}$, pour concentrer le champ électrique. Le champ électrique généré peut atteindre des intensités de l'ordre de $E = \frac{V}{R} \approx 10^9 \text{ V/m}$, où $V \approx 1 \text{ kV}$ est le potentiel appliqué.

Microscopie 3D avec FIM et FEM

La microscopie par émission de champ (FEM) et ionisation de champ (FIM) sont classées en microscopie 3D car elles permettent de reconstruire la disposition tridimensionnelle des atomes sur une surface. En contrôlant le potentiel appliqué, ces techniques révèlent des informations en profondeur, couche par couche, tout en corrélant les motifs observés avec des modèles atomiques 3D.

En FEM, l'expérience est conduite sous vide, avec des électrons émis par effet tunnel lorsque la pointe est polarisée négativement (Voltage < 0).

En FIM, on utilise un gaz rare à basse pression qui est ionisé sous un potentiel positif (Voltage > 0). Les ions ou électrons émis sont projetés sur un écran, offrant une image agrandie de la surface étudiée. La magnification, définie comme $M = \frac{D}{R\beta}$, atteint typiquement $M \approx 10^6$, avec $D \approx 0.3 \text{ m}$ et $\beta \approx 1.5$, dépendant de la forme de la pointe.

Pour être plus précis sur la microscopie FIM, les atomes du gaz rare sont piégés par des forces de polarisation à proximité de la surface de la pointe du spécimen étudié. Ils migrent ensuite sur la surface de manière aléatoire jusqu'à être ionisés en étant arrivé sur une zone où l'énergie potentielle est la plus basse, ce qui correspond aux sites de plus forte intensité du champ électrique. Il est alors ionisé via un processus de tunnel quantique, décrit par une probabilité D proportionnelle à :

$$D \propto e^{-c(I-\Phi)/V}$$

où I est le potentiel d'ionisation, Φ la fonction de travail de l'émetteur, V le potentiel électrique appliqué, et c une constante.

Les ions ainsi générés sont éjectés de la surface selon des cônes d'émission caractéristiques et sont détectés sur un écran, formant une image directement corrélée à la structure atomique de la surface. Les images obtenues montrent des motifs réguliers correspondant à la distribution des atomes individuels, en particulier pour des échantillons bien orientés.

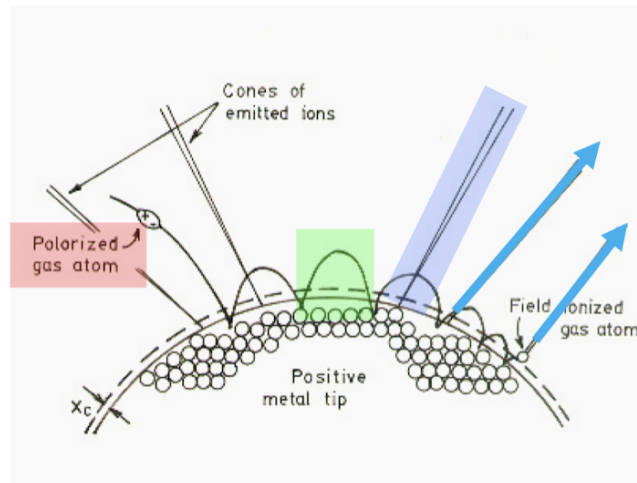


FIGURE 1 – Cônes d'émission à la surface

Atom Probe Tomography : application du FIM

L'APT est une technique puissante pour explorer la structure et la composition des matériaux à l'échelle atomique. Elle combine l'éjection contrôlée d'atomes par champ électrique, leur identification par spectrométrie de masse et une reconstruction volumétrique en 3D. L'APT utilise la mesure du temps de vol (TOF) pour identifier les atomes éjectés grâce à leurs masses atomiques. Cela repose sur l'éjection contrôlée d'atomes par un champ électrique intense, suivi par une détection avec un détecteur de type multi-channel plate

10.2 Tomographie

La tomographie est une méthode d'analyse par sectionnage. On va reconstruire la structure 3D du spécimen en regroupant des sections 2D de ce dernier.

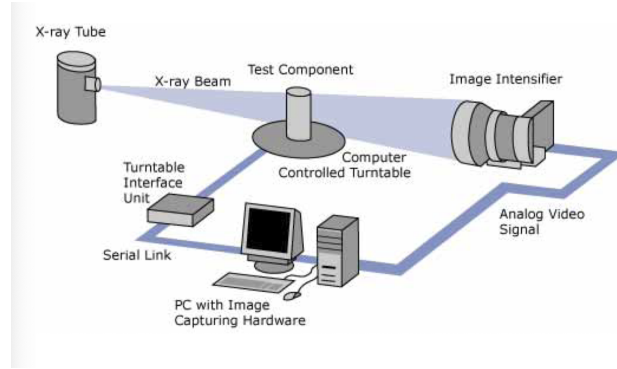


FIGURE 2 – Tomographie

Pour faire de la tomographie, il est nécessaire d'utiliser un outil mathématique qui s'appelle la transformée de Radon. Cet outil relie une fonction (ici une distribution de densité sur un objet en 2D) à ses projections le long de droites dans différents angles. En tomographie, les projections d'un objet sont obtenues à l'aide de rayons X, d'ondes acoustiques, ou d'autres signaux. Ces projections correspondent à la mesure de la densité ou de l'atténuation le long des rayons traversant l'objet. Ces projections sont des représentations directes de la transformée de Radon de l'objet $f(x, y)$. Pour retrouver l'image d'origine $f(x, y)$, on utilise l'inverse de la transformée de Radon. Cela revient à reconstruire la densité de l'objet à partir de ses projections. Il est aussi important de noter que la rétroprojection utilise des données projetées dans le sens inverse pour reconstruire la version 3D.

$$Rf(p, \theta) = \int_{L(p, \theta)} f(x, y) ds$$

- $L(p, \theta)$ représente une droite paramétrée par la distance p et l'angle θ ,
- $f(x, y)$ est la fonction à transformer,
- ds est l'élément infinitésimal de longueur le long de la droite.

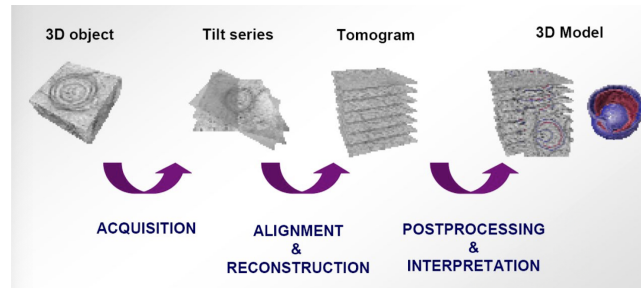


FIGURE 3 – Processus de tomographie

Dans les techniques de tomographie, l'objet est incliné pour acquérir des projections sous différents angles. Cependant, une limitation géométrique impose une plage angulaire maximale d'environ $\pm 70^\circ$, due à des contraintes mécaniques comme la conception du support de l'échantillon et les grilles de maintien. À des angles élevés, l'épaisseur apparente de l'échantillon augmente, rendant difficile l'acquisition de projections supplémentaires. Cette restriction entraîne le *missing wedge problem*, correspondant à une "tranche" de données manquantes dans l'espace des projections.

Il faut bien différencier les deux méthodes de tomographie, en effet elles peuvent être directe (coupe mécanique ou éjection d'atome par ATP) ou indirecte (projection à 360 degrés avec rotation pour reconstruire l'objet 3D).

Ce manque d'informations se traduit par des artefacts dans les reconstructions, une perte de résolution et une dégradation de la qualité d'image. Plus l'angle de balayage est large ($\pm 90^\circ$), plus la reconstruction est précise. Des solutions incluent l'utilisation d'algorithmes mathématiques pour compenser les données manquantes ou des modifications mécaniques pour étendre la plage angulaire.