
Nanotomographie

Maxime Moreaud

*Ecoles des Mines de Paris
Centre de Morphologie Mathématique
35, rue Saint honoré
77305 FONTAINEBLEAU*

10 avril 2007

Ce rapport présente la mise en place d'une méthode de nanotomographie (tomographie à l'aide de projections obtenues par un M.E.T. (microscope électronique en transmission)) utilisant le matériel disponible au Centre des Matériaux (CdM) de l'Ecole des Mines de Paris (Evry). Il s'agit de présenter les solutions à employer, les limitations actuelles et des perspectives. Une liste d'applications logicielles, ainsi que des articles et congrès sur le thème de la tomographie sont aussi présentés et permettront d'aller plus loin dans la prospection de nouvelles méthodes et l'amélioration des méthodes actuelles. Ce document est accompagné d'un DVD contenant divers fichiers (MMTomoOperator.dll, divers logiciels, articles cités en référence...).

Table des matières

1. Nanotomographie: présentation	2
2. Problématique.....	3
3. Mise en place de la nanotomographie : actions à réaliser	4
4. Solutions proposées.....	4
4.1. Acquisition des projections	4
4.2. Recalage précis des images de projections suivant le même axe.....	5
4.3. Logiciels de reconstruction tomographique pour la nanotomographie	8
4.4. Reconstruction avec un nombre limité de projections	8
5. Solution d'alignement des projections et de reconstruction intégrée à la plateforme Aphelion.....	11
5.1. Reconstruction tomographique dans l'espace de Fourier.....	11
5.2. Filtrage des sinogrammes.....	12
5.3. Listes des fonctions disponible sous Aphelion.....	12
5.4. Exemples de reconstruction tomographique 3D	13
6. Conclusion et perspectives	14
7. Références	15
7.1. Congrès.....	15
7.2. Articles	15
7.3. Sites WEB	16

1. Nanotomographie: présentation

La nanotomographie, ou electron tomography, permet de reconstruire en 3D un objet observé (un matériau par exemple) en utilisant des projections 2D en transmission obtenues par un MET pour différentes inclinaisons angulaires autour d'un axe (cf. *Fig. 1 et 2*). Ces projections sont obtenues en utilisant le réglage du tilt du porte échantillon du MET. Les résolutions que l'on peut obtenir peuvent aller jusqu'à 0.2nm par voxel. La reconstruction 3D est parfaite pour un nombre de projections infini. Dans la pratique, seulement un nombre limité d'acquisitions sont possible (par exemple, de -70° à $+70^\circ$ par incrément de 1°), la reconstruction 3D est donc imparfaite (bruit, partie manquantes interpolées...).

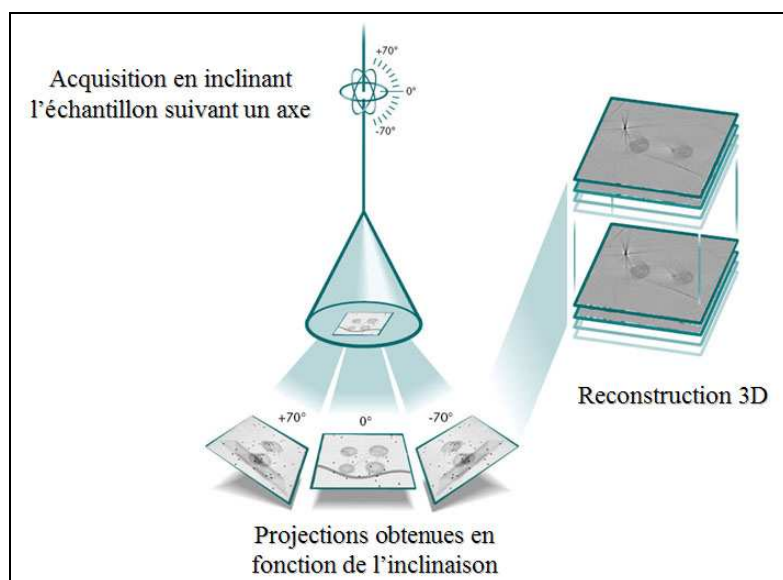


Fig. 1 : Principe de la nanotomographie.

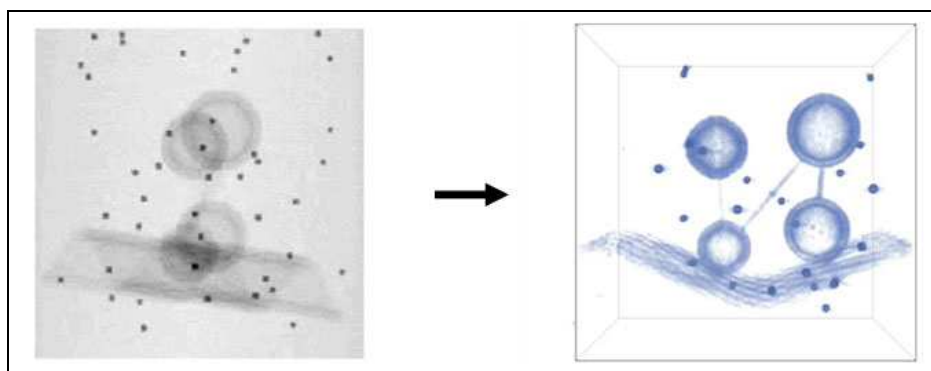


Fig. 2 : La nanotomographie permet d'obtenir une information tridimensionnelle d'un objet (image de droite) à partir d'images 2D de projections de cet objet (image de gauche) pour différent angles d'inclinaison autour d'un axe. Image de gauche tirée de la banque d'images d'essais d'EM3D (cf. partie 4.3).

Le matériel à disposition au CdM au 10 avril 2007 est le suivant : Microscope Tecnai 20F ST équipé d'un porte échantillon permettant de réaliser des inclinaisons angulaires comprise entre -45° et $+45^\circ$, une caméra CCD Gatan 1024x1024 24 bits, et le logiciel d'acquisition Digital Micrograph (Gatan).

2. Problématique

Dans la pratique, plusieurs problèmes se posent pour réaliser les acquisitions suivant l'inclinaison de l'échantillon et pour réaliser la reconstruction 3D :

- De nombreuses acquisitions sont à réaliser. Cela demande du temps et peut donc entraîner une contamination de l'échantillon observé. De même, ce travail est très répétitif.
- Entre chaque changement d'inclinaison, l'objet observé est décalé dans le champ d'observation et peut être défocalisée (un changement d'inclinaison de la platine entraîne un déplacement en x, y et z du porte échantillon) (cf. Fig. 3 et 4).
- L'angle de tilt de la platine sur un MET est limité. L'intervalle angulaire balayé est faible, certaines parties du volume reconstruit le sont donc seulement par interpolation de données.

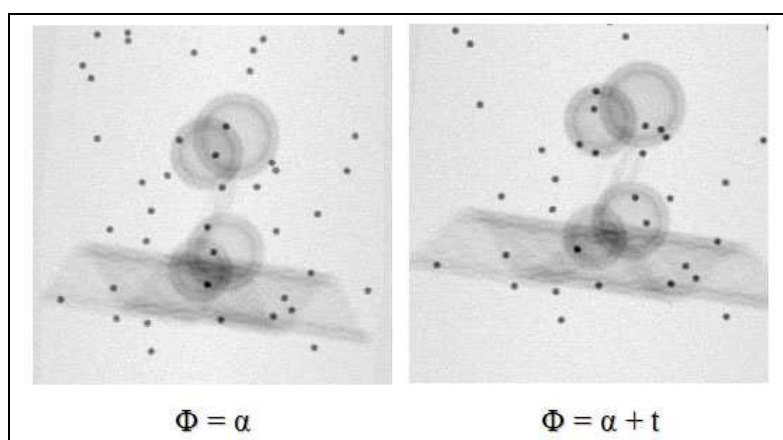


Fig. 3 : Exemple de déplacement en x et y de l'objet dans le champ d'observation entre deux acquisitions d'inclinaison angulaire différente. Image tirée de la banque d'images d'essais d'EM3D (cf. partie 4.3).

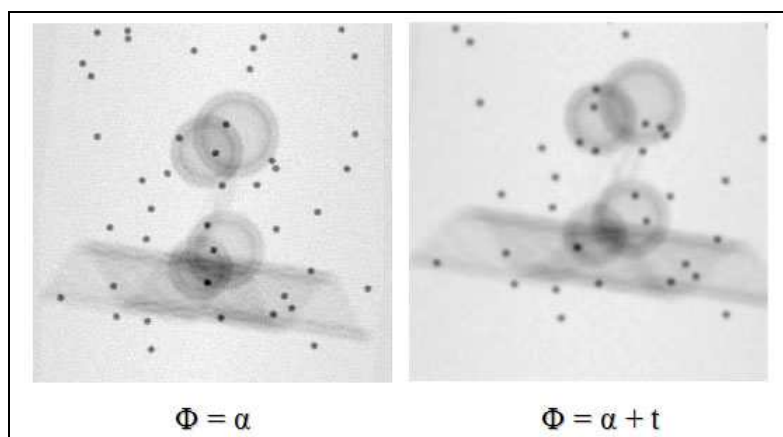


Fig. 4 : Exemple de déplacement en z de l'objet dans le champ d'observation entre deux acquisitions d'inclinaison angulaire différente. Ce déplacement entraîne une défocalisation de l'objet. Image tirée de la banque d'images d'essais d'EM3D (cf. partie 4.3).

3. Mise en place de la nanotomographie : actions à réaliser

Trois actions sont à réaliser pour mettre en place la nanotomographie :

- Au cours de l'acquisition des projections en faisant varier l'inclinaison, il faut corriger les problèmes de déplacement en x, y et z non désirés de la platine. De même, il faut pouvoir réaliser cette acquisition assez rapidement pour éviter une contamination de l'échantillon.
- Un recalage précis des images de projections suivant le même axe est nécessaire pour obtenir une reconstruction 3D correcte (cf. Fig. 5).
- Utiliser ou développer une méthode de reconstruction tomographique.

4. Solutions proposées

4.1. Acquisition des projections

Deux solutions sont présentées dans le tableau ci-dessous avec avantages et inconvénients :

Acquisition manuelle par un opérateur	Acquisition automatique par un logiciel
Avantage : <ul style="list-style-type: none">• Bon recalage et focus des images	Avantages : <ul style="list-style-type: none">• Bon recalage et focus des images• Rapide donc peu de contamination de l'échantillon (<u>ex : 25 minutes pour 140 projections</u>)
Inconvénients : <ul style="list-style-type: none">• Long (environ 2 minutes par projections) donc peut entraîner facilement une contamination de l'échantillon (<u>ex : 4 à 5 heures pour 140 projections</u>)• Pénible, c'est une tâche répétitive : le risque d'erreur de manipulation est élevé• Coût horaire de l'opérateur pour chaque nouvelle acquisition	Inconvénient : <ul style="list-style-type: none">• Coût fixe à l'achat (pas de solution gratuite sur le marché)

Pour utiliser la reconstruction nanotomographie de manière fréquente et sur n'importe quel type d'échantillons (dont ceux très sensible au problème de contamination), il sera nécessaire d'investir dans un logiciel d'acquisition automatique des projections.

Ci-dessous sont présentées quelques solutions permettant de faire de l'acquisition automatique :

- F.E.I.: 45000€ environ (solution globale intégrant jusqu'à la reconstruction tomographique). S'installe très facilement sur le microscope utilisé par le CdM.

Contact: www.fei.com

Olivier Messenger
Ingénieur d'Affaires
12, rue Claude Lorrain
75016 Paris
FRANCE

Tel/Fax: +33 (0) 1 45 20 18 26
Mobile : +33 (0) 6 79 72 01 79
eMail : olivier.messenger@fei.com

- Gatan: 13000€ environ. S'installe très facilement sur le microscope utilisé par le CdM.

Contact: www.gatan.com

Daniel Monville
Directeur GATAN France
3 bis, chemin du haut Breuil – Le Breuil
78113 Grandchamp
Tel : +33 (0) 1 34 94 44 07
Fax : +33 (0) 1 34 87 16 68
eMail : dmonville@gatan.com

- TVIPS: s'installe assez difficilement sur le microscope utilisé par le CdM (besoin d'un équipement informatique hardware supplémentaire).

Contact: www.tvips.com

Hans Tietz
TVIPS GmbH
Eremitenweg 1
D-82131 Gauting
Germany
Phone: +49 (0)89 8506567
Fax: +49 (0)89 8509488
eMail : info@tvips.com

4.2. Recalage précis des images de projections suivant le même axe

Les images de projections doivent être toutes précisément alignées suivant un même axe pour ensuite être reconstruites par tomographie (cf. *Fig. 5*).

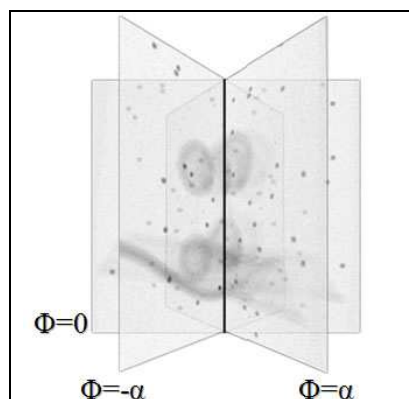


Fig. 5 : Alignement des projections suivant le même axe (ici axe vertical).

Des logiciels gratuits (comme EM3D, IMOD... cf. partie 4.3) ou payants (comme Inspect3D FEI, Tomography Acquisition Software Gatan ... cf. partie 4.3) permettent ce recalage avec les avantages et inconvénients listés dans le tableau ci-après :

Logiciels gratuits	Logiciels payants
<p>Avantage : Gratuit</p>	<p>Avantages : Recalage des images avec ou sans marqueur (corrélation croisée)</p>
<p>Inconvénient : Recalage des images par marqueurs imposés (impossible à utiliser pour certaines observations, mise en œuvre difficile)</p>	<p>Inconvénient : • Payant</p>

Le recalage par marqueurs utilisé par les logiciels gratuits oblige à incérer dans l'objet à observer, des marqueurs de petites tailles (par exemple des petites sphères) pour pouvoir réaliser l'alignement (cf. Fig. 6). Cela est en pratique très difficile voir impossible à réaliser pour des observations très haute résolution.

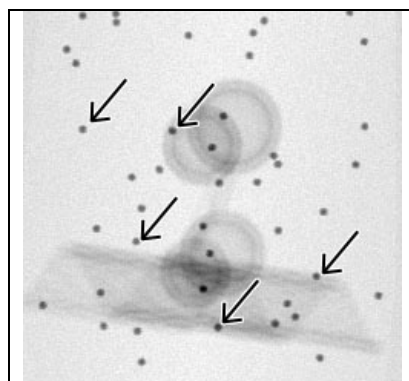


Fig. 6 : Exemple de petite sphères noires servant de marqueurs (quelques unes sont indiquées par les flèches noires). Image tirée de la banque d'images d'essais d'EM3D (cf. partie 4.3).

Nous avons développé une fonction intégrée à la plate forme de traitement d'images Aphelion d'Adcis permettant de réaliser le même type de recalage par corrélation croisée que celui utilisé par les logiciels payants. Le principe est le suivant :

Soient deux images i_1 et i_2 que nous souhaitons aligner précisément suivant le même axe. La première étape consiste à calculer les transformée de Fourier des deux images I_1 et I_2 . Ensuite, nous obtenons une nouvelle image en prenant la transformée de Fourier inverse du produit de I_1 par le conjugué de I_2 . Sur cette image, il suffit de détecter la position du pic d'intensité maximum : cette position par rapport au centre de l'image donne le vecteur déplacement de i_2 par rapport à i_1 (cf. Fig. 7).

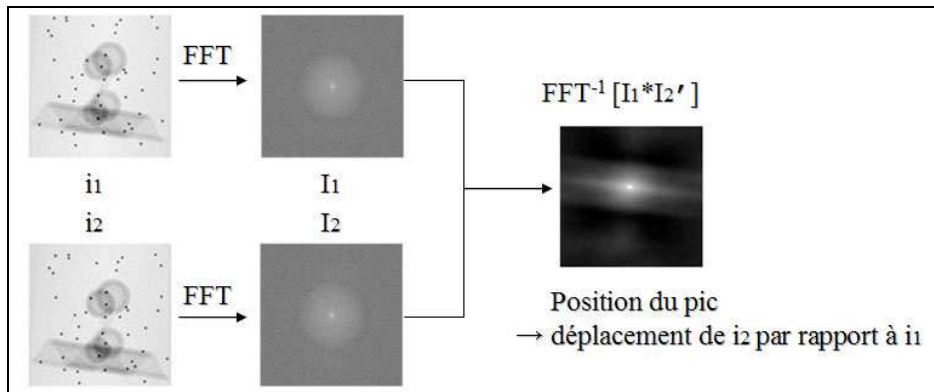


Fig. 7 : Recalage des images par corrélation croisée.

Pour réaliser ce traitement sur une série de projections ordonnées suivant l'inclinaison angulaire, il convient, une fois corrigé l'alignement d'une image par rapport à la précédente, de rendre périodique cette image suivant un tore (cf. Fig. 8).

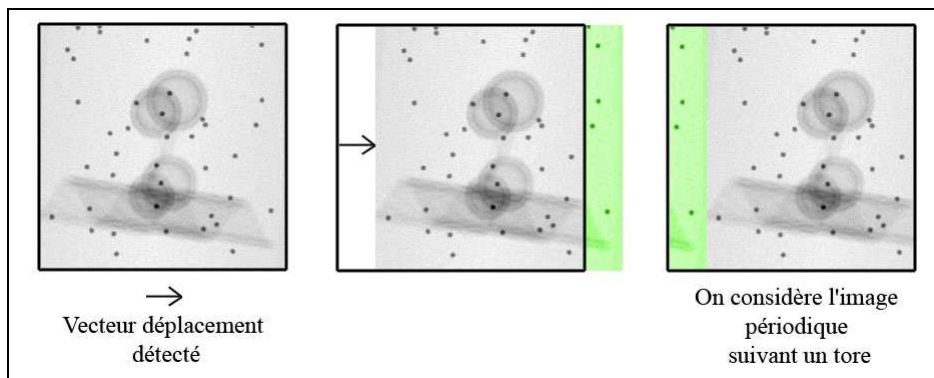


Fig. 8 : Pour aligner une série de projections ordonnées suivant l'angle d'inclinaison, il est nécessaire de rendre périodique suivant un tore les images dont on corrige l'alignement.

Pour valider notre méthode d'alignement par corrélation croisée, nous avons utilisé le calcul du PSNR (Peak Signal to Noise Ratio). Le PSNR entre deux images peut être calculé par la formule suivante :

$$\text{PSNR} = 10 \log \frac{d^2}{\text{EQM}}$$

avec d dynamique des images et EQM erreur quadratique moyenne entre les deux images.

Nous avons calculé le PSNR entre :

- un volume V de référence reconstruit par tomographie avec le logiciel EM3D (cf. Partie 4.3) avec des projections alignées par le logiciel EM3D,
- et un volume V_1 reconstruit par tomographie avec le logiciel EM3D avec des projections alignées par notre méthode utilisant la corrélation croisée.
- et un volume V_2 reconstruit par tomographie avec le logiciel EM3D avec des projections alignées par notre méthode utilisant la corrélation croisée puis réalignées par le logiciel EM3D.

Les scores obtenus sont de 38.47 pour le PSNR entre le volume de référence V et le volume V_1 , contre 38.71 pour le PSNR entre V et V_2 . Les scores étant très voisins, le logiciel EM3D n'a donc

quasiment pas réalignés les projections déjà alignées par notre méthode. Ce résultat permet de valider la méthode d'alignement que nous avons développée.

La fonction d'alignement des projections est accessible sous Aphelion (une fois la dll MMTomoOperator.dll installée) par l'opérateur Tomographie / Aligner Projection.

Le calcul du PSNR est accessible par la fonction Critères correspondance / PSNR.

4.3. Logiciels de reconstruction tomographique pour la nanotomographie

Plusieurs méthodes de reconstruction tomographiques existent : par méthode directe dans l'espace de Fourier, par rétroprojections filtrées, par méthodes algébriques ART ou SIRT... Nous développerons dans la partie 5 la méthode de reconstruction directe dans l'espace de Fourier. Pour les autres méthodes, des renseignements complémentaires peuvent être obtenus en utilisant les références données en partie 7.

De nombreux logiciels (gratuit ou non) permettent de réaliser des reconstructions 3D pour la nanotomographie. En voici une liste non exhaustive :

- EM3D (université de Stanford) : reconstructions 3D par rétroprojections filtrées. Ce logiciel a été testé et est simple d'utilisation. Son interface est ergonomique, il fonctionne sous environnement Windows et est gratuit.

Voir : <http://em3d.stanford.edu/>

- eTomo : environnement graphique JAVA de IMOD permettant des reconstructions 3D par rétroprojections filtrées sous environnement linux. Ce logiciel gratuit n'a pas été testé.

Voir : <http://bio3d.colorado.edu/imod/>

- Inspect3D : logiciel distribué par FEI (payant). Il permet des reconstructions 3D par rétroprojections filtrées mais aussi par des méthodes algébriques type ART ou SIRT. Ce logiciel n'a pas été testé.

Voir : <http://www.fei.com/Products/ProductApplications/NanoB/ElectronTomography/tabid/145/Default.aspx>

4.4. Reconstruction avec un nombre limité de projections

Nous nous sommes intéressés à l'influence de l'intervalle d'inclinaison angulaire ainsi qu'à l'influence de l'incrément angulaire sur la qualité de la reconstruction tomographique. Nous avons utilisé le logiciel EM3D (cf. partie 4.3) et sa banque de données d'images fournies pour le tester.

La banque de données fournie avec EM3D contient 151 images de projection ($\pm 75^\circ$ par incrément de 1°). Nous avons comparé la qualité de la reconstruction tomographique effectuée par EM3D entre :

- Un volume reconstruit V_r avec toutes les projections (volume de référence),

Et des volumes reconstruits V_i avec :

- Un intervalle angulaire des projections plus faible ($\pm 70^\circ$, $\pm 65^\circ$, $\pm 55^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 35^\circ$ et $\pm 25^\circ$),
- Ou un incrément angulaire plus important ($\pm 70^\circ$ par incrément de 2 et 3° , $\pm 45^\circ$ par incrément de 2°)

Nous avons utilisé plusieurs critères pour quantifier la qualité de la reconstruction :

- Le Peak Signal To Noise Ratio (PSNR) défini par :
$$\text{PSNR} = 10 \log \frac{d^2}{\text{EQM}}$$

- Le PSNR défini par : $PSNR2 = 10 \log \frac{\sigma(V_r - V_i)}{\sigma(V_r)}$
- Le PSNR défini par : $PSNRabs = 10 \log \frac{\sigma(|V_r - V_i|)}{\sigma(V_r)}$
- Le critère Universal Image Quality UIQ*
- Le critère Structural Similarity Based Image Quality **
- Le critère Mean Structural Similarity Based Image Quality **

* : A Universal Image Quality Index, Zhou Wang, Alan C Bovik, IEEE Signal Processing Letters, Vol 20, n°Y, 2002.

** : Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity, Zhou Wang, Alan C Bovik, Hamid Rahim Sheikh, Eero P Simincelli, IEEE transactions on image processing, Vol 3, n°4, 2004.

Les résultats obtenus sont présentés figure 9. Nous pouvons remarquer que tous les critères donnent des résultats allant dans la même direction. Nous pouvons en tirer les conclusions suivantes :

- Plus l'intervalle angulaire des projections est faible, plus la qualité du volume reconstruit est faible et ce même lorsque l'on réduit très peu cet intervalle.

- Si l'incrément angulaire est élevé, la qualité de la reconstruction devient très rapidement mauvaise. Pour une reconstruction tomographique de qualité, il est déconseillé d'augmenter l'incrément angulaire des projections même si le gain de temps serait appréciable (pour éviter une contamination de l'échantillon par exemple).

Pour une reconstruction tomographique 3D de qualité, il convient de faire l'acquisition d'un porte échantillon pour MET adapté permettant un intervalle d'inclinaison angulaire le plus grand possible ($\pm 80^\circ$).

Le calcul du PSNR est accessible sous Aphelion (une fois la dll MMTomoOperator installée) par la fonction Critères correspondance/PSNR.

PSNR2 est accessible par la fonction Critères correspondance/PSNR2.

PSNRabs est accessible par la fonction Critères correspondance/PSNRabs.

UIQ est accessible par la fonction Critères correspondance/UIQ.

SSIM est accessible par la fonction Critères correspondance/SSIM.

MSSIM est accessible par la fonction Critères correspondance/MSSIM3D.

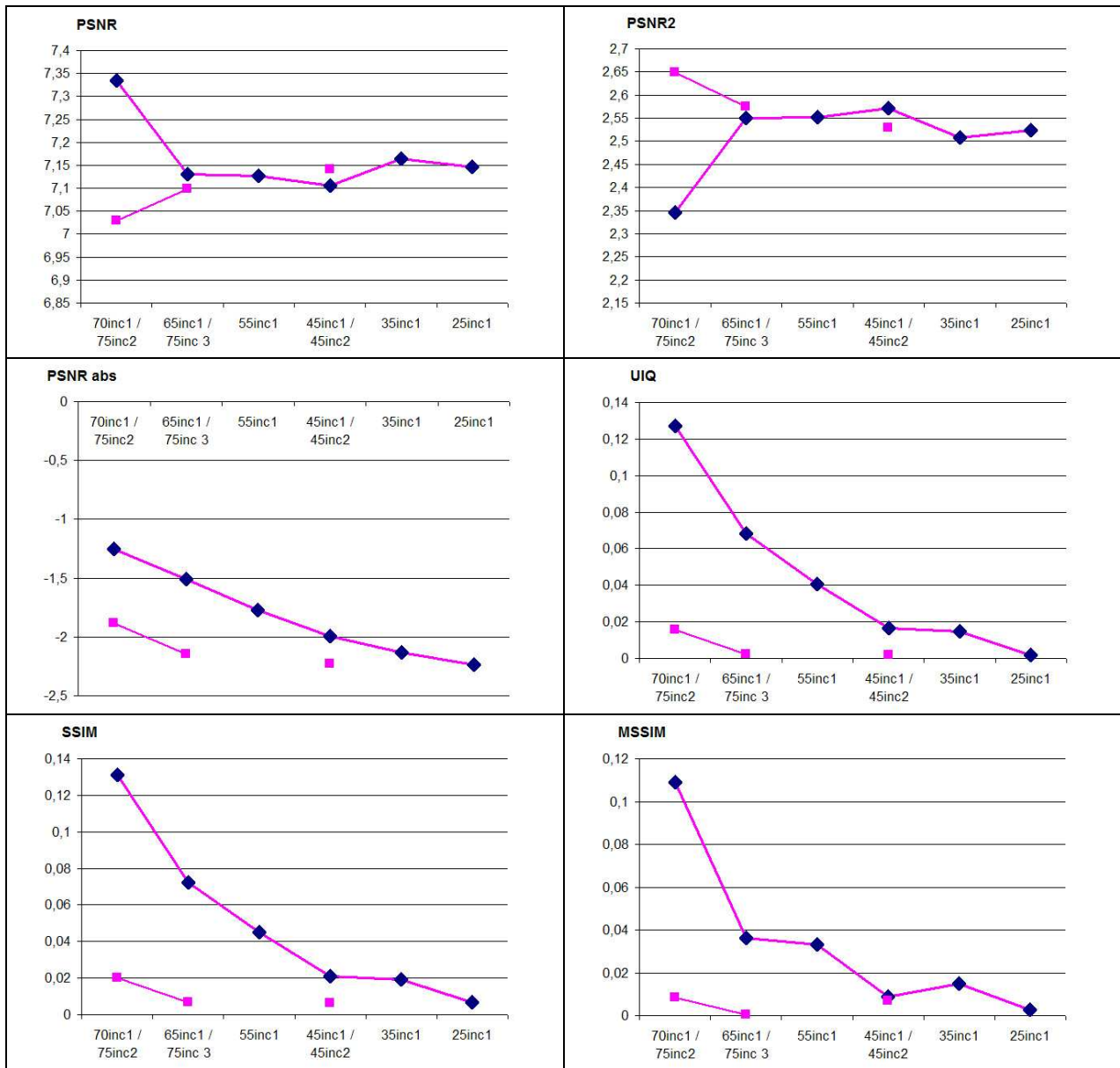


Fig. 9 : Critère de qualité de reconstruction tomographique par rapport à un volume de référence reconstruit avec des projections comprises dans un intervalle angulaire de $\pm 75^\circ$ par incrément de 1° .

5. Solution d'alignement des projections et de reconstruction intégrée à la plateforme Aphelion

Pour une grande facilité d'utilisation et pour une utilisation immédiate par des personnes non familiarisées avec les méthodes de reconstruction tomographique, une solution complète d'alignement des projections et de reconstruction tomographique 3D a été développée et intégrée à la plateforme Aphelion. Il est cependant possible d'utiliser d'autre logiciel (comme EM3D cf. partie 4.3) pour la reconstruction tomographique 3D.

5.1. Reconstruction tomographique dans l'espace de Fourier

La méthode de reconstruction tomographique 3D utilisée est une méthode de reconstruction dans l'espace de Fourier. L'objet est reconstruit en 3D coupe par coupe suivant l'axe z. L'axe d'inclinaison angulaire des projections doit être vertical. Pour chaque coupe z, le principe est le suivant (cf. Fig. 10):

- A partir des projections $i_\Phi(x,z)$ obtenues pour des inclinaisons angulaires Φ , pour z fixé, calculer le sinogramme $p(\xi, \Phi)$:

$$p(\xi, \Phi) = i_\Phi(x,z) \text{ avec } \xi=x$$

- Calculer $P(v,\Phi)$ obtenu par FFT 1D de $p(\xi, \Phi)$
- Calculer $F(v_x, v_y)$ en utilisant le « Central Slice Theorem » :

$$P(v,\Phi) = F(v_x, v_y) \text{ avec } v_x = v \cos \Phi \text{ et } v_y = v \sin \Phi$$

Cette étape revient à faire une projection radiale dans l'espace de Fourier. Pour limiter les problèmes d'interpolation, celle-ci est effectuée dans un domaine deux fois plus grand (cf. source de MMTomoOperator.dll pour plus de détails).

- Calculer le volume finale $f(x,y)$ par FFT 2D inverse de $F(v_x, v_y)$.

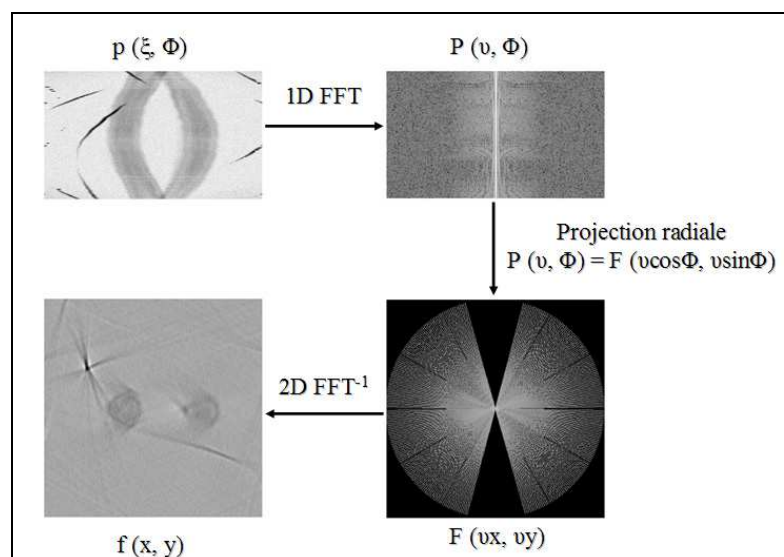


Fig. 10 : principe de la reconstruction tomographique directe dans l'espace de Fourier.

5.2. Filtrage des sinogrammes

Nous avons développé une méthode de filtrage des sinogrammes permettant d'obtenir visuellement de bons résultats (cf. *Fig. 11*). Ce filtrage est réalisé en appliquant aux sinogrammes un filtre médian 3x3 permettant de supprimer le bruit des acquisitions, suivi de l'application d'un filtre alterné séquentiel avec un élément structurant vertical de taille 1x3 permettant de supprimer les lignes horizontales trop claires ou trop foncées dues aux acquisitions n'ayant pas toutes la même intensité moyenne.

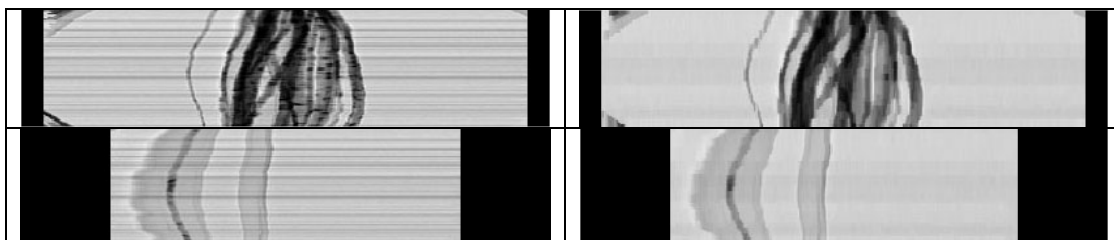


Fig. 11 : A gauche, sinogrammes originaux, à droite, sinogrammes filtrés.

5.3. Listes des fonctions disponible sous Aphelion

Voici les différentes fonctions accessibles sous Aphelion dans le menu MMTomoOperator / Tomographie une fois la dll MMTomoOperator installée :

• Lire Projections

Lit les projections MET et les placent dans une image 3D.

Cette image 3D peut être ensuite visionnée à l'aide de 3D Image Viewer et sauvegarder en utilisant la fonction "Image Utilities / Input/Output / ImgWrite".

Paramètre d'entrée:

Chemin des Images : indiquer la première image de la série de projections

Image de sortie:

Image 3D contenant les projections

• Aligner Projections

Lit les projections MET, les alignent, et les placent dans une image 3D.

Paramètre d'entrée:

Chemin des Images : indiquer la première image de la série de projections

Image de sortie:

Image 3D contenant les projections alignées

• Rotation

Rotation suivant l'axe Z d'une image 3D. A utiliser, par exemple, pour placer l'axe d'alignement des projections suivant l'axe vertical

Paramètres d'entrée:

Image 3D

Angle de rotation

Image de sortie:

Image 3D

- **Construire Sinogrammes**

Construit les sinogrammes à partir de projections alignées.

Image d'entrée:

Image 3D des projections alignées

Image de sortie:

Image 3D contenant les sinogrammes

- **Filtrer Sinogrammes**

Filtre les sinogrammes

Image d'entrée:

Image 3D des sinogrammes

Image de sortie:

Image 3D des sinogrammes filtrés

- **Reconstruction**

Reconstruction tomographique (dans l'espace de Fourier).

Paramètres d'entrée:

Image 3D des sinogrammes (doit avoir une taille en puissance de 2)

Angle d'inclinaison de début des projections

Incrément angulaire d'inclinaison entre les projections

Image de sortie:

Image 3D de l'objet reconstruit

Les images 3D peuvent être visionnées à l'aide de 3D Image Viewer.

Les images 3D peuvent être sauvegardées en utilisant la fonction "Image Utilities / Input/Output / ImgWrite".

5.4. Exemples de reconstruction tomographique 3D

La méthode étant actuellement opérationnelle, nous avons réalisé deux reconstructions nanotomographiques à partir d'acquisitions réalisées au CdM :

- Bille de Zircon (Tosoh TZ8Y, dopé 8% molaire en Oxyde d'Yttrium (Y₂O₃)). Application : conducteur d'ions oxygène (pile à combustible, pompe électrochimique, capteur de pression...). Acquisition : -47° à +43° par incrément de 1°. Résolution des images : x115000 (0.2 nm ↔ 1 voxel) (cf. Fig. 12).

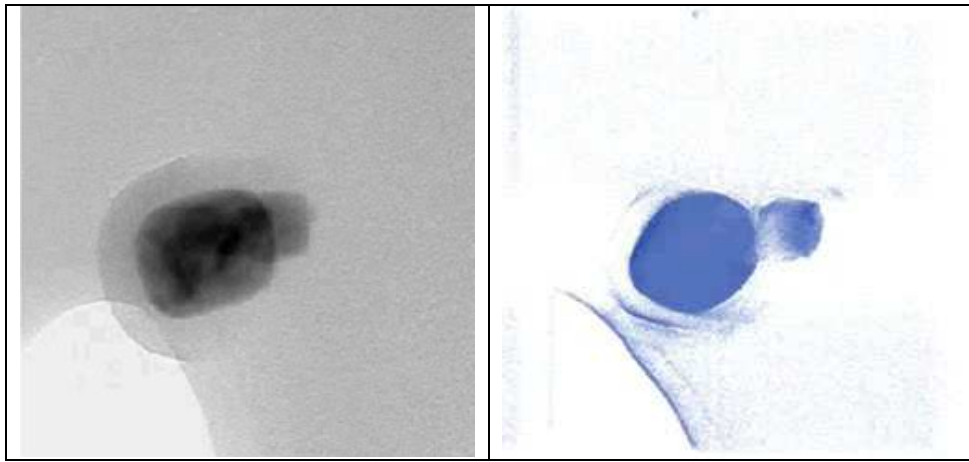


Fig. 12 : Bille de zircone. A gauche, image de projection. A droite, reconstruction 3D.

- Aiguille d'Oxyde de Zinc sublimées au four solaire. Matériau fourni par le Laboratoire PROMES (CNRS Odeillo). Application : conducteur ionique. Acquisition : -42° à $+37^{\circ}$ par incrément de 1° . Résolution des images : $\times 12000$ ($2\text{ nm} \leftrightarrow 1\text{ voxel}$) (cf. Fig. 13).

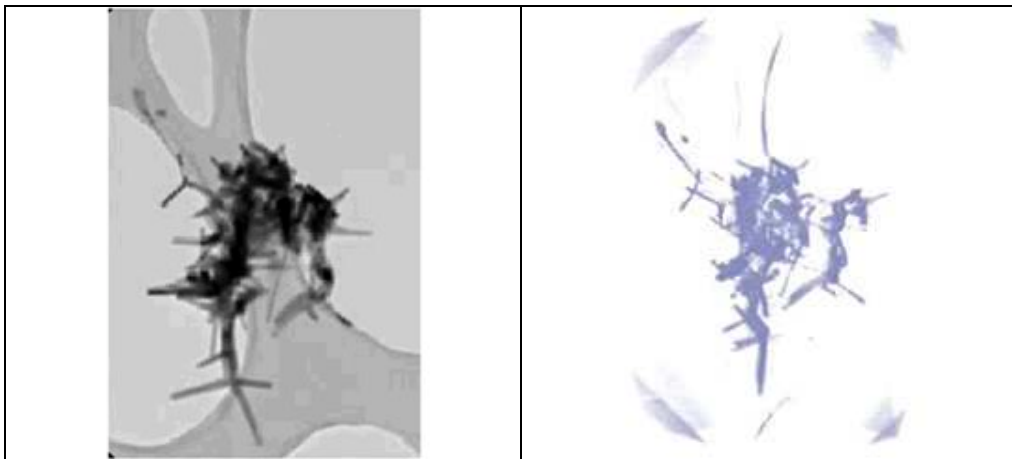


Fig. 13 : Aiguilles d'oxyde de zinc. A gauche, image de projection. A droite, reconstruction 3D.

6. Conclusion et perspectives

Une méthode de nanotomographie utilisant le matériel disponible au CdM (à la date du 10 avril 2007) est opérationnelle. Les acquisitions des projections doivent être réalisées manuellement par un opérateur. L'alignement précis des projections selon le même axe ainsi que la reconstruction tomographique peuvent être réalisés à l'aide d'une solution intégrée à la plateforme Aphelion d'Adcis en installant la dll MMTomoOperator. Deux points sont cependant critiques pour pouvoir réaliser des reconstructions 3D de qualité permettant une analyse de structure 3D précise:

- Il est nécessaire d'investir dans un logiciel permettant de réaliser l'acquisition des différentes projections automatiquement (pour diminuer la durée de l'acquisition et ainsi éviter une trop grande contamination du matériau).
- L'achat d'un porte objet permettant une inclinaison plus importante de l'échantillon (par exemple $\pm 80^{\circ}$) est nécessaire pour obtenir des reconstructions plus complètes évitant ainsi des parties reconstruites seulement à partir de données interpolées.

Il serait intéressant d'aller plus loin dans le filtrage des sinogrammes. Le porte objet du MET peut être tilté suivant un deuxième axe : il serait intéressant d'utiliser cette possibilité pour augmenter le nombre de projections et donc la qualité de la reconstruction (en adaptant celle-ci). De même, pour améliorer la qualité de la reconstruction, il faudrait s'intéresser aux méthodes de reconstruction basée sur la minimisation de la variation totale (cf. partie 7).

7. Références

7.1. Congrès

Voici deux congrès dont les papiers concernant la tomographie sont très certainement intéressants :

- IEEE MIC 2006 site : <http://www.nss-mic.org/2006/>

Avec en particulier, cet article tiré de cette conférence :

A new FBP-type algorithm on Improving Feldkamp Reconstruction for Z-axially Untruncated Data from a Circular Orbit, Liang Li, Student Member, IEEE, Zhiqiang Chen, Yuxiang Xing, Li Zhang, Kejun Kang.

- SPIE Medical Imaging 18-22 février 2007, en particulier la conférence 6510 (Physical of Medical Imaging) et ces deux articles :

Limited-view-angle tomographic image reconstruction via total minimization, J.V. Velikilina, S. Leng, G. Chen, Univ. Of Wisconsin/Madison

Image reconstruction in digital breast tomosynthesis by total variation minimization, E.Y. Sidky, I.S. Reiser, R.M. Nishikawa, X.M. Pan, Univ. of Chicago.

7.2. Articles

Reconstruction d'images de tomographie, cours Isabelle Bloch, ENST Paris.

A fast reconstruction algorithm for electron microscope tomography, K. Sandberg, D.N. Mastrorade, G. Beylkin, Journal of Structural Biologu 144 (2003) 61-72.

Assesment of the 3D Localization of Metallic Nanoparticles in Pd/SiO₂ Cogelled Catalysts by Electron Tomography, C.J. Gommès, K. de Jong, J.P. Pirard, S. Blacher, Langmuir 2005, 21, 12378-12385.

Constrained Total Variation Minimization and Application in Computerized Tomography, X. Zhang, J. Froment, EMMCVPR 2005.

Total Variation based Fourier reconstruction and regularization for computer tomography, X. Zhang, J. Froment, MIC 2005.

Reconstruction et Régularisation en Tomographie par une méthode de Fourier basée sur la Variation Totale, thèse Xiaqun Zhang, Univ. Bretagne Sud, 2006.

Contact : zhang@univ-ubs.fr. Sa méthode de reconstruction est implémentée sous la plateforme MegaWave2 (ENS Cachan <http://www.cmla.ens-cachan.fr/Cmla/Megawave/index.html>). Xiaqun Zhang m'a fait parvenir les sources des fonctions qu'elle a développées au cours de sa thèse (elle souhaiterait tester sa méthode de reconstruction sur des cas réels). Ces fichiers sont disponibles dans le DVD accompagnant ce document.

Principle of Computed Tomographic Imaging, A.C. Kak, M. Slaney, IEEE press, 1988.

Transmission electron goniometry and its relation to electron tomography for material science application, P. Moeck, P. Fraundorf.

7.3. Sites WEB

<http://wwwex.biochem.mpg.de/baumeister/TEM/aet.html>

http://www-hrem.msm.cam.ac.uk/research/CETP/electron_tomography.html

<http://em-outreach.ucsd.edu/community-codes/MicroscopySoftware.html>

<http://electrontomography.org/>

<http://www.3dem-noe.org/>

http://www-db.embl.de/jss/EmblGroupsHD/per_3219.html

<http://wwwex.biochem.mpg.de/baumeister/TEM/aet.html>

<http://www.lce.hut.fi/~engelhar/csc/CSC-94.html>

<http://www.4icet.org/>

http://www-hrem.msm.cam.ac.uk/research/CETP/electron_tomography.html

http://ifr62.univ-lyon1.fr/jipe/S_Peyrol_JIPE2007.pdf

<http://www.jensenlab.caltech.edu/Projects/electrontomography.html>

http://www.embl-heidelberg.de/emblGroup/researchReport/rr05_247.pdf

<http://www.snv.jussieu.fr/~wboudier/presentation.html>