

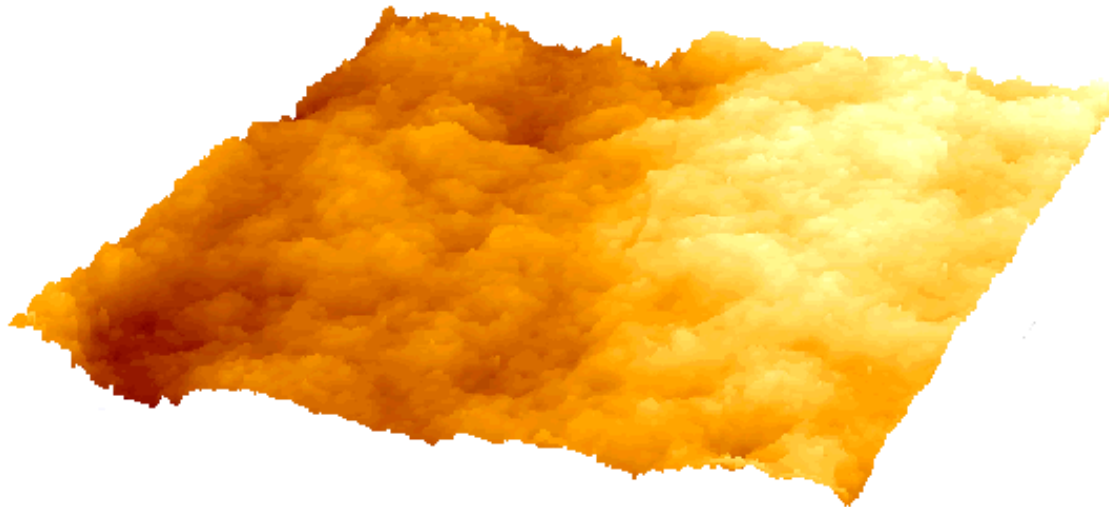
GN MEBA



Groupement National de
Microscopie Electronique à Balayage et de microAnalyses

RECONSTRUCTION DE SURFACE 3D QUANTITATIVE EN MEB

D. BOIVIN retraité ONERA



RECONSTRUCTION 3D À PARTIR D'IMAGES STÉRÉOSCOPIQUES D'ÉLECTRONS SECONDAIRES (SE)

(PRINCIPE, MISE EN ŒUVRE, EXEMPLES D'APPLICATIONS)

RECONSTRUCTION 3D À PARTIR D'IMAGES MULTI DÉTECTEURS D'ÉLECTRONS RETRODIFFUSÉS (BSE)

(PRINCIPE, MISE EN ŒUVRE, EXEMPLES D'APPLICATION)

RECONSTRUCTION À PARTIR D'IMAGES STÉRÉOSCOPIQUES D'ÉLECTRONS SECONDAIRES

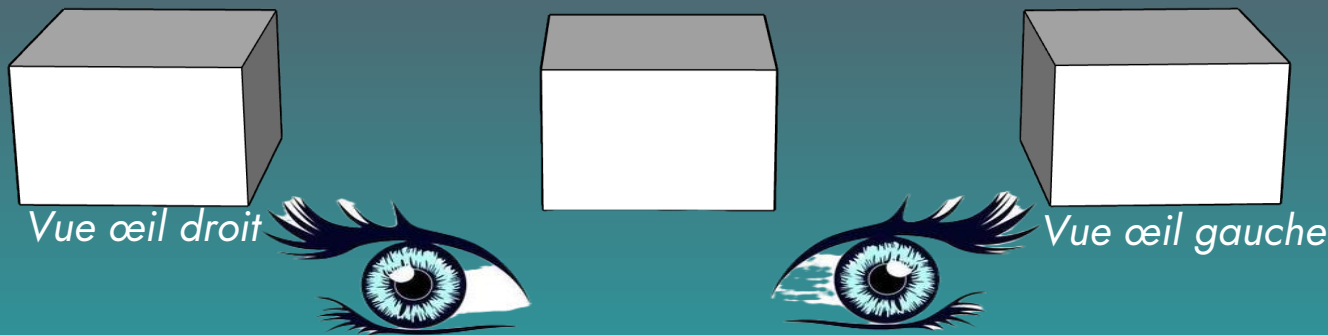
- Principe général de la stéréoscopie

Définition:

Observation d'une même scène de deux points de vue distincts

Exemple le plus commun:

Nos deux yeux nous fournissent deux images différentes d'une même scène



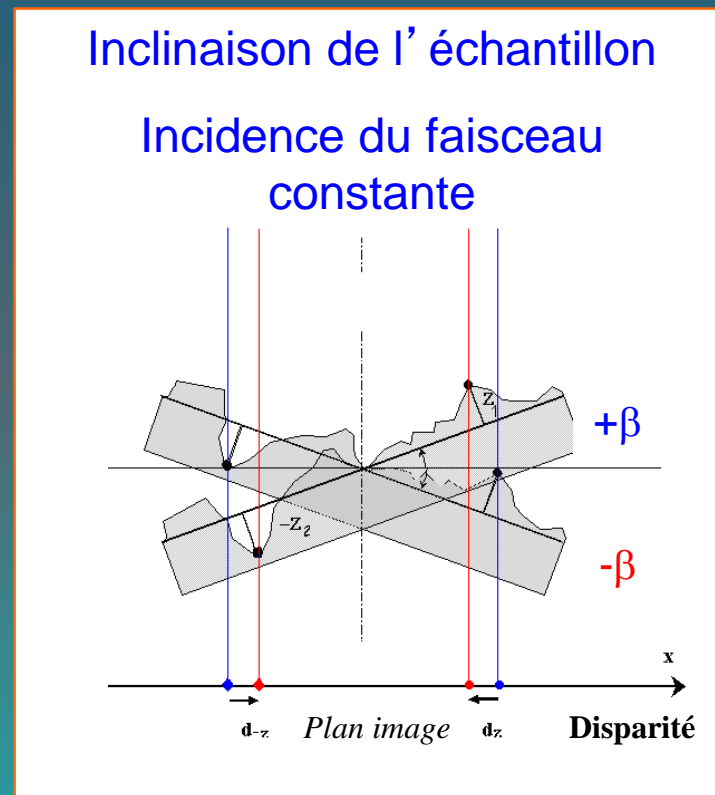
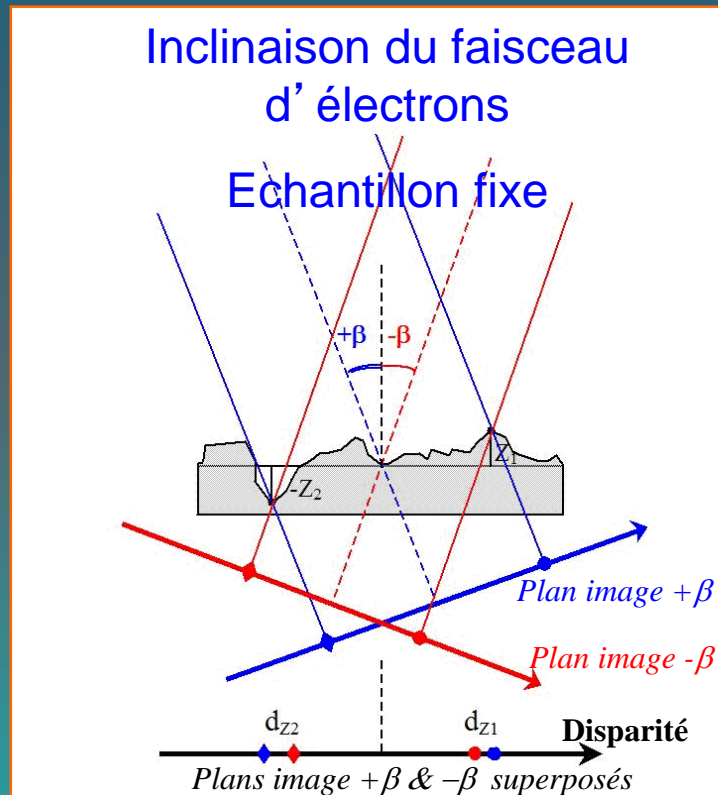
Le chevauchement cérébral des 2 champs de vision des 2 yeux permet la perception de ces différences et par suite celle de la profondeur dans la direction perpendiculaire au plan comprenant les 2 yeux

Principe de la reconstruction 3D stéréoscopique

Application au cas particulier du MEB

Observation d'une même surface de deux points de vue distincts.

Deux possibilités



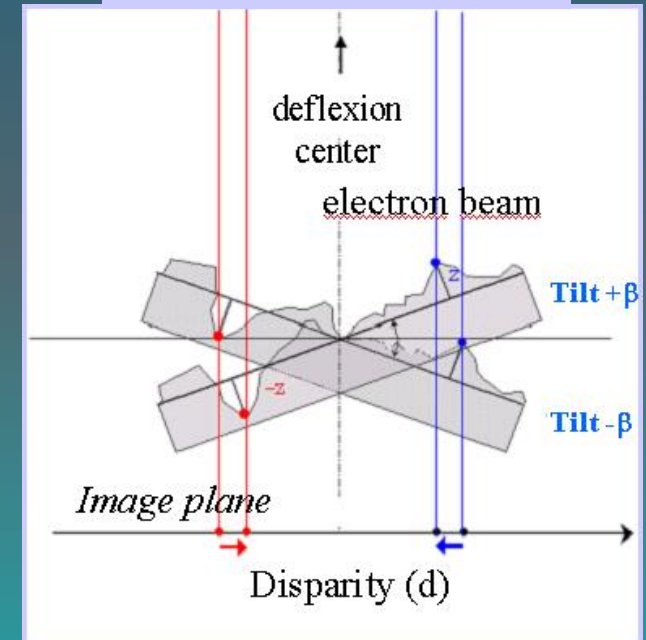
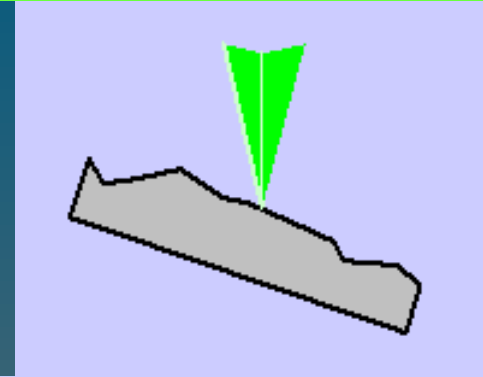
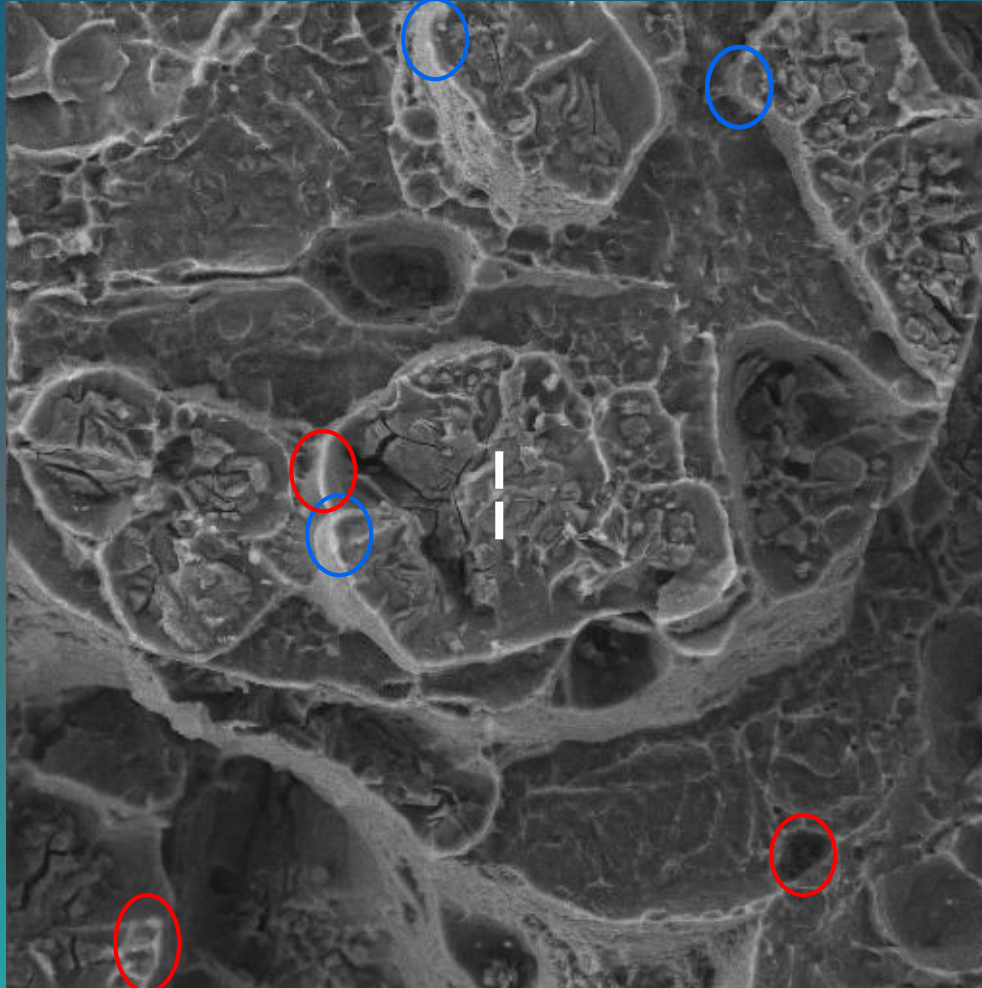
DISPARITE d : Décalage en position selon l'axe perpendiculaire à l'axe d'inclinaison

La disparité (amplitude et signe) est fonction de l'élévation : $z \sim d / 2 \sin \beta$

Principe de la reconstruction 3D stéréoscopique



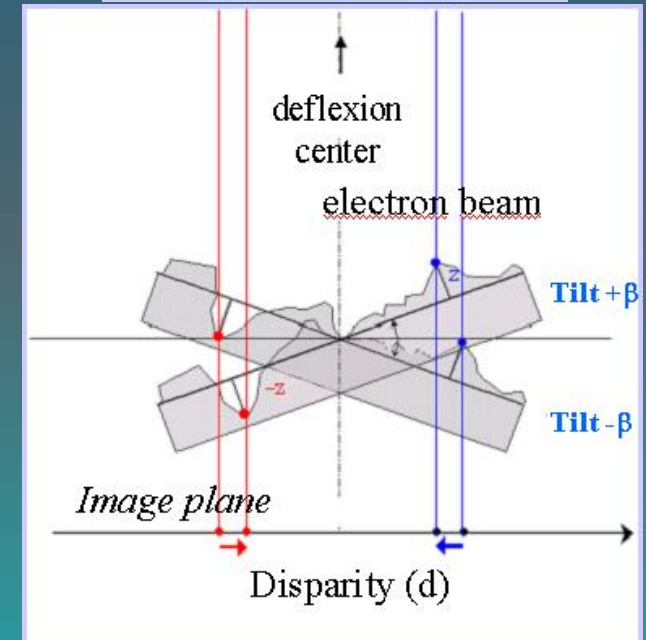
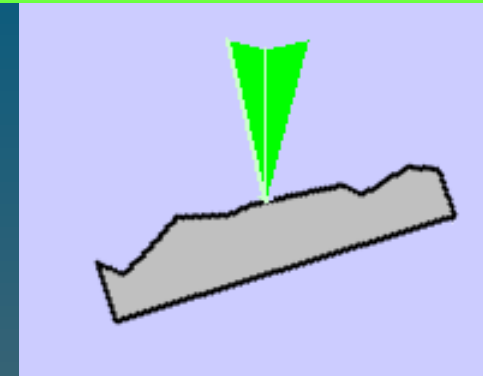
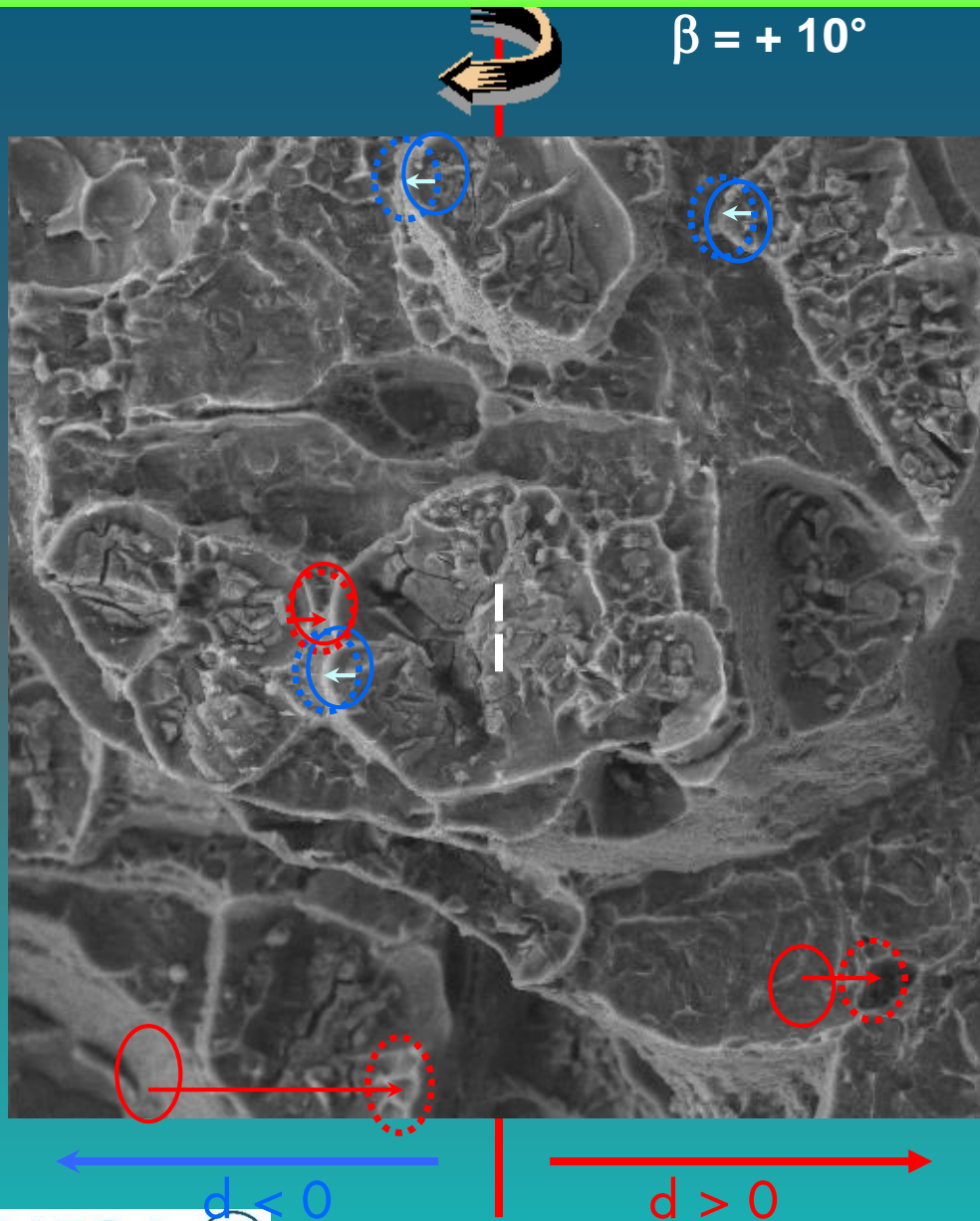
$$\beta = -10^\circ$$



$$\text{Tilt} \pm \beta \rightarrow \Delta z \sim d / 2\sin\beta$$

(d = Disparité)

Principe de la reconstruction 3D stéréoscopique



$$\text{Tilt} \pm \beta \rightarrow \Delta z \sim -d / 2\sin\beta$$

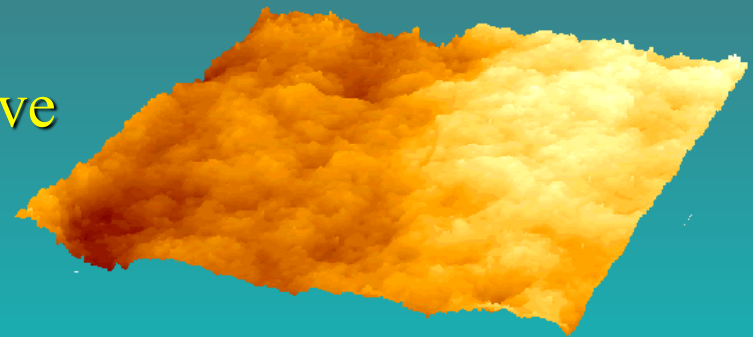
(d = disparité)

Principe de la reconstruction 3D

Cas d'une paire d'images stéréoscopiques

4 étapes principales

1. Acquérir un couple d'images d'un même champ avec deux inclinaisons différentes de l'échantillon
2. Mesure des disparités, écarts en pixel/micron entre les pixels/détails qui se correspondent sur les 2 images (pixels homologues)
3. Calculer l'élévation en chaque point/pixel à partir de la disparité
4. Construction de l'image 3D Quantitative

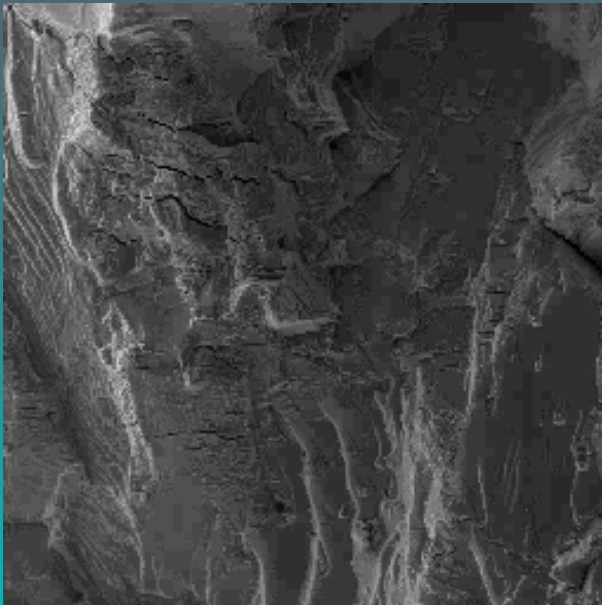


Principe de la reconstruction 3D

Mesure des disparités

- Processus élémentaire d'appariement des pixels homologues

Utilisation d'un processus de corrélation d'images dans une fenêtre de taille réduite et paramétrable en dimensions pour retrouver le même point-objet ou pixel dans les deux images A et B de la paire stéréo.



La position X, Y recherchée correspond à celle qui conduit au coefficient de corrélation C_{XY} maximum

$$C_{XY} = \frac{\sum_{X,Y} (A_{X,Y} - \bar{A}) (B_{X,Y} - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{X,Y} (A_{X,Y} - \bar{A})^2} \sqrt{\sum_{X,Y} (B_{X,Y} - \bar{B})^2}} = \frac{\text{Covariance}(A,B)}{\text{Ecart-type}(A) \cdot \text{Ecart-type}(B)}$$

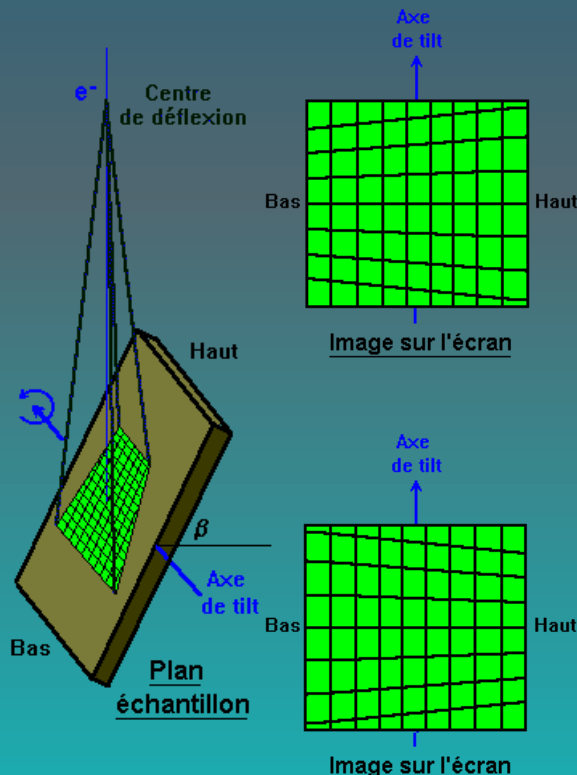
Principe de la reconstruction 3D

Mesure des disparités

- Intégration du processus élémentaire de corrélation dans un algorithme global qui doit prendre en compte la distorsion des images.

Plusieurs approches possibles pour la recherche des pixels homologues :

- Recherche dans les deux directions X et Y de l'image.
- Recherche dans la seule direction X, après rectification des images basée sur les paramètres géométriques nominaux d'acquisition.



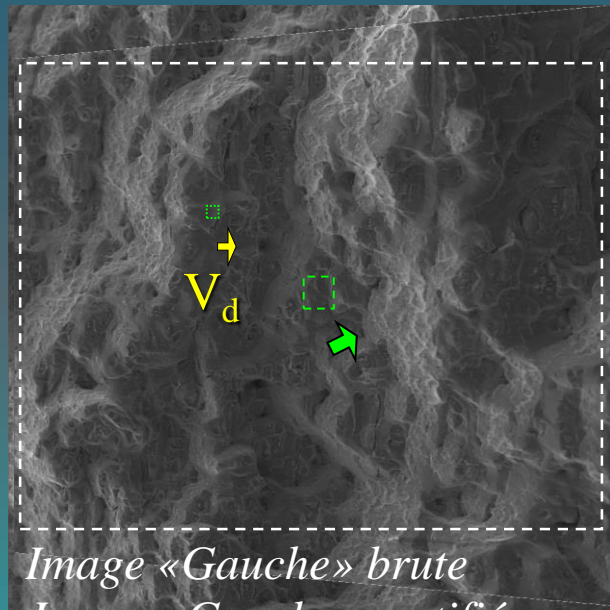
Principe de la reconstruction 3D

Mesure des disparités

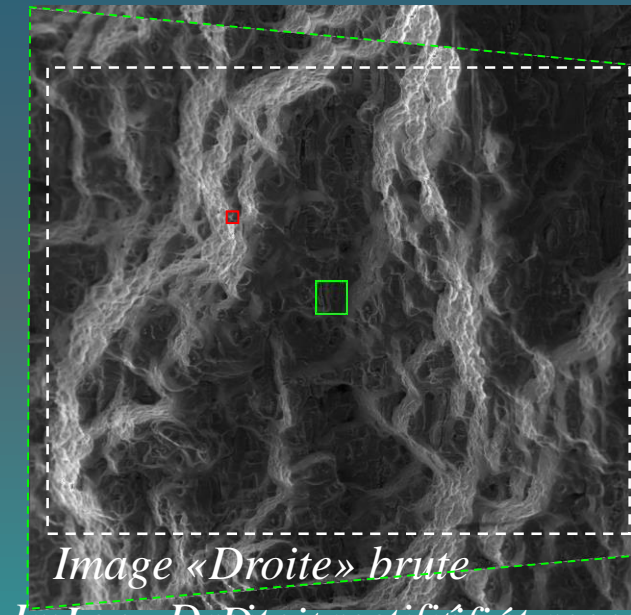
Approche par corrélation ligne à ligne

Vecteur Disparité V_d obtenu par recherche **dans la seule direction X...**

Après: 1- **Rectification des images** 2- **Recentrage image Droite / Gauche**



Simple correction de parallaxe à partir des paramètres géométriques nominaux



Le même détail «Centre d'inclinaison» est alors au centre des deux images

- Amplitude de recherche limitée
- Procédure d'appariement avec une contrainte d'ordre

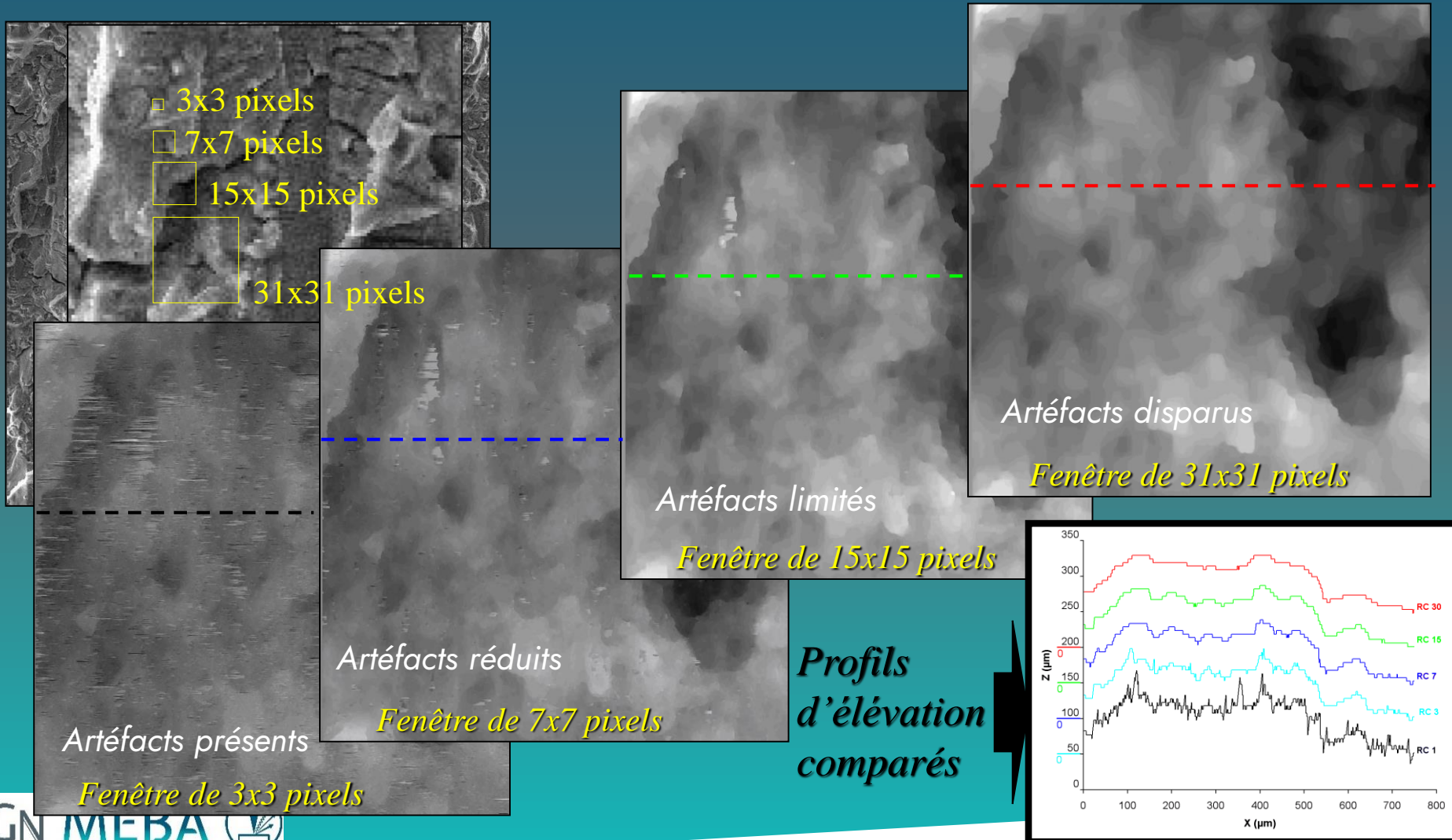


Réduction du risque d'appariements erronés

Principe de la reconstruction 3D

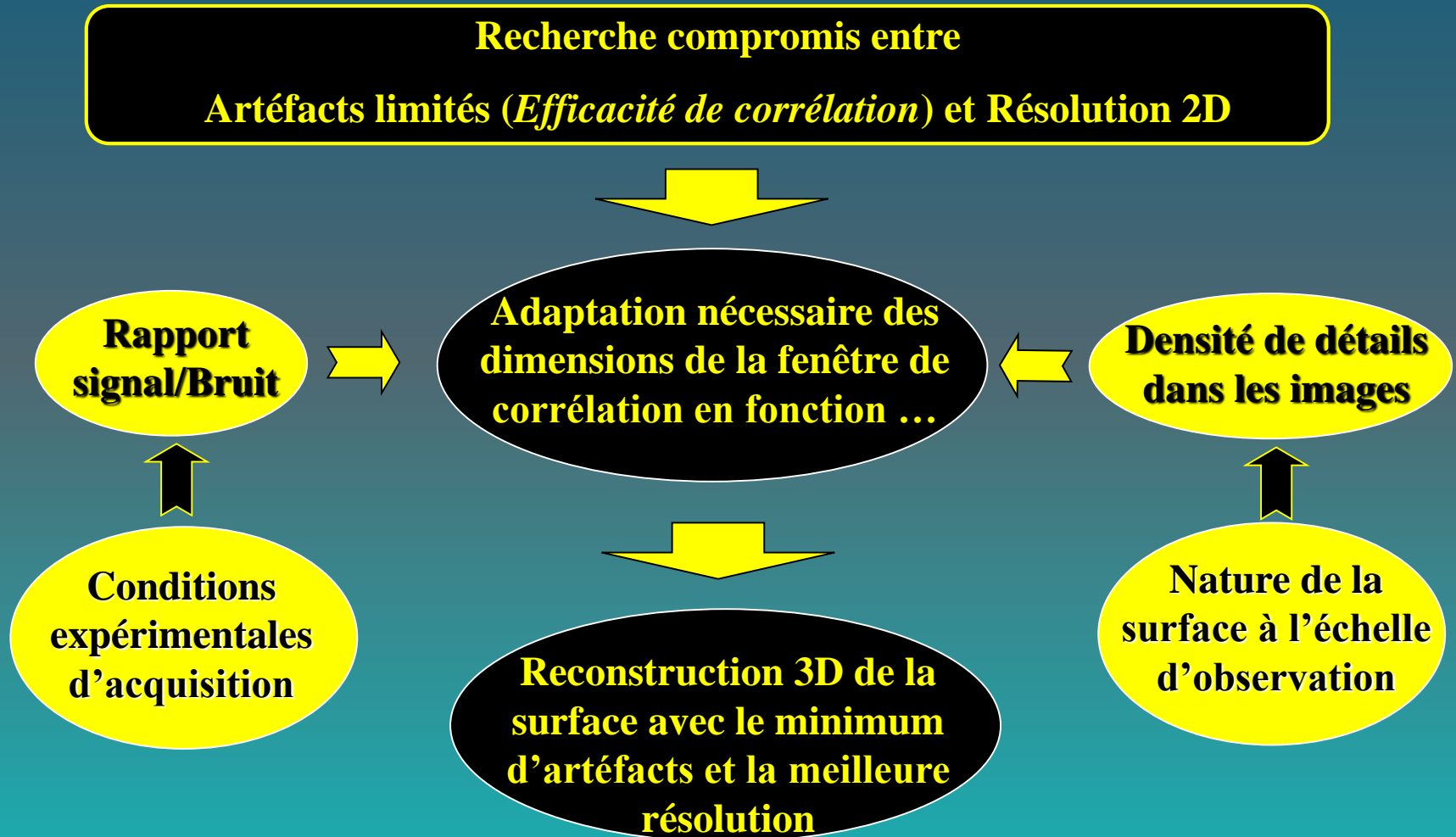
Mesure des disparités

Influence des dimensions de la fenêtre de corrélation



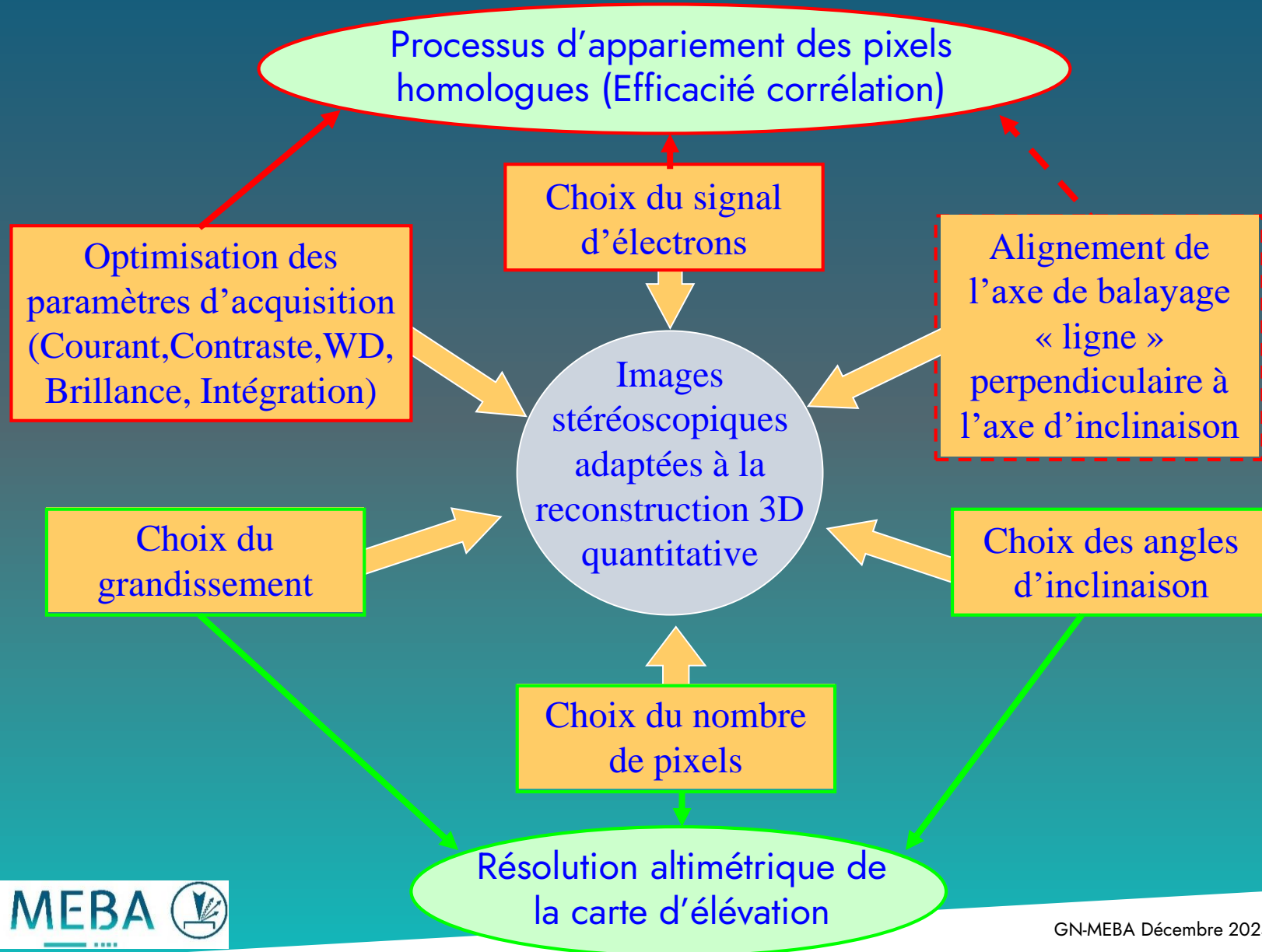
Principe de la reconstruction 3D

Influence des dimensions de la fenêtre de corrélation



Mise en œuvre expérimentale

Texture visible dans les images pour le processus d'appariement des pixels homologues



Mise en œuvre expérimentale

Résolution altimétrique (Δz_{\min}) de la carte d'élévation

Si on définit La résolution altimétrique égal à 1 pixel de disparité (d)

Paire stéréo (tilt $\pm \beta$)

$$\Delta z_{\min} \sim d(1 \text{ pixel}) / 2.\sin\beta = [(\text{Dim Champ})_x / (\text{Nb Pixels})_x] / 2.\sin\beta$$

Faible résolution

$$\begin{aligned} \beta = \pm 5^\circ &\rightarrow \sin\beta = 0.087 & G \sim 1000 &\Rightarrow \text{champ} \sim 100 \mu\text{m} \\ 512 \times 512 \text{ pixels} &\Rightarrow 1 \text{ pixel} & \rightarrow &\Delta x \sim 0.2 \mu\text{m} \\ && \Delta z_{\min} &\sim 1.2 \mu\text{m} \end{aligned}$$

Résolution moyenne

$$\begin{aligned} \beta = \pm 10^\circ &\rightarrow \sin\beta = 0.174 & G \sim 1000 &\Rightarrow \text{champ} \sim 100 \mu\text{m} \\ 1024 \times 1024 \text{ pixels} &\Rightarrow 1 \text{ pixel} & \rightarrow &\Delta x \sim 0.1 \mu\text{m} \\ && \Delta z_{\min} &\sim 0.3 \mu\text{m} \end{aligned}$$

Haute résolution

$$\begin{aligned} \beta = \pm 20^\circ &\rightarrow \sin\beta = 0.342 & G \sim 5000 &\Rightarrow \text{champ} \sim 20 \mu\text{m} \\ 1024 \times 1024 \text{ pixels} &\Rightarrow 1 \text{ pixel} & \rightarrow &\Delta x \sim 0.02 \mu\text{m} \\ && \Delta z_{\min} &\sim 0.03 \mu\text{m} \end{aligned}$$

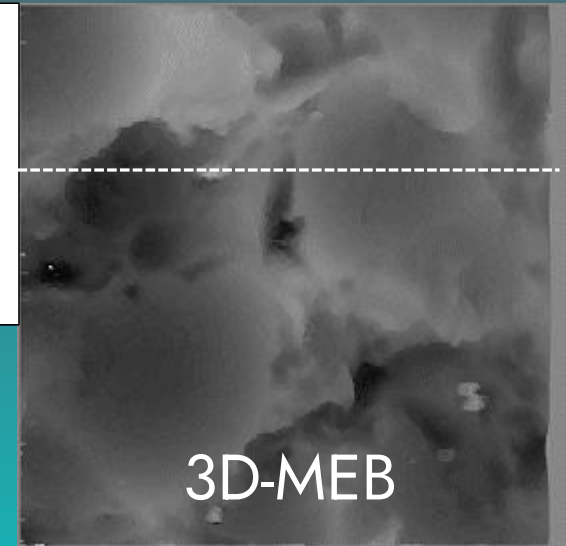
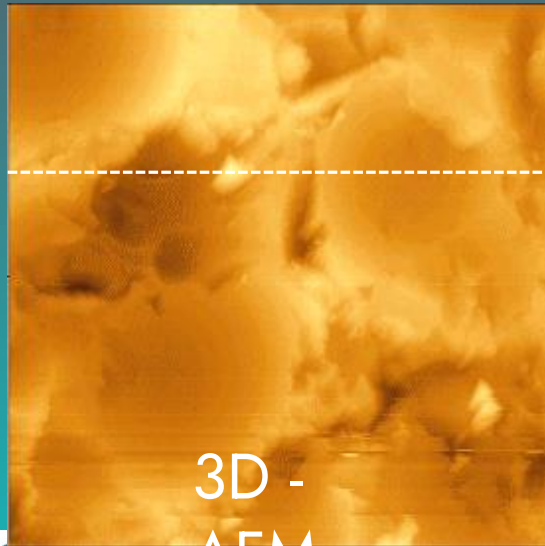
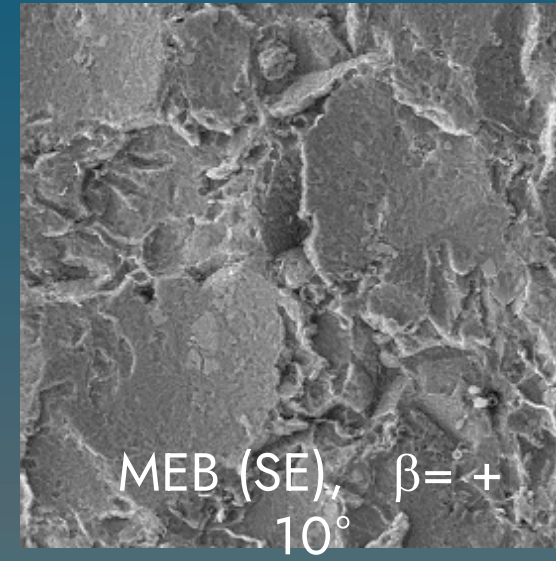
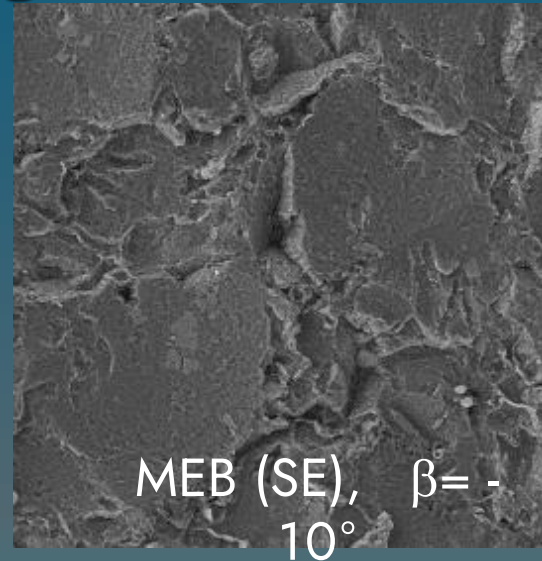
Exemples d'application

Surface alliage Aluminium microbillé

Comparaison 3D-MEB avec AFM

Champ $\sim 100 \times 100 \mu\text{m}^2$

Max elevation $\sim 14 \mu\text{m}$



Exemples d'application

*Caractérisation de surface d'un superalliage
après écaillage de sa protection thermique (Barrière thermique)*

Résolution altimétrique moyenne associé champ moyen

Paramètres d'acquisition:

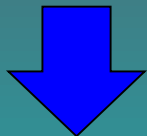
Grandissement: x500

Champ $\sim 160 \times 160 \mu\text{m}^2$

Inclinaisons: -10° & $+10^\circ$

Signal: SE

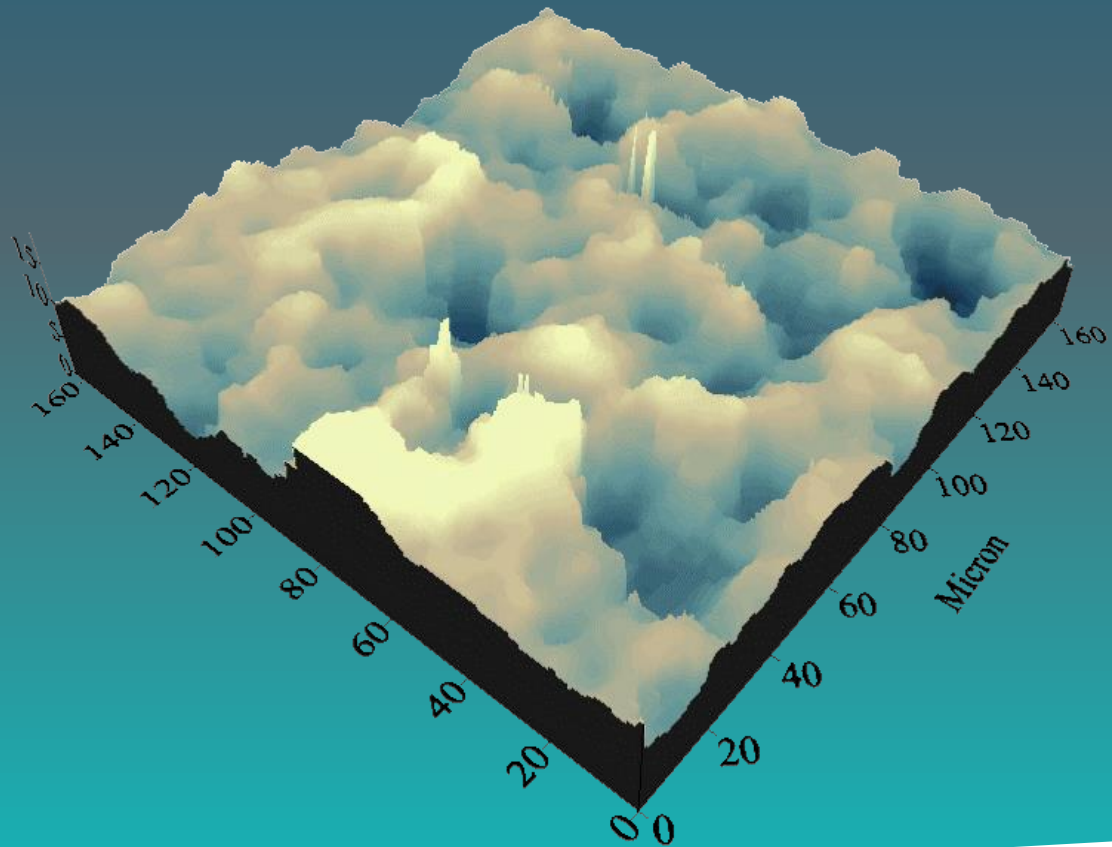
Images 1024×1024 pixels



Résultat:

Résolution $Dz = 0.50 \mu\text{m}$

Dénivelé de l'image $\sim 15 \mu\text{m}$



Exemples d'application

*Caractérisation de la surface d'un faciès de rupture
d'un alliage d'aluminium par propagation de fissure.*

Résolution altimétrique basse associé grand champ

Paramètres d'acquisition

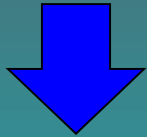
Grandissement: x100

Champ $\sim 800 \times 800 \mu\text{m}^2$

Inclinaisons: -5° & $+5^\circ$

Signal SE

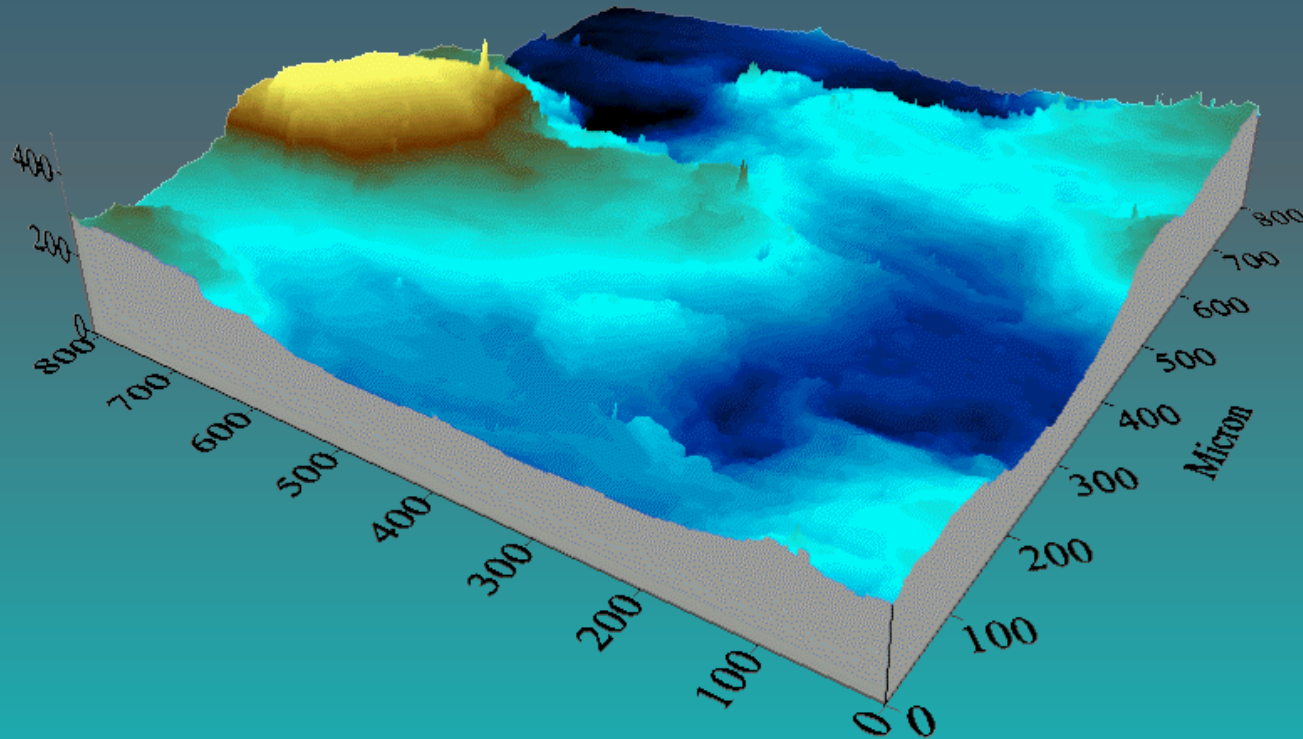
Images 1024×1024 pixels



Résultat:

Résolution $D_z = 5.0 \mu\text{m}$

Dénivelé $\sim 400 \mu\text{m}$



Exemples d'application

*Caractérisation de la déformation de Surface d'une éprouvette polie après essai de fluage.
(Mesure de la déformation hors plan)*

Résolution altimétrique élevée associé champ réduit

Paramètres d'acquisition:

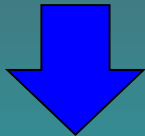
Grandissement: x1000

Champ $\sim 80 \times 80 \mu\text{m}^2$

Inclinaisons: -20° & $+20^\circ$

Signal: InLens

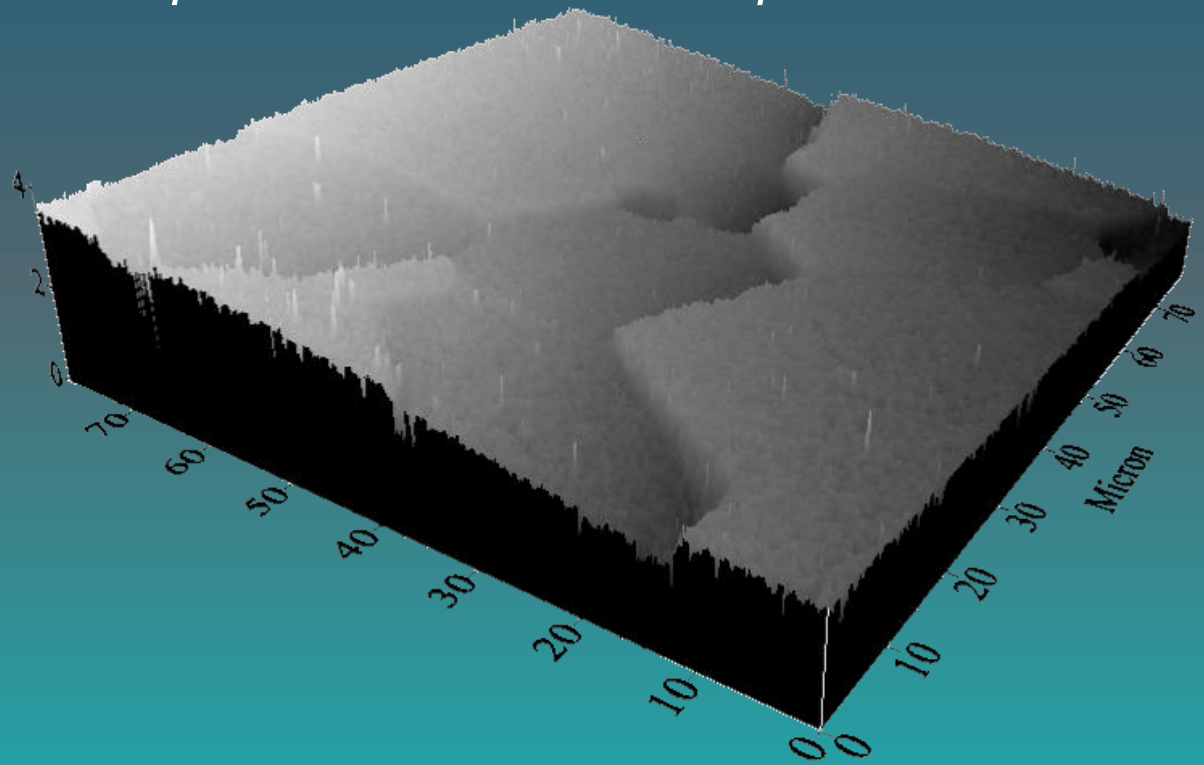
Images 4096x4096 pixels



Résultat:

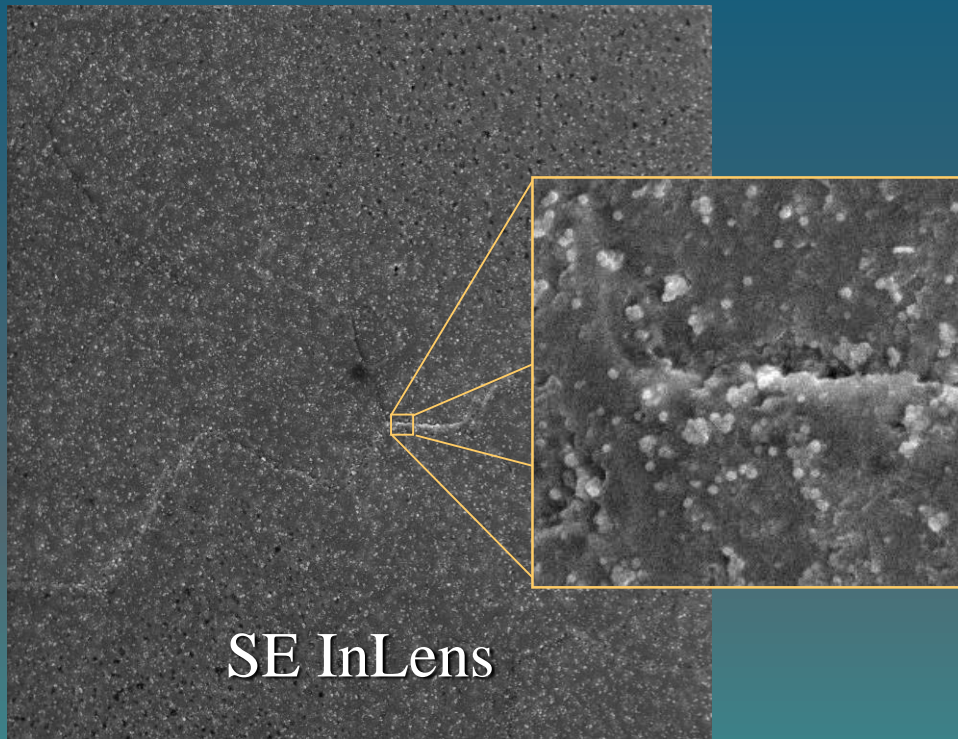
Résolution $\Delta z = 0.032 \mu\text{m}$

Dénivelé de l'image = $\sim 4 \mu\text{m}$



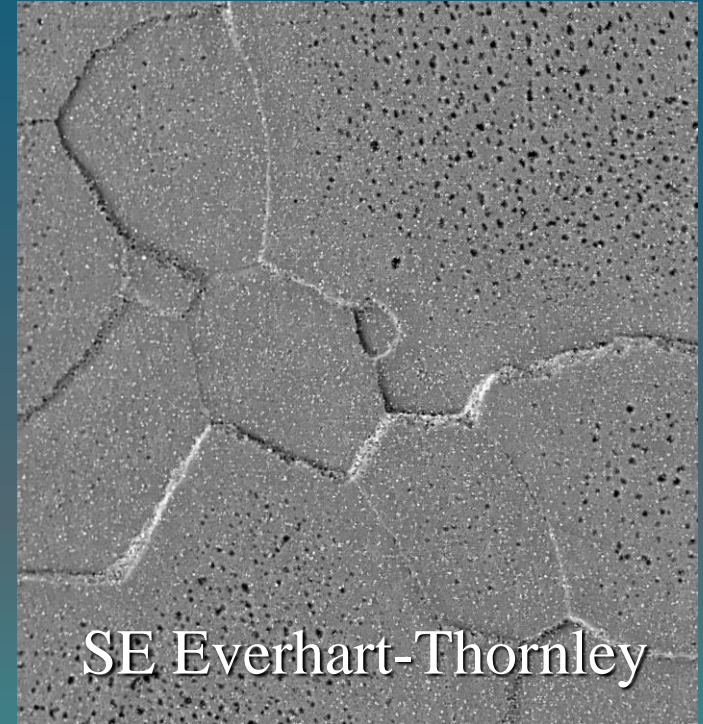
Exemples d'application

Choix du signal d'électrons secondaires



SE InLens

Pratiquement pas
d'information visible !!



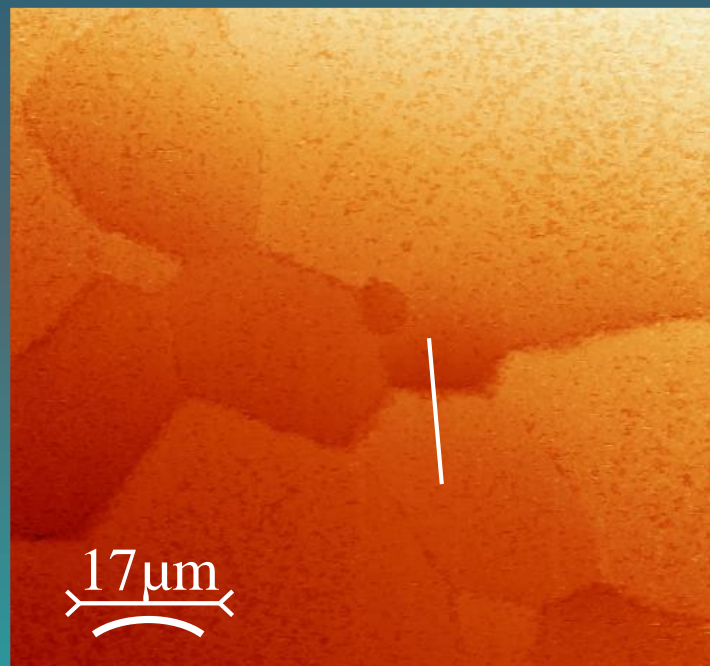
SE Everhart-Thornley

Perception intuitive du relief
par l'observateur

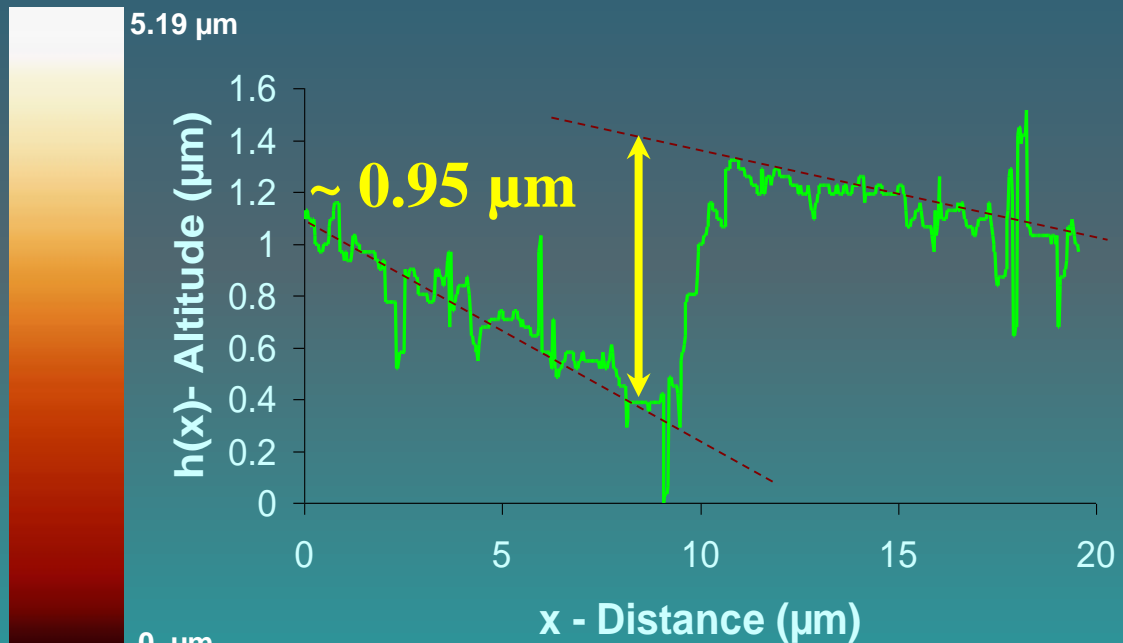
Malgré ce constat, le choix du signal SE-InLens est le plus pertinent pour l'efficacité du processus de corrélation, avec une résolution d'image et une densité de détails meilleures

Exemples d'application

Malgré l'absence de perception du relief on obtient à partir des images InLens une carte d'élévation dont on peut extraire un profil exploitable avec une résolution altimétrique bien inférieure au micron.



*Carte
d'élévation*

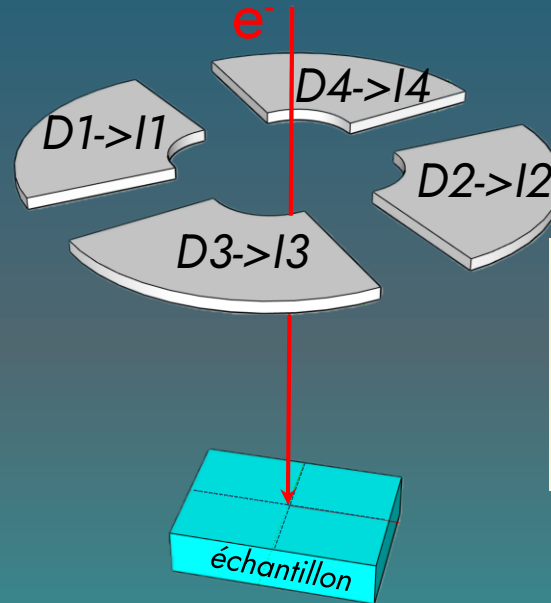
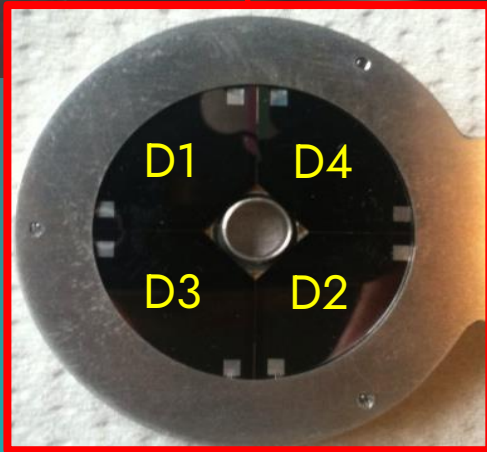


Profil d'élévation

RECONSTRUCTION 3D A PARTIR D'UNE SÉRIE D'IMAGES DE MULTI DÉTECTEURS D'ÉLECTRONS RÉTRODIFFUSÉS

Travaux de Jan Neggers / Centrale Supélec (MATMECA)

• Principe général



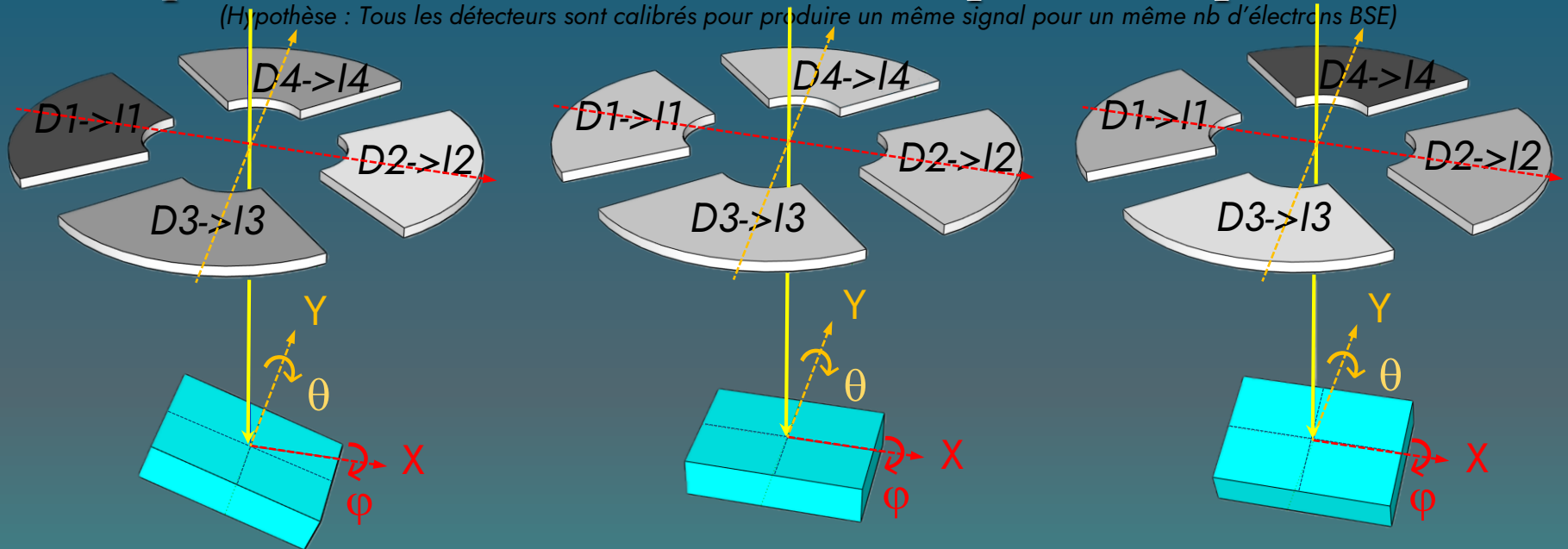
Possibilité
d'acquisition d'une série
de
4 images BSE distinctes
d'un même champ (I1, I2,
I3, I4)

Exploitation logicielle
de cette série d'images multi-détecteurs
BSE pour calculer quantitativement
la topographie de surface
du champ imagé.

Principe de la reconstruction 3D Multi-BSE

Evolution du nombre d'électrons BSE reçus sur chaque détecteur avec la pente de la surface-échantillon au point d'impact du faisceau

(Hypothèse : Tous les détecteurs sont calibrés pour produire un même signal pour un même nb d'électrons BSE)



Inclinaison ech / Axe Y

Nb d'e⁻ BSE différents

→ Niveaux de gris modifiés

$I1 \searrow, I2 \nearrow, (I3=I4) \searrow$

$(I2-I1) > 0 ; (I4-I3) = 0$

Incidence normale

Nb d'e⁻ BSE identiques

→ Niveaux de gris identiques

$I1, I2, I3, I4$ identiques

$(I2-I1) = 0 ; (I4-I3) = 0$

Inclinaison ech / Axe X

Nb d'e⁻ BSE différents

→ Niveaux de gris modifiés

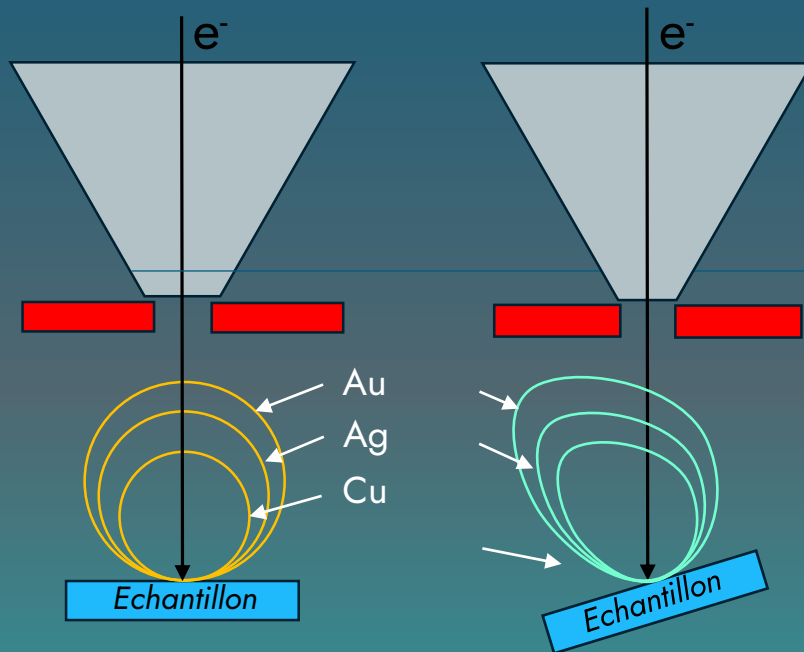
$(I1=I2) \searrow, I3 \nearrow, I4 \searrow$

$(I2-I1) = 0 ; I4-I3 < 0$

Les différences de niveaux de gris entre les images des détecteurs BSE opposés sont fonction des angles d'inclinaison θ et ϕ .

Principe de la reconstruction 3D Multi-BSE

**Distribution angulaire 3D des électrons BSE
décrite analytiquement en fonction de l'angle d'incidence**



Représentation schématique 2D

La distribution angulaire des BSE varie avec la pente locale de la surface de l'échantillon au point d'impact du faisceau d'électrons primaires:

- **Modification en direction**
- **Modification en intensité**
- **Modification en énergie**

**Description 3D de cette distribution
connue et décrite analytiquement par différents auteurs**

Principe de la reconstruction 3D Multi-BSE

Calcul de l'intensité BSE du signal BSE reçu par un détecteur BSE de position spatiale et de géométrie données

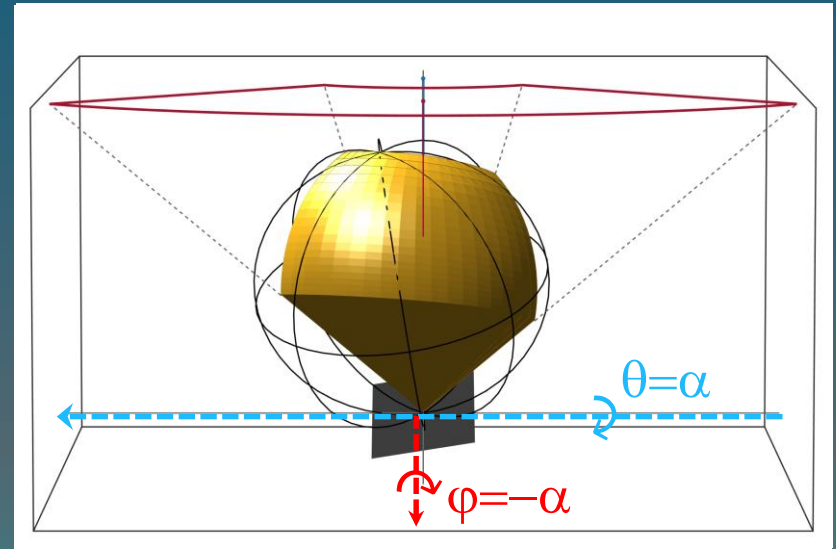
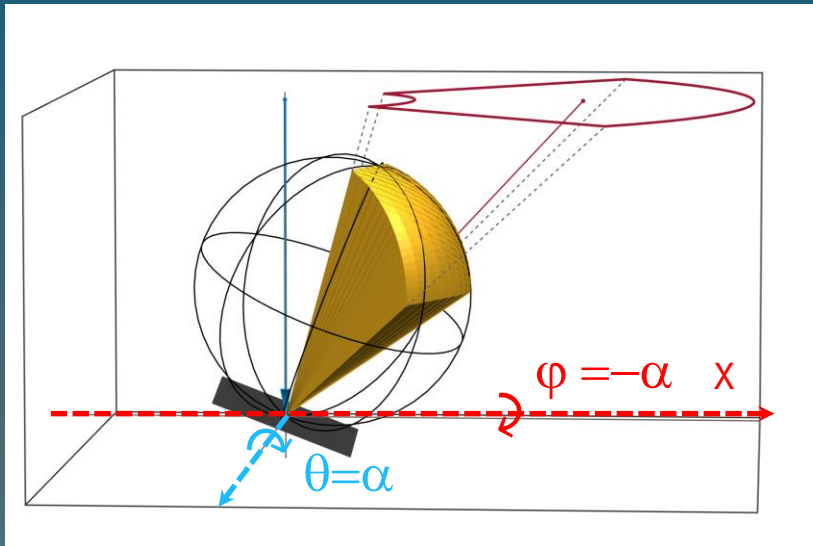
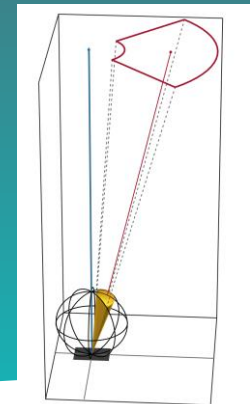
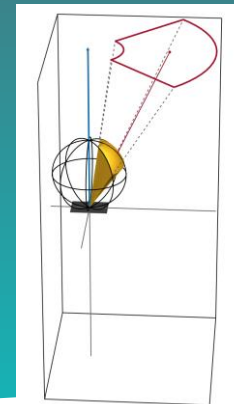
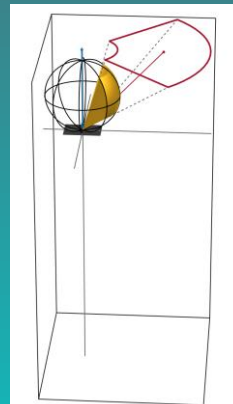


Illustration de la prise en compte des angles θ et φ dans le calcul

Illustration de la prise en compte de WD dans le calcul



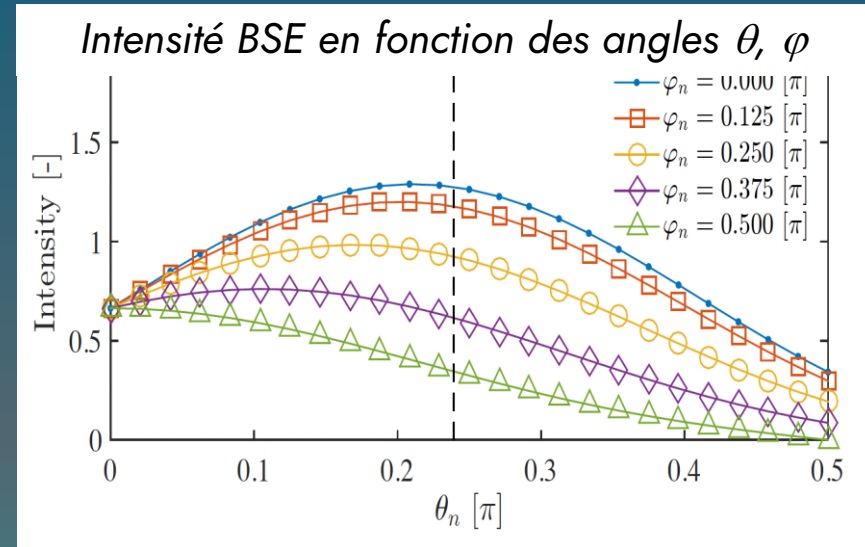
Principe de la reconstruction 3D Multi-BSE

Processus de détermination des angles θ et φ qui définissent l'orientation de la surface

Calcul pour chaque détecteur du signal BSE en intensité (ua) en fonction

:

- Des angles θ , φ au point d'impact des e⁻
- de sa géométrie
- de sa position spatiale:
 - relativement au point d'émission (WD)
 - Relativement aux axes de balayage de l'image MEB (X, Y)



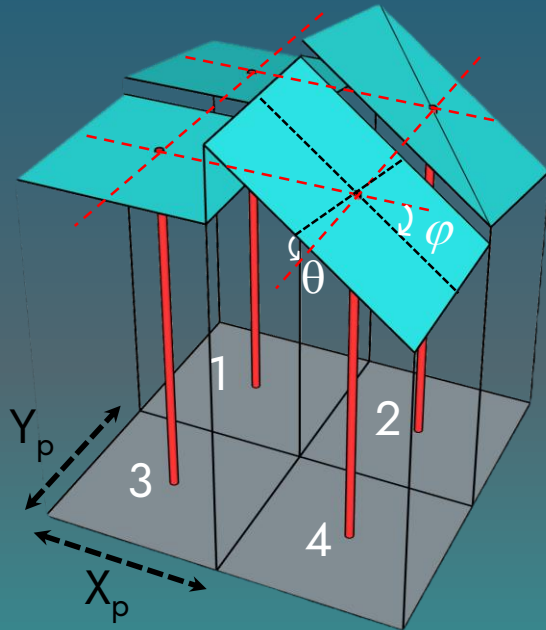
Détermination des angles θ , φ

par minimisation des écarts entre les données expérimentales et les valeurs calculées des différences d'intensité entre détecteurs opposés

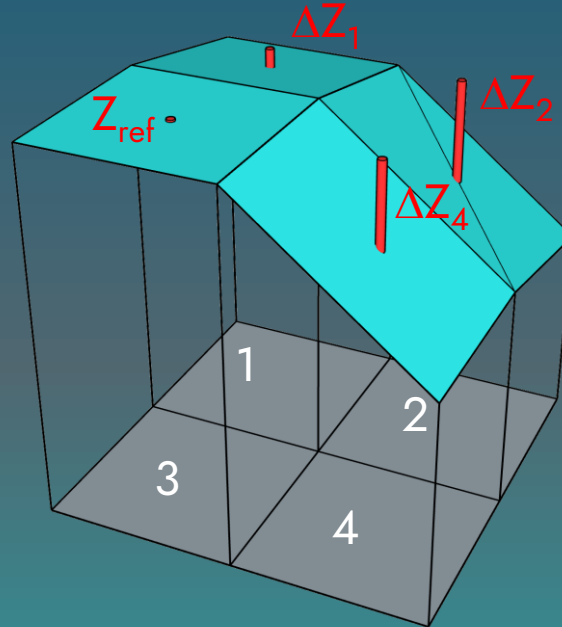
Principe de la reconstruction 3D Multi-BSE

Processus de construction de l'image topographique 3D

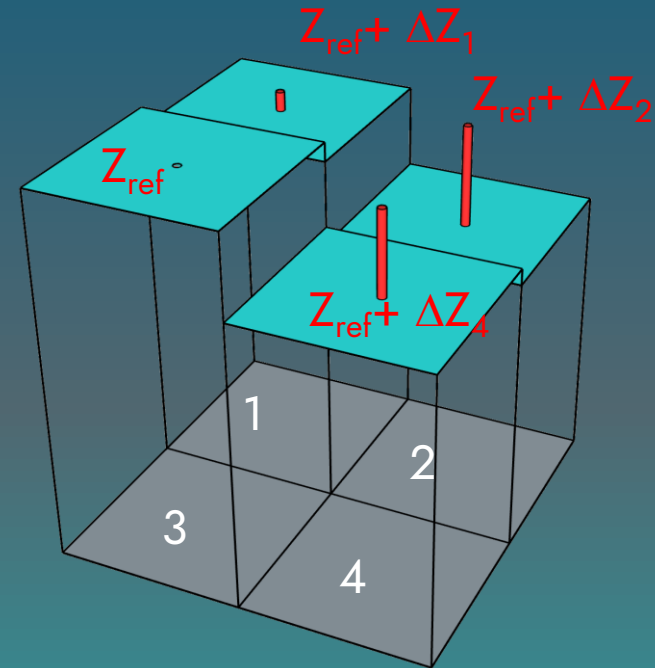
(exemple image 2 x 2 pixels)



détermination en
chaque pixel
des angles θ et φ



Continuité de la surface \rightarrow
Calcul de l'élévation relative
 ΔZ_p de chaque pixel,
fonction de ΔX , θ , φ



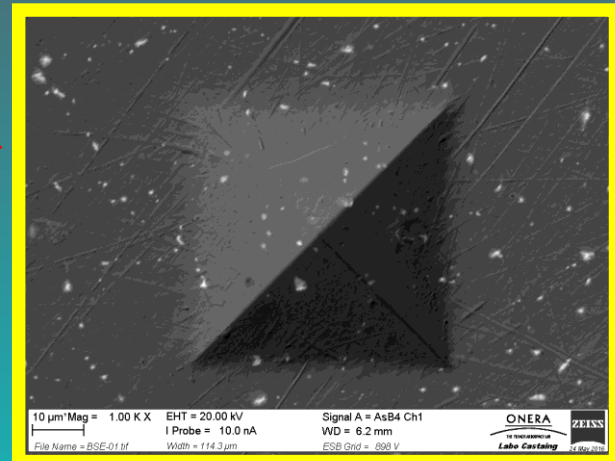
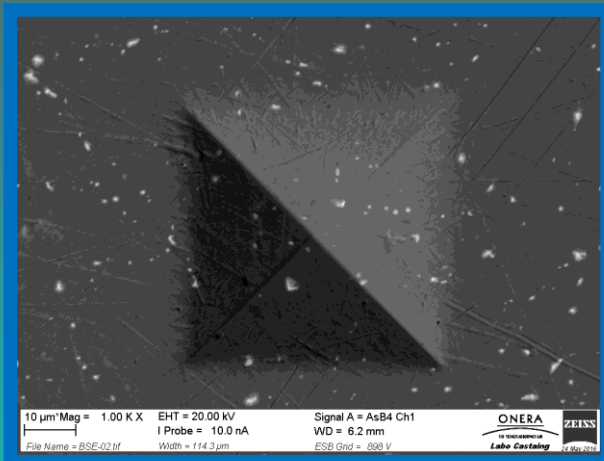
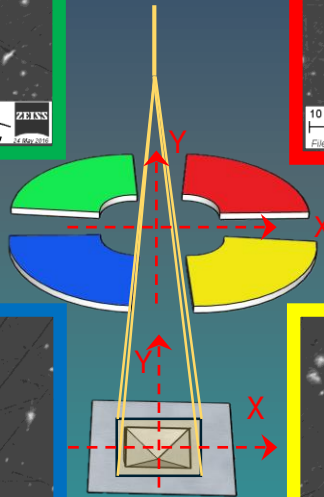
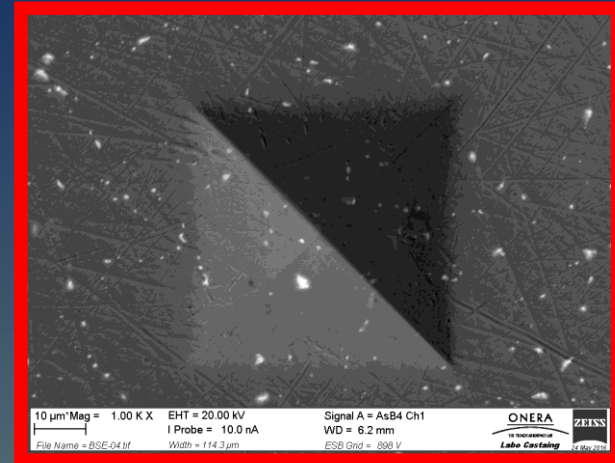
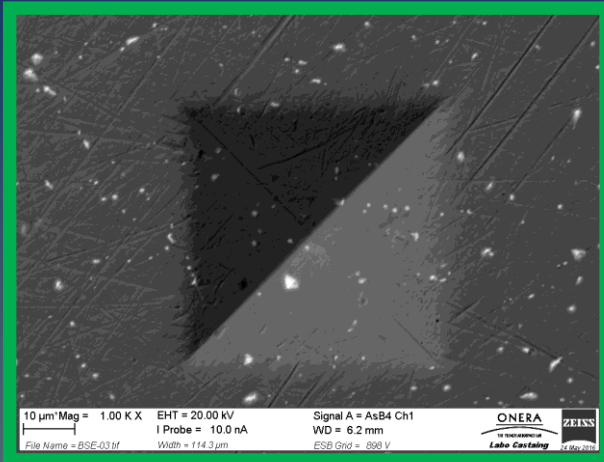
Construction de l'image
topographique 3D

Une reconstruction quantitative valide de la topographie de la surface requiert :

- Calibration de la réponse de chacun des N détecteurs
(faire en sorte dans des conditions d'incidence normale d'obtenir des images relatives aux N détecteurs identiques en niveaux de gris)
- Acquisition simultanée des N images
(si fonctionnalité absente → Nécessité de recalibrer les N images par corrélation)
- Calibration de la géométrie de détection des N détecteurs BSE
(procédure spécifique à chaque logiciel)
- Optimisation de la résolution spatiale des images BSE à fort grossissements
(choix haute tension et courant de sonde)
- Disposer d'un minimum de 2 détecteurs

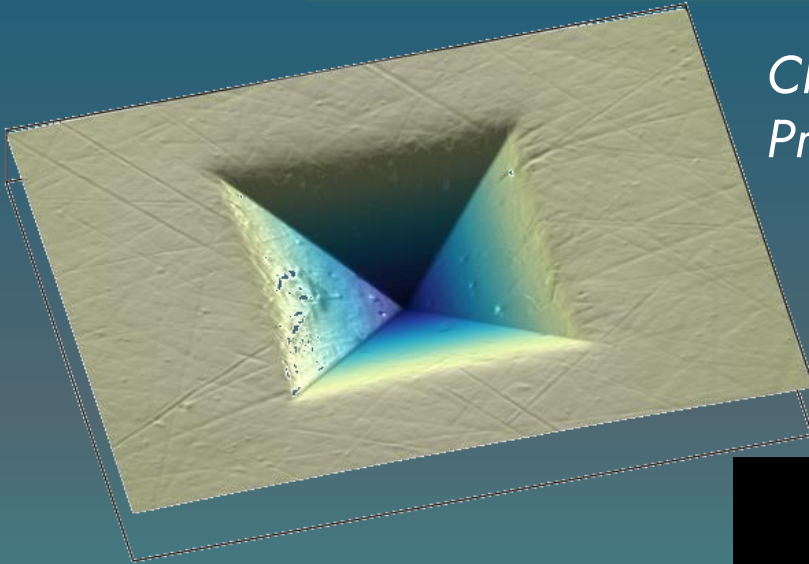
Exemples d'application

Caractérisation de la topographie d'une empreinte de microdureté



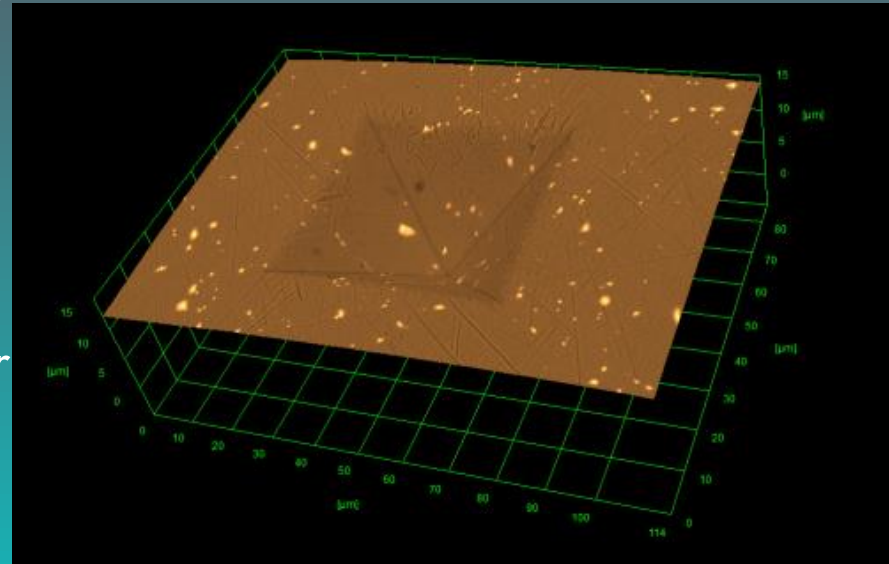
Exemples d'application

Caractérisation de la topographie d'une empreinte de microdureté



*Champ de 90x90 μm^2
Profondeur = 14 μm*

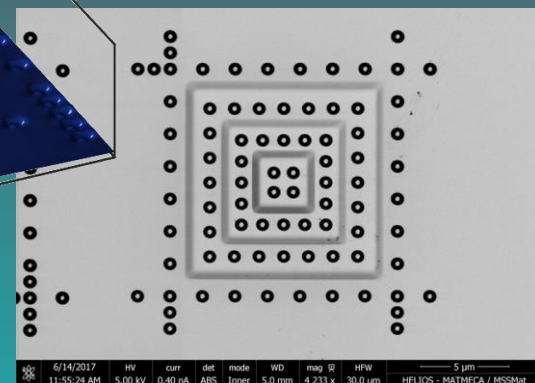
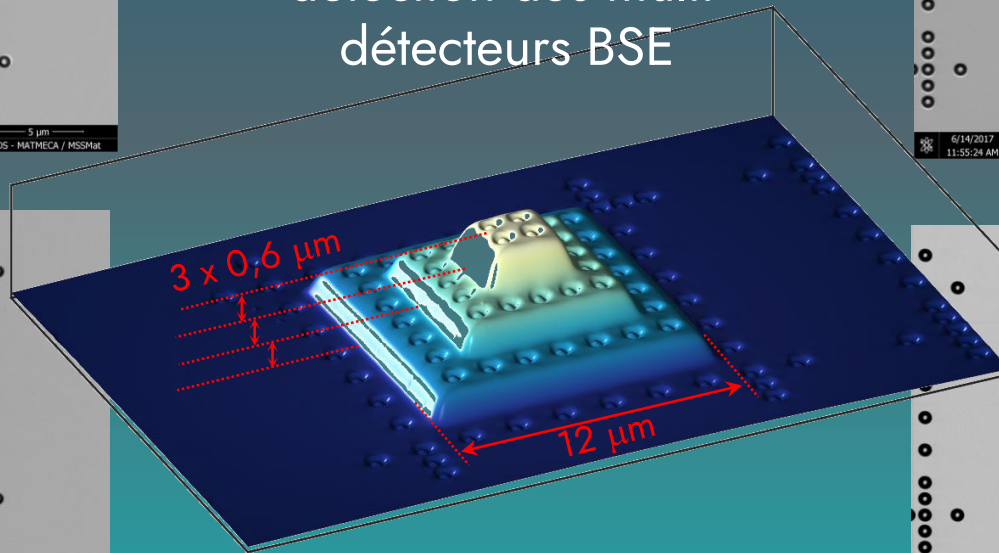
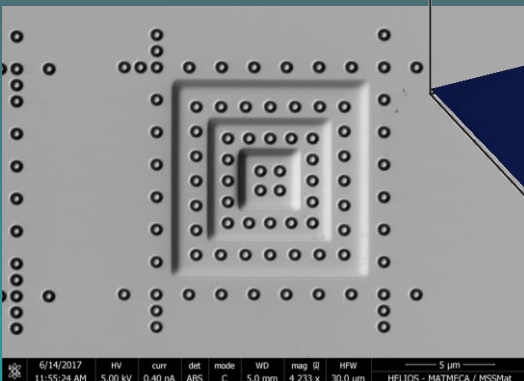
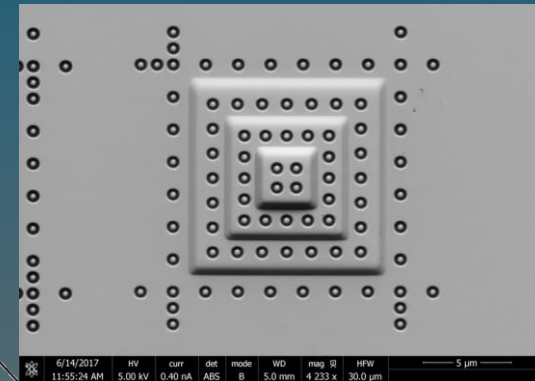
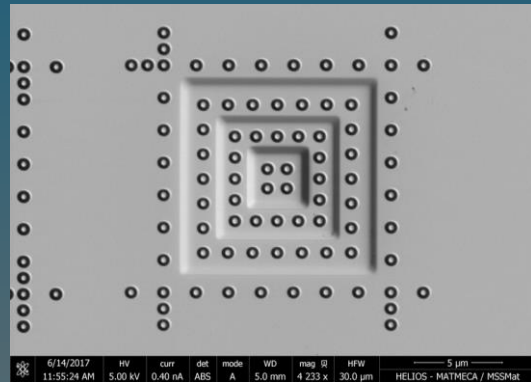
*Possibilité de conserver
et afficher le contraste
chimique*



Exemples d'application

Caractérisation de la topographie d'un échantillon test 3D

Echantillon de calibration
de la géométrie de
détection des multi-
détecteurs BSE



Comparaison des techniques de caractérisation 3D

Comparaison entre techniques 3D MEB

	Stéréoscopie MEB	Multi-Détecteurs BSE MEB
+	<ul style="list-style-type: none"> Mise en œuvre possible dans tous les MEBs 	<ul style="list-style-type: none"> Mise en œuvre aisée et rapide si acquisition simultanées des N images
-	<ul style="list-style-type: none"> Nécessité d'une texture dans les images Mise en œuvre selon un protocole expérimental rigoureux et plutôt long 	<ul style="list-style-type: none"> Nécessité de disposer d'au moins deux détecteurs (multi-quadrants ou autres) Nécessité d'une calibration rigoureuse pour la validité des données quantitatives d'élévation
Point communs	<ul style="list-style-type: none"> Nécessité d'un logiciel spécifique de reconstruction 3D Résolution 2D et 3D similaires 	

Comparaison avec autres techniques

	XY Résolution	Z résolution	XY Champ	Z Gamme
SEM 3D	10 nm	20 nm	1 mm	1 mm
Optical	600 nm	5 nm	5 mm	5 mm
SPM	0.1 nm	0.1 nm	100 µm	30 µm

Merci de votre attention