

Reconstruction de surface en 3D à partir d'images de MEB

Eva Héripéré, IR CNRS

Laboratoire PIMM

ENSAM, CNAM, CNRS, HESAM, Paris.

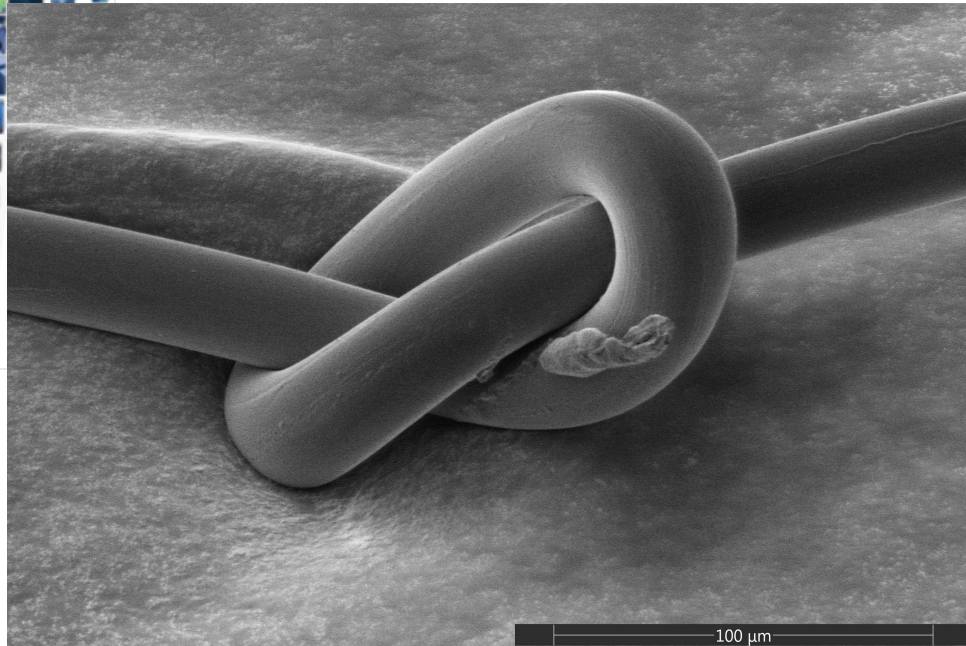
Jan Neggers et Louis Cornet, LMPS et Denis Boivin, ONERA

S. Hallais et A. Tanguy (LMS), F. Gaslain (CdM),
M. Bonnet et S. Roux (LMPS), E. Rouesne (CEA)

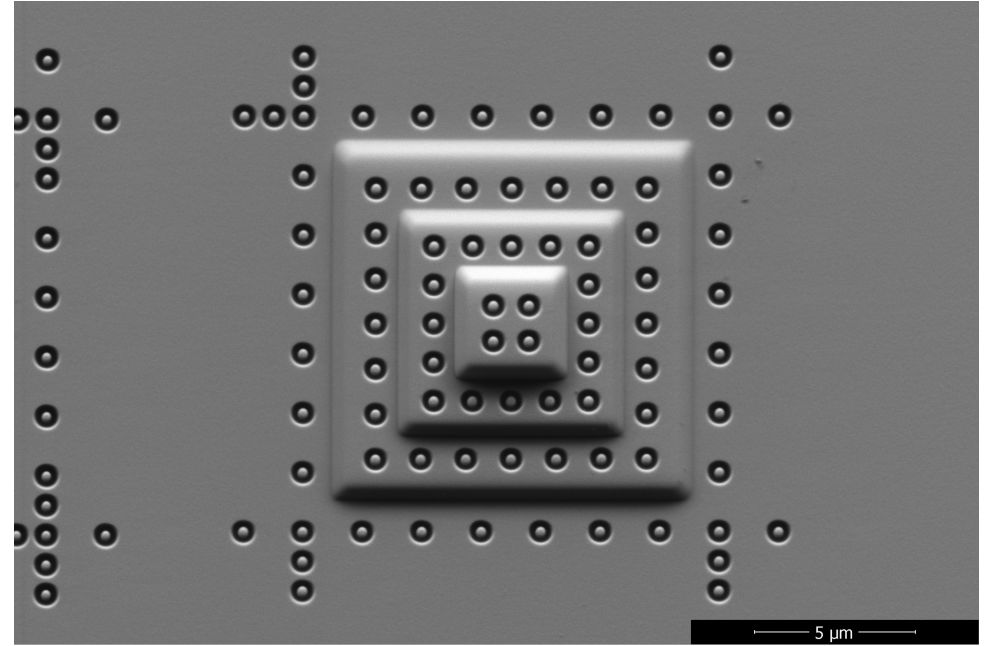
EquipEx MATMECA – GT 3D

GN-MEBA, Paris, le 2/12/2022

Une vision 3D sur les images MEB

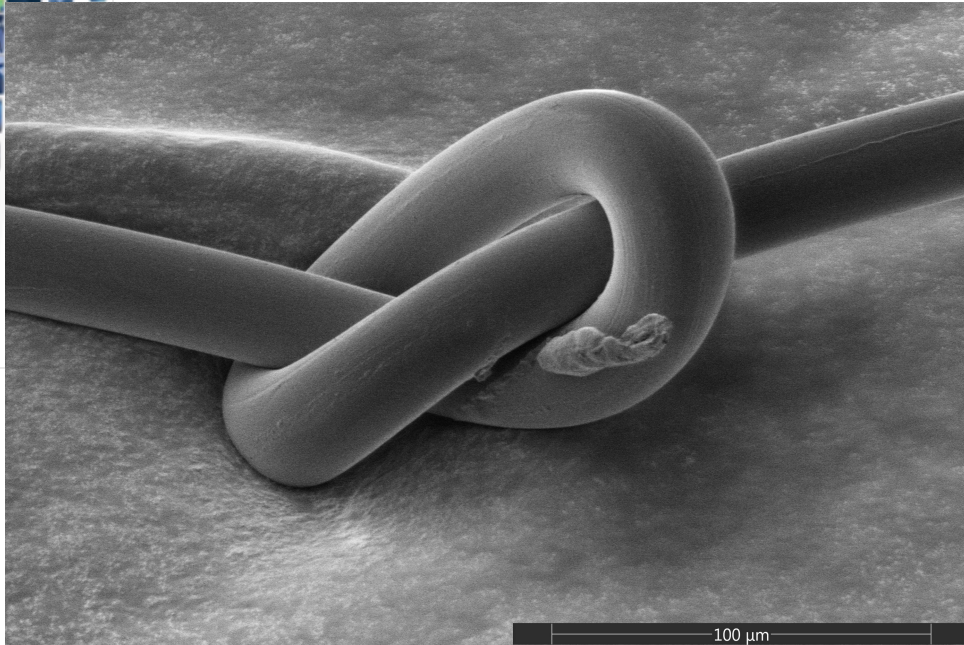


SE – 500V – 25pA (integ. 32 frames)

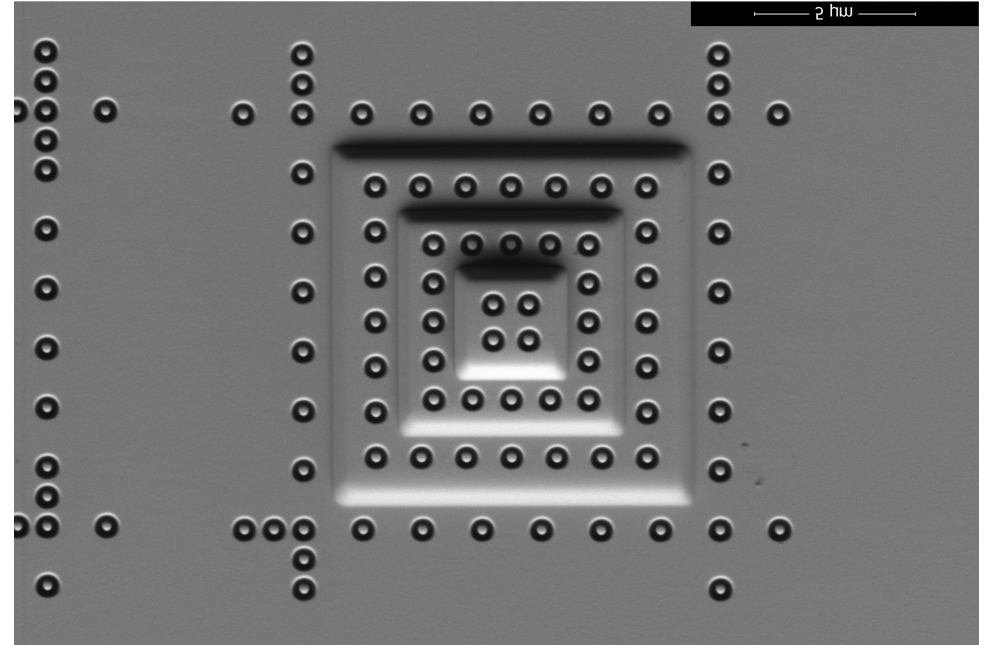


BSE – secteur B – 5kV – 0,4nA

Une vision 3D sur les images MEB



SE – 500V – 25pA (integ. 32 frames)



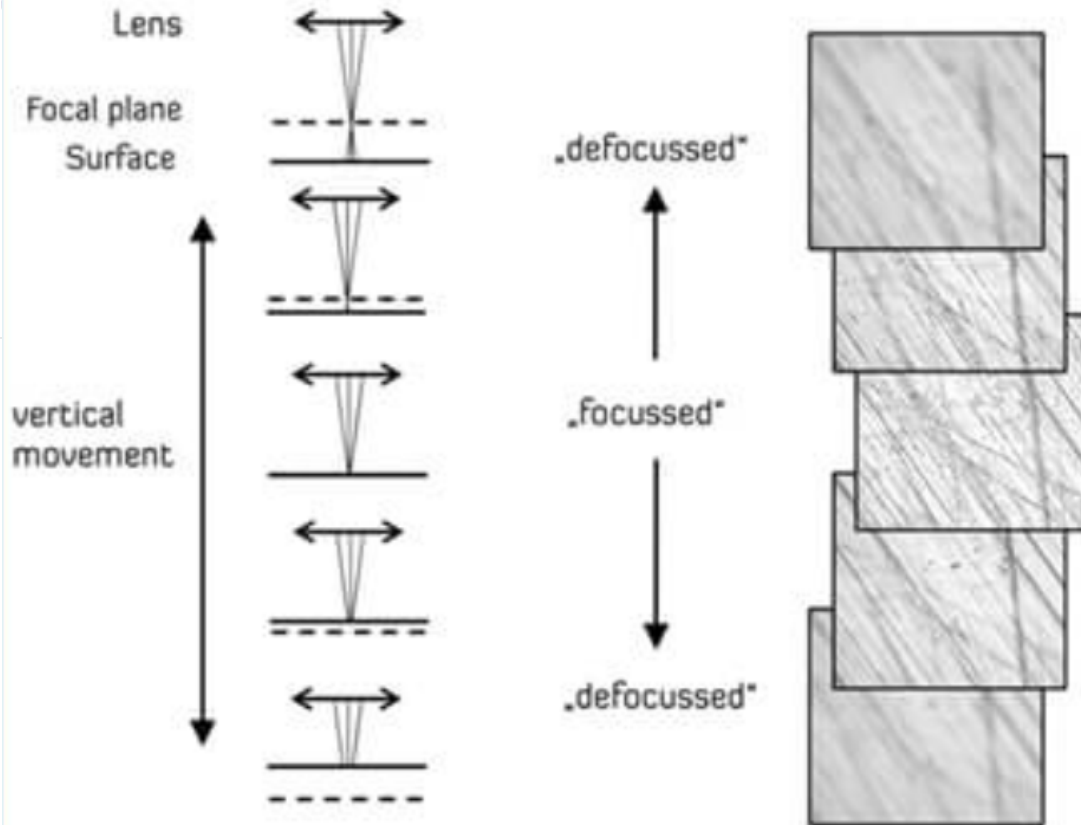
BSE – secteur B – 5kV – 0,4nA

Reconstruction de surface 3D en MEB

- Les différentes méthodes existantes
- L'effet des paramètres MEB ?
- Les avantages et inconvénients des différentes méthodes
- Les outils qui existent (liste non exhaustive)

Les différentes méthodes

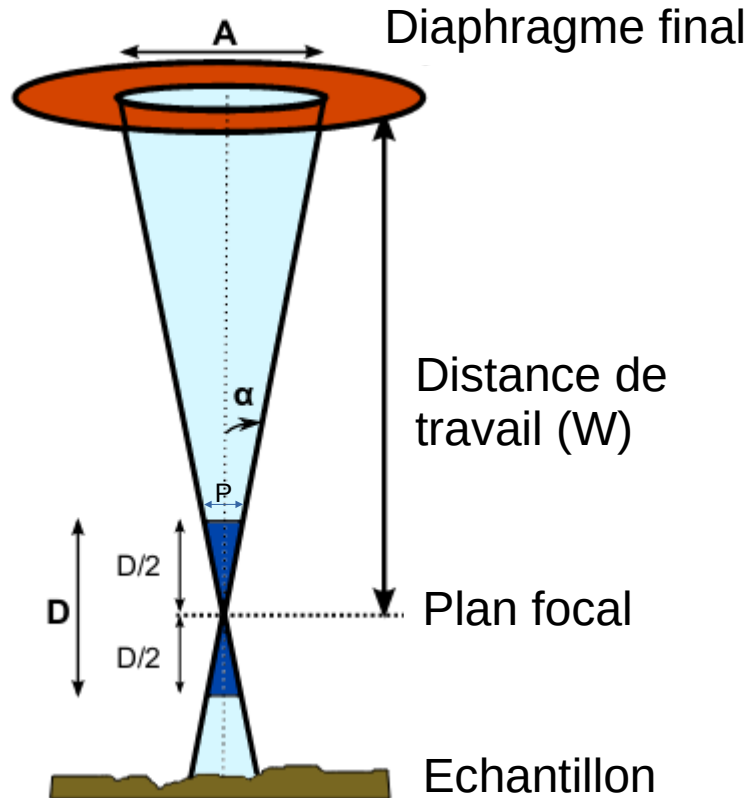
Méthode par **variation focale** ?



MEB = Grande profondeur de champ

Quelle précision ?

Réduire la profondeur de champ ?



$$D = \frac{2 PW}{A} \text{ (}\mu\text{m)}$$

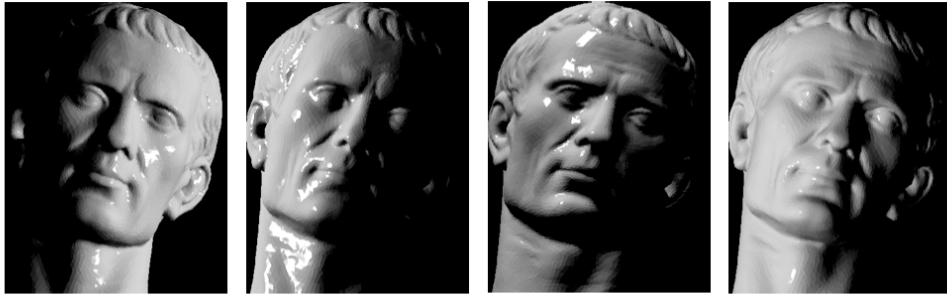
- Augmenter A
- Diminuer WD
- Diminuer la taille de pixel en augmentant le grandissement

Résolution mini en Z de l'ordre de 10 μ m
[Dembélé, 2015]

Les différentes méthodes

Single view

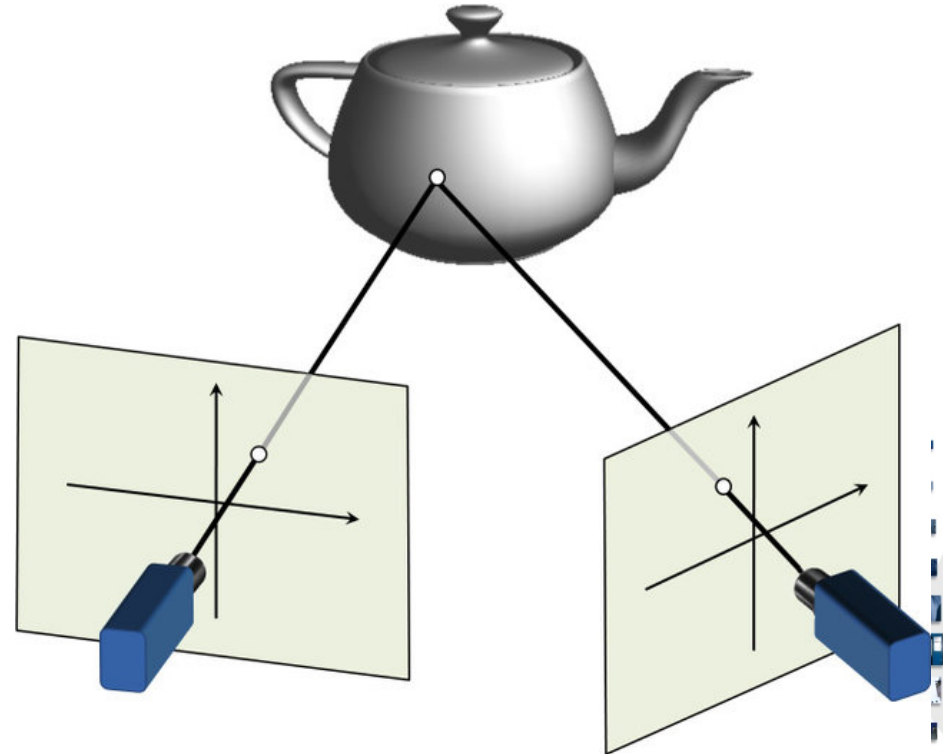
1 caméra, différentes direction d'éclairage



Photometric stereo, Wikipedia

Multi-view

2 caméras, 1 direction d'éclairage

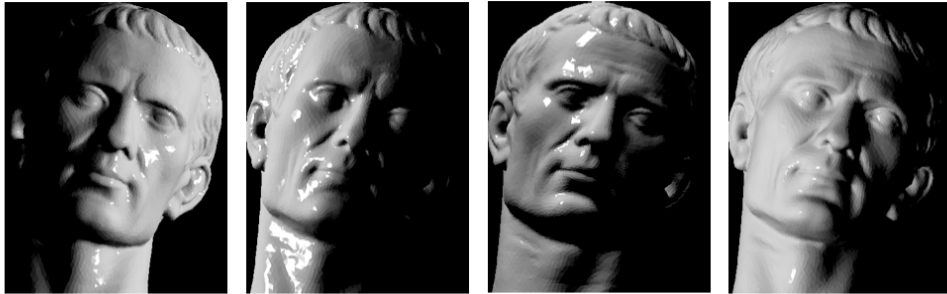


3D Reconstruction from Multiple Images: Part 1 - Principles.
Moons et al. 2009

Les différentes méthodes

Single view

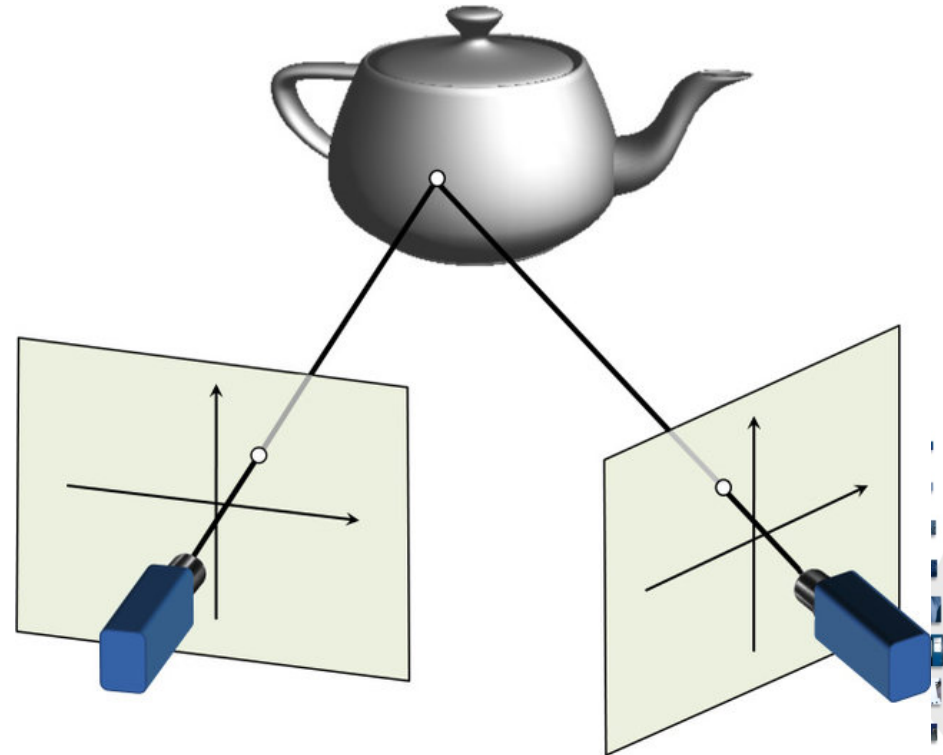
1 caméra, différentes direction d'éclairage



Photometric stereo, Wikipedia

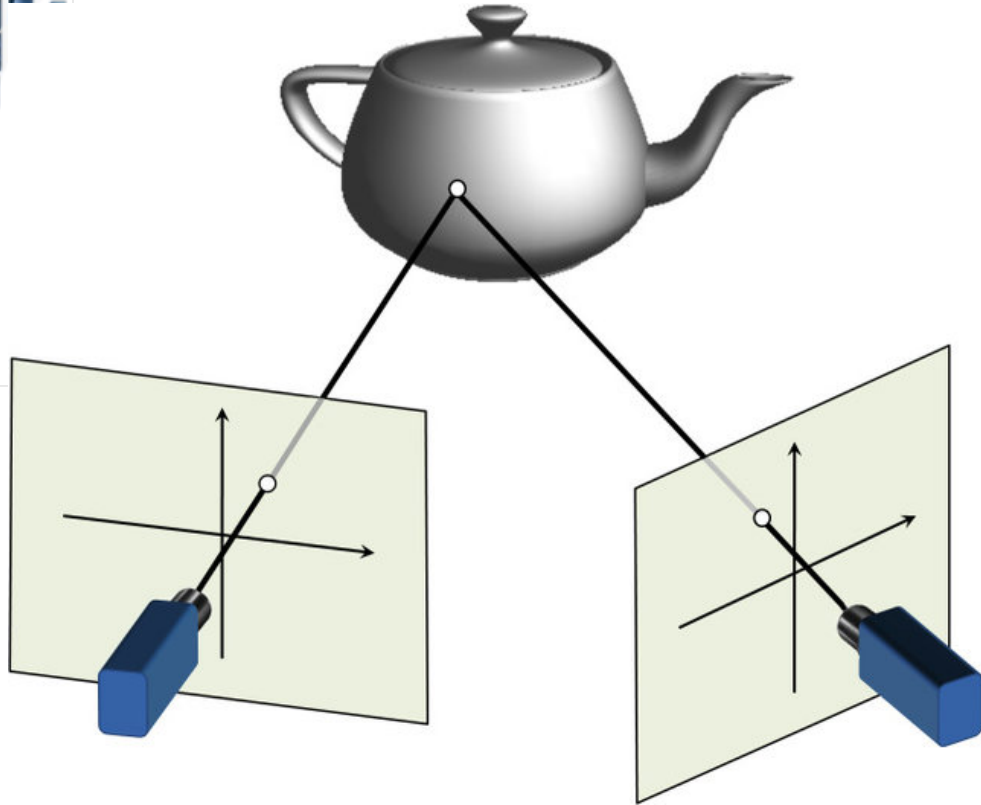
Multi-view

2 caméras, 1 direction d'éclairage

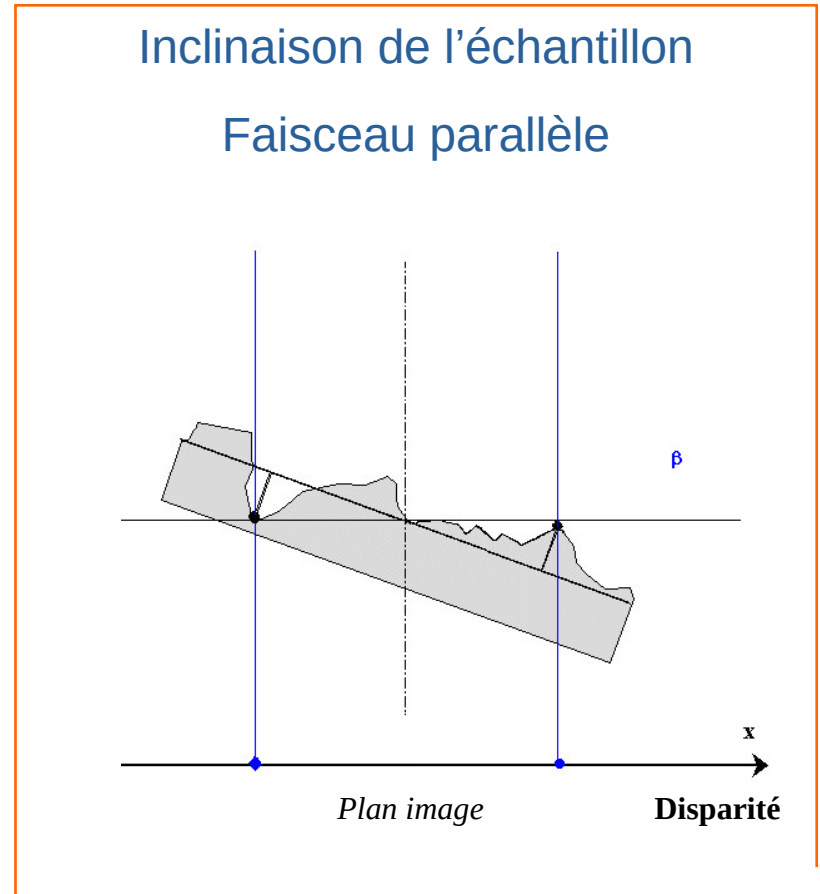


3D Reconstruction from Multiple Images: Part 1 - Principles.
Moons et al. 2009

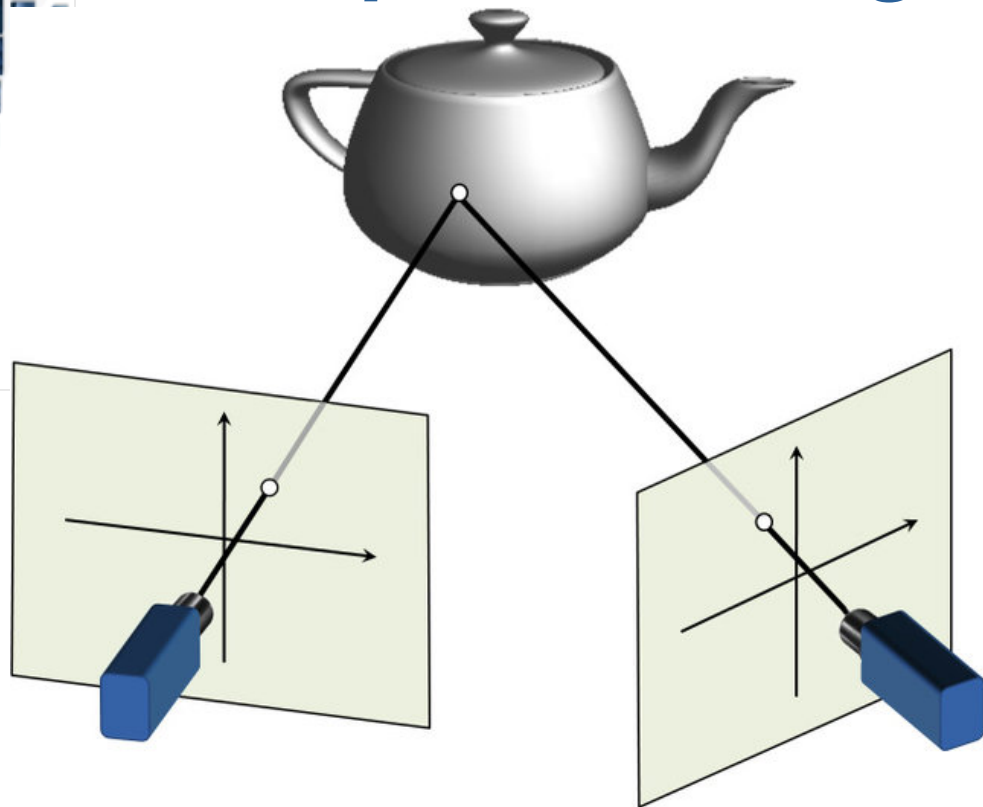
Single view : reconstruction à partir d'une paire d'images stéréoscopiques



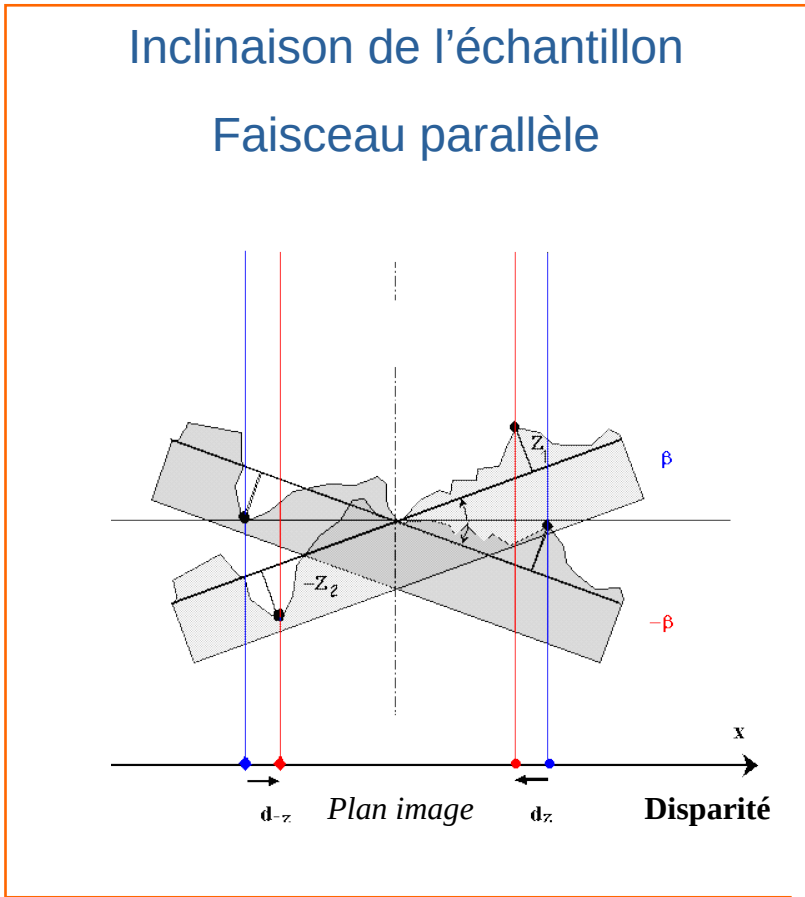
3D Reconstruction from Multiple Images: Part 1 - Principles.
Moons et al. 2009



Single view : reconstruction à partir d'une paire d'images stéréoscopiques



3D Reconstruction from Multiple Images: Part 1 - Principles.
Moons et al. 2009



Stéréo 3D : Aspect expérimentaux

Optimisation des paramètres d'acquisition
(Courant, Contraste, WD, Brilliance, Intégration)

Choix du grandissement

Choix du signal d'électrons

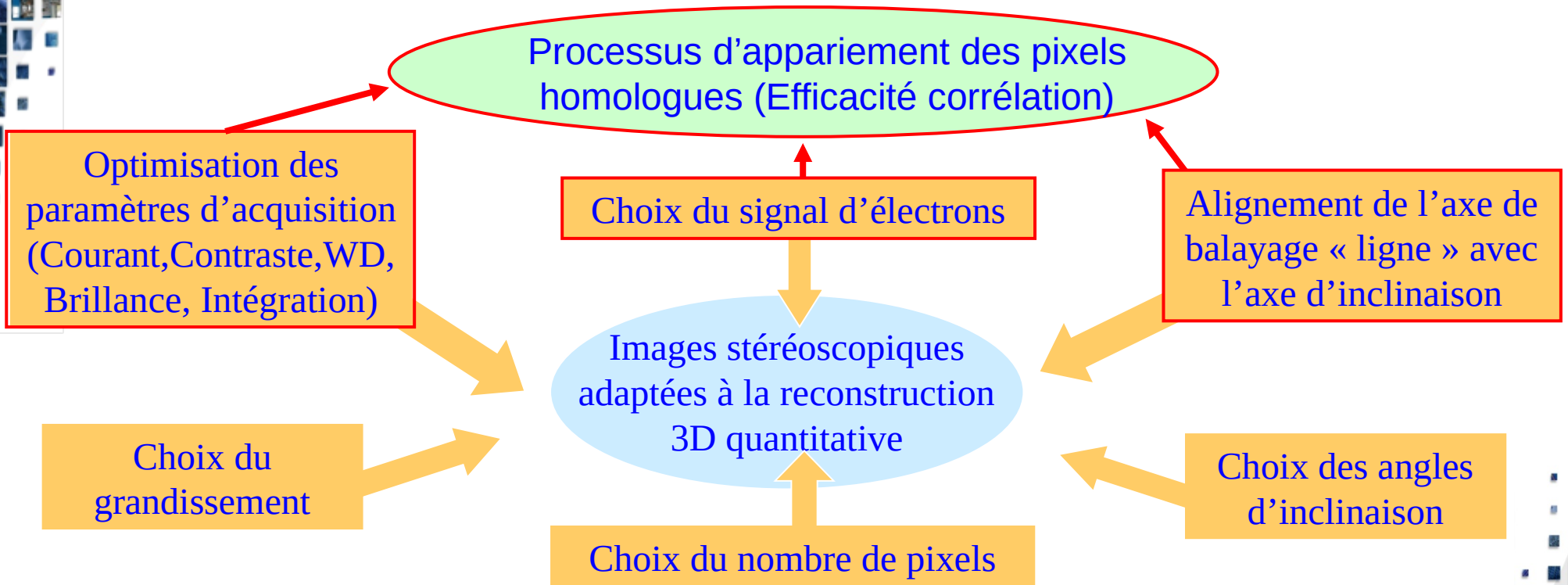
Images stéréoscopiques
adaptées à la reconstruction
3D quantitative

Choix du nombre de pixels

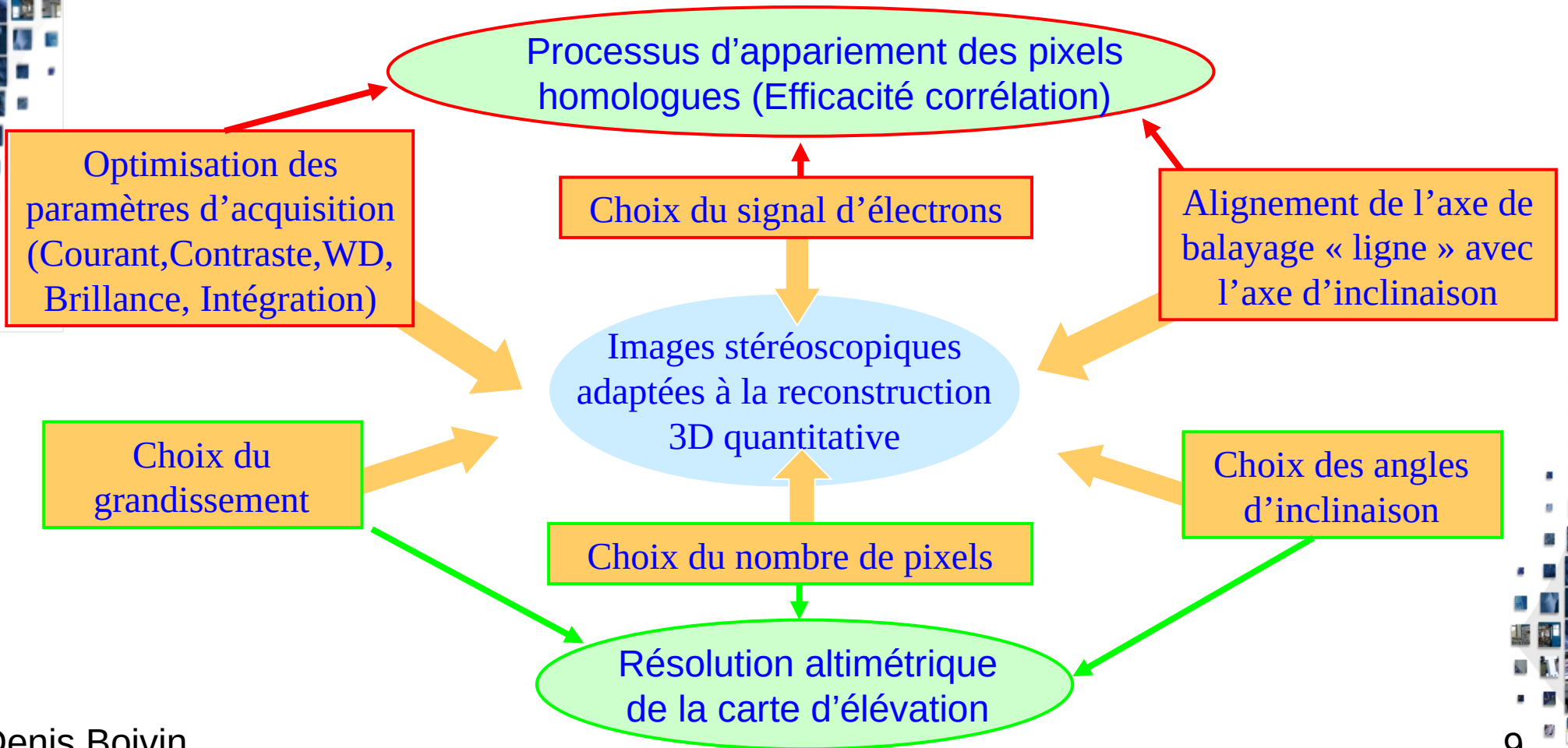
Alignement de l'axe de balayage « ligne » avec l'axe d'inclinaison

Choix des angles d'inclinaison

Stéréo 3D : Aspect expérimentaux



Stéréo 3D : Aspect expérimentaux



Stéréo 3D : choix des paramètres MEB ?

La résolution altimétrique dépend du grandissement, de la déviation angulaire et du nombre de pixels des images.

$$\text{Paire stéréo (tilt } \pm \beta) \rightarrow \Delta z \sim d / 2\sin\beta \quad (d = \text{disparité})$$

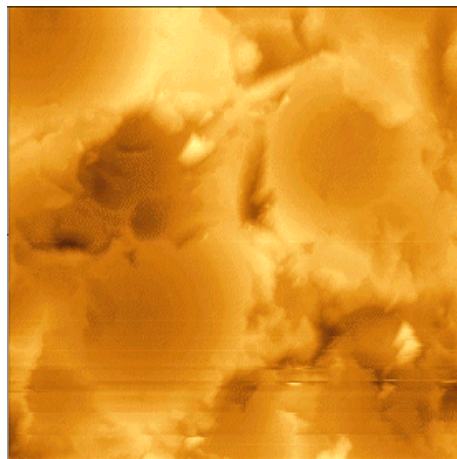
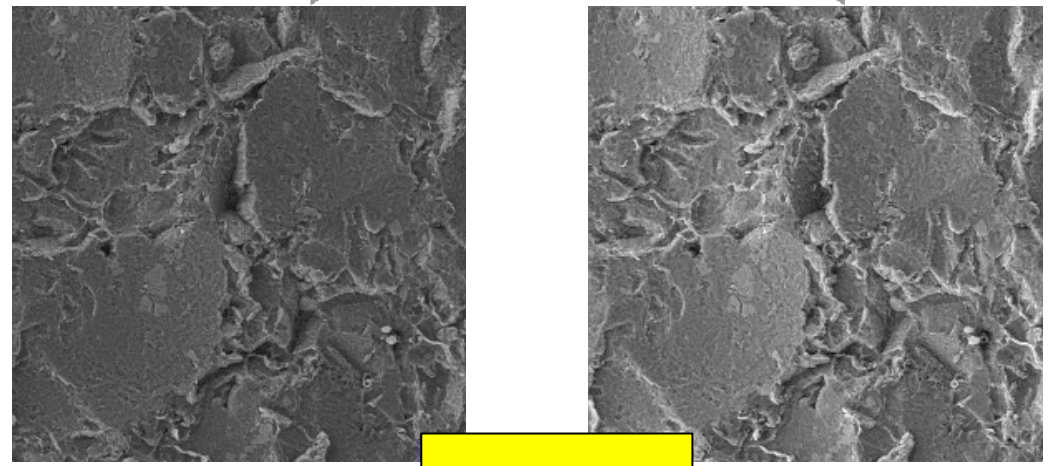
Angle de tilt	Taille du champ balayé	Nb de pixels / taille du pixel	Résolution approx. Z (d à 1 pixel près)
$\pm 5^\circ$	100 μm	512 x 512 (~ 0,2 μm)	~ 1.2 μm
$\pm 10^\circ$	100 μm	1024 x 1024 (~ 0,1 μm)	~ 0.3 μm
$\pm 20^\circ$	20 μm	1024 x 1024 (~ 0,02 μm)	~ 0.03 μm

Stéréo 3D : Exemple de reconstruction

Comparaison avec AFM

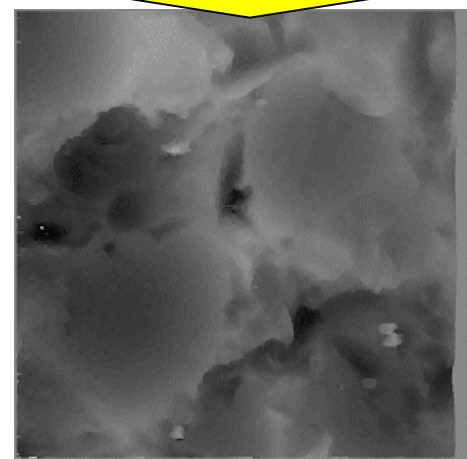
Taille champs ~100 μm
Elevation max ~ 14 μm

- 10° SEM (SE) + 10°



AFM

Carte d'élevation

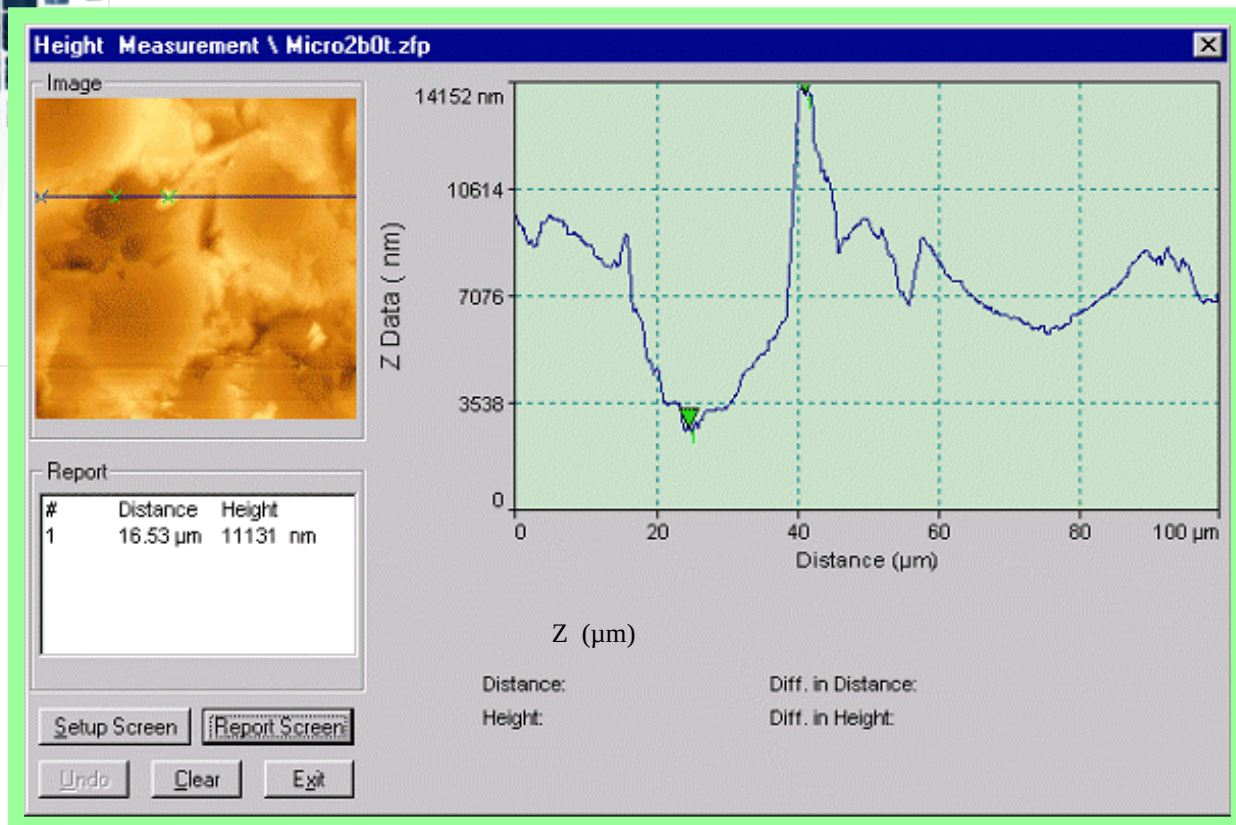


SEM3D

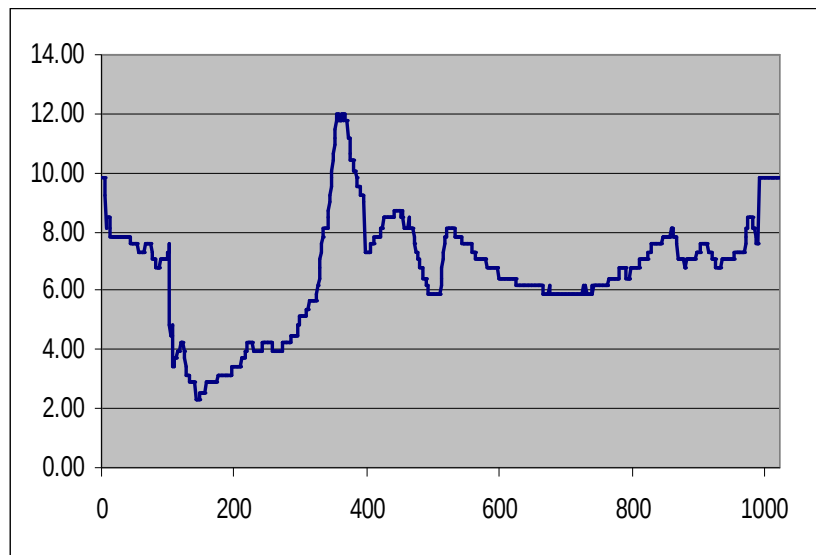
de Denis Boivin

Stéréo 3D : Exemple de reconstruction

Comparaison des profils d'élévation



AFM

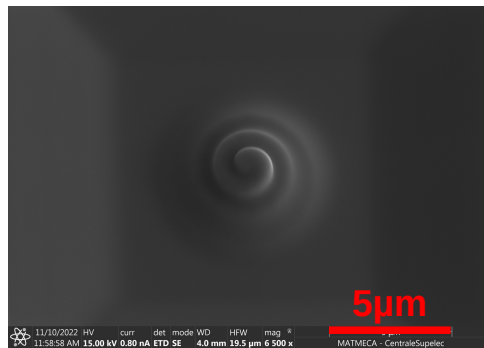
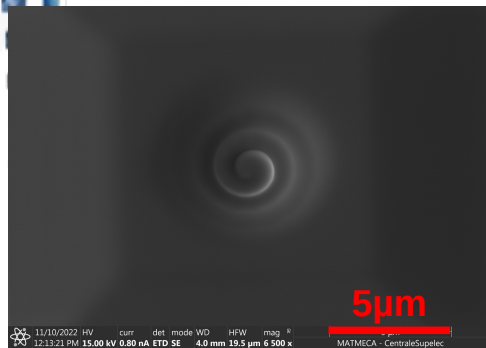


SEM Stéréo 3D

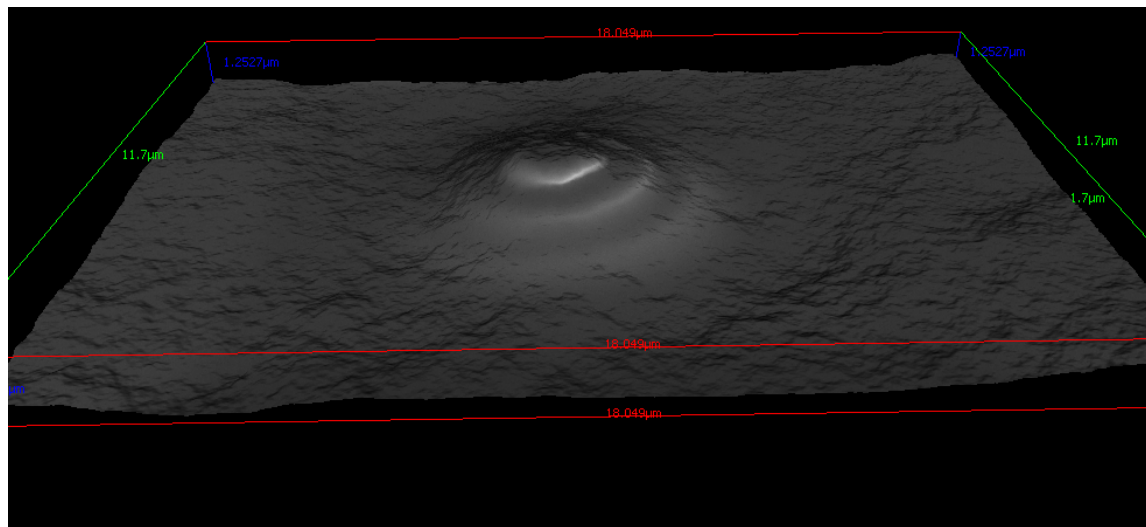
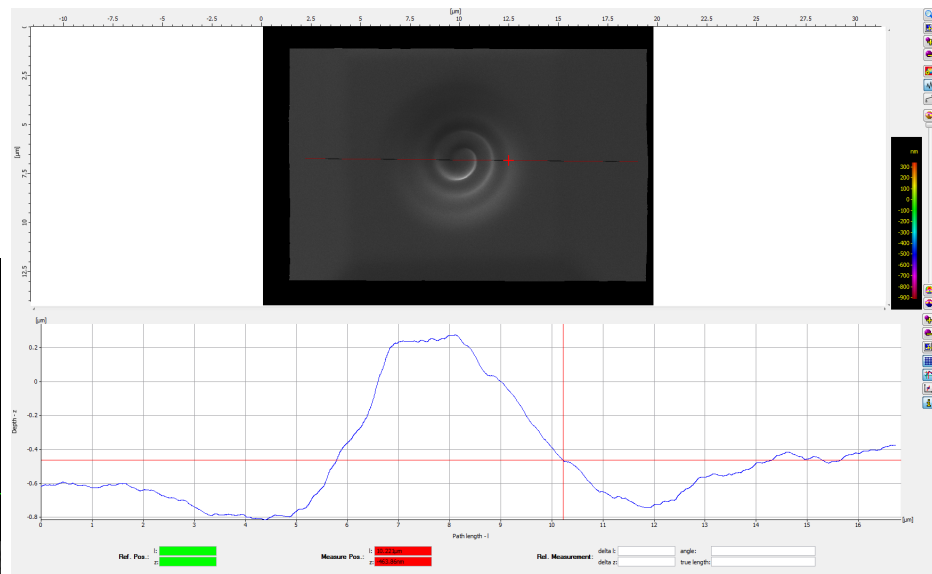
Stéréo 3D : Exemple de reconstruction

- 20°

+ 20°



Images SE,
15kV, 0,8nA, WD 4mm,
T ± 20 deg



L. Cornet,
logiciel MEX

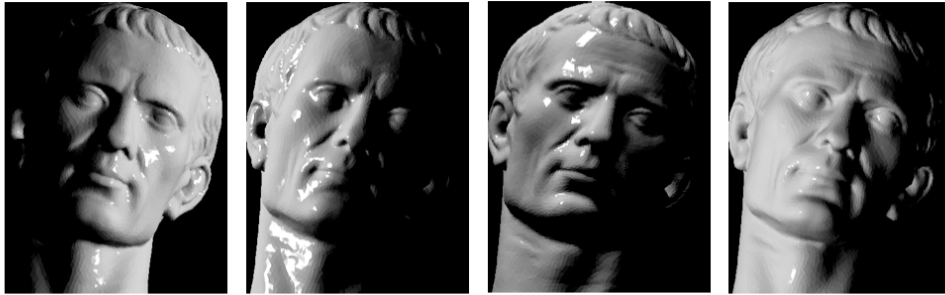
Stéréo 3D : choix des paramètres MEB ?

- Angle de tilt important et dépendant de la surface à analyser → Pour surface rugueuse, plutôt utiliser un faible angle de tilt (4-10°)
- Contraste et brillance importants → Attention à la perte d'information si trop contrasté
- Calibration de la taille de l'image
- Défaut d'imagerie
- Nature de l'échantillon (→ drift)

Les différentes méthodes

Single view

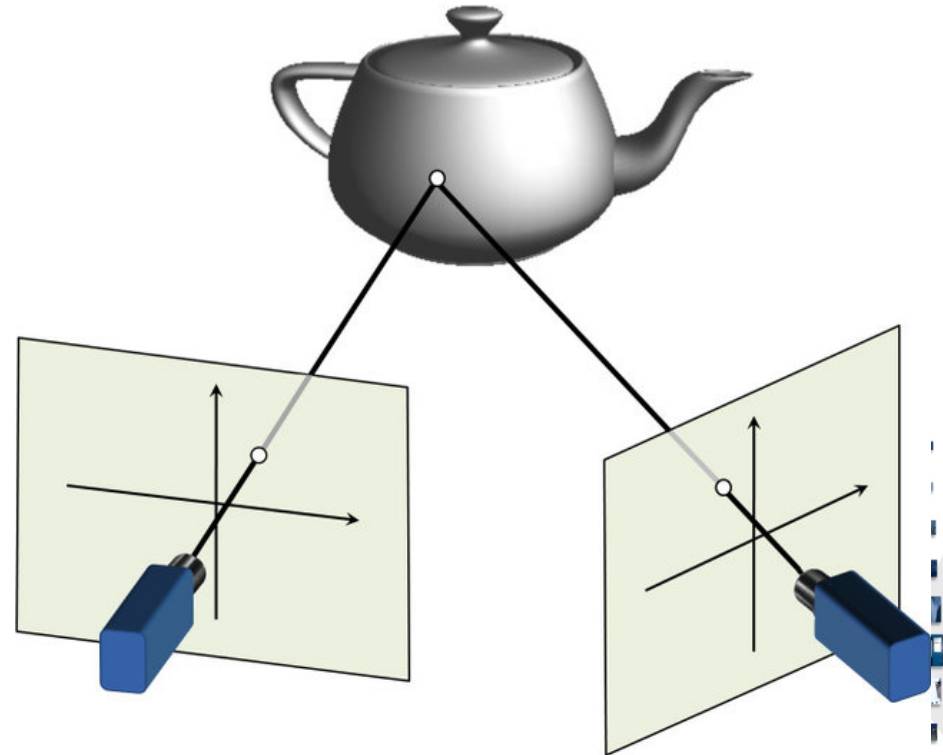
1 caméra, différentes direction d'éclairage



Photometric stereo, Wikipedia

Multi-view

2 caméras, 1 direction d'éclairage

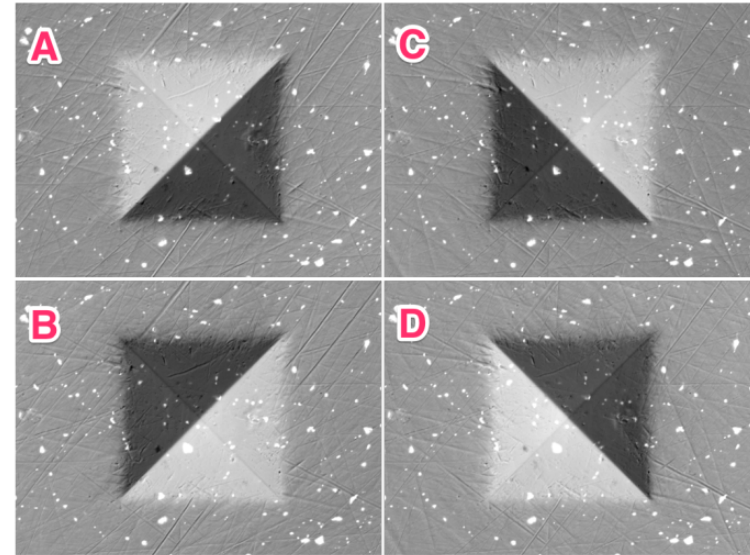
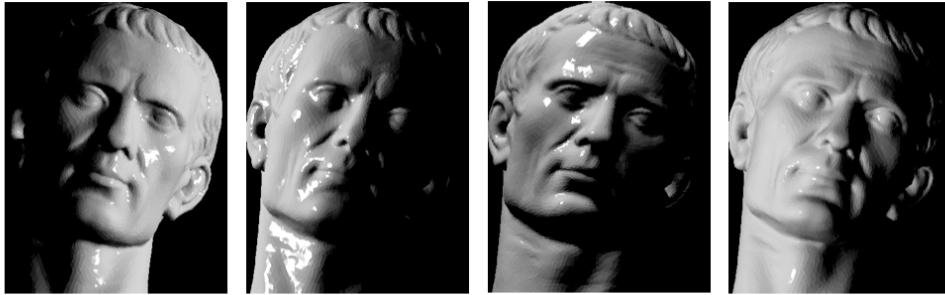


3D Reconstruction from Multiple Images: Part 1 - Principles.
Moons et al. 2009

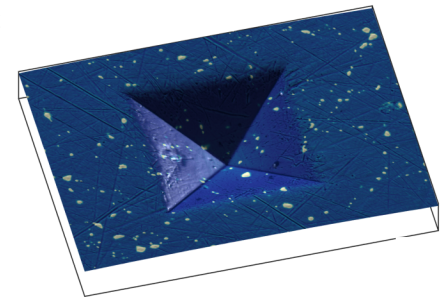
Single view : shape from shading

Single view

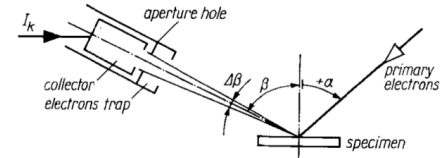
1 caméra, différentes direction d'éclairage



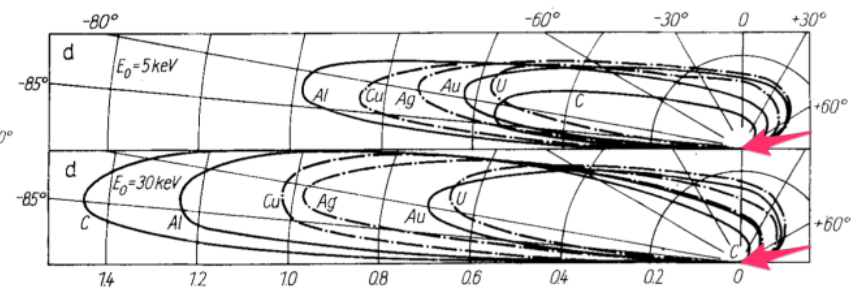
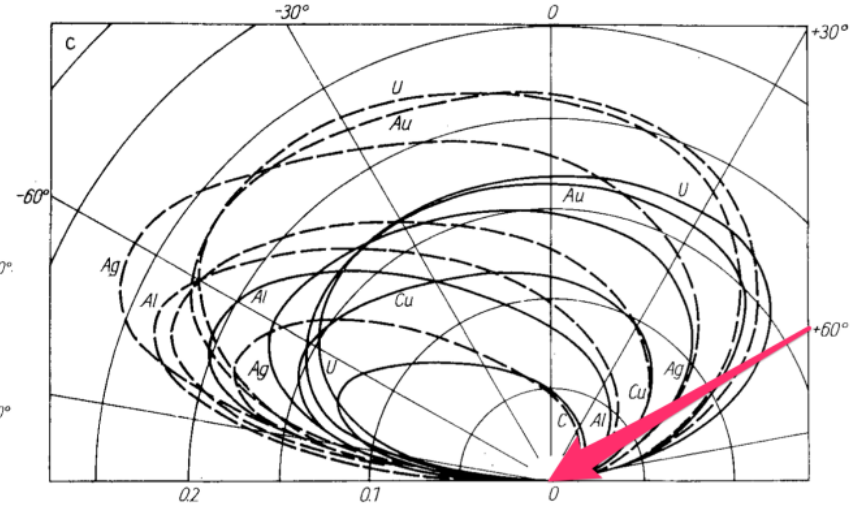
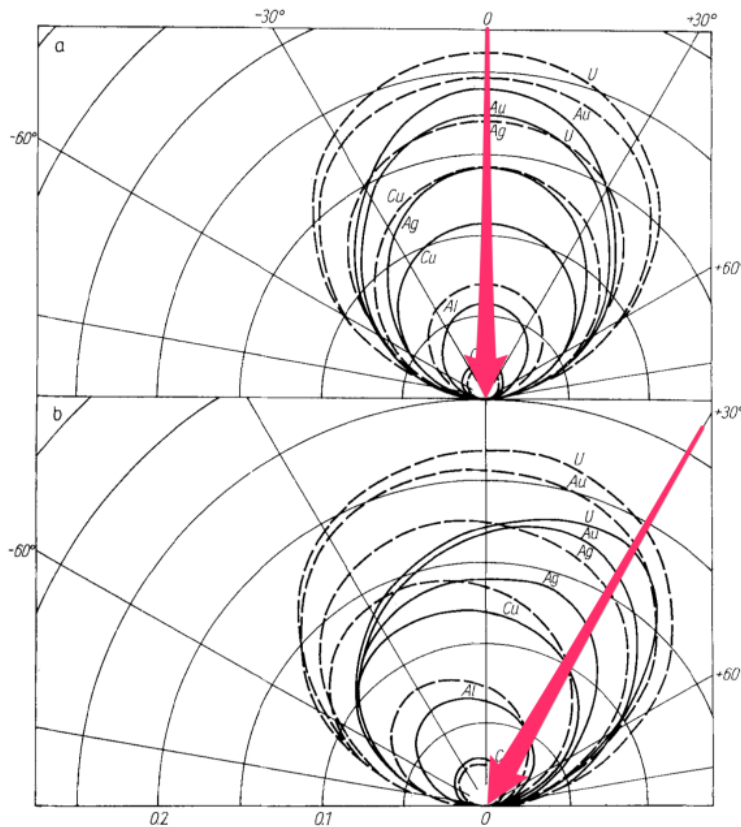
4 images BSE prises
simultanément avec
les 4 quadrants



Intensité de retrodiffusion



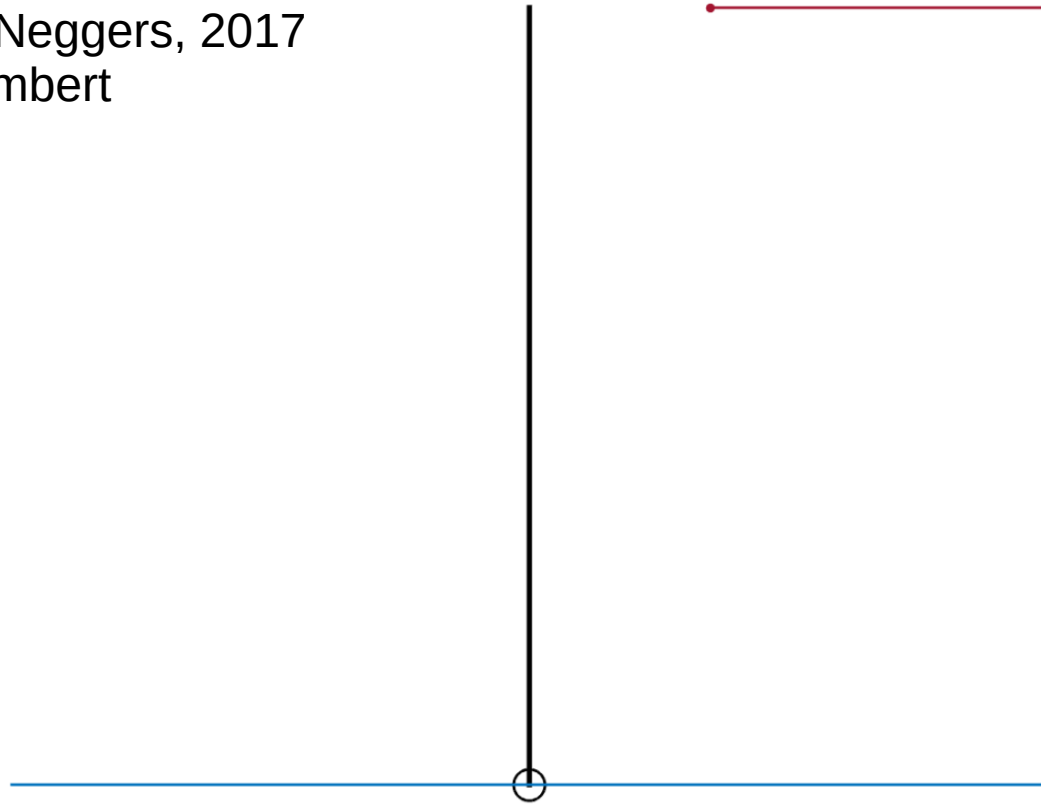
Darliński 1981



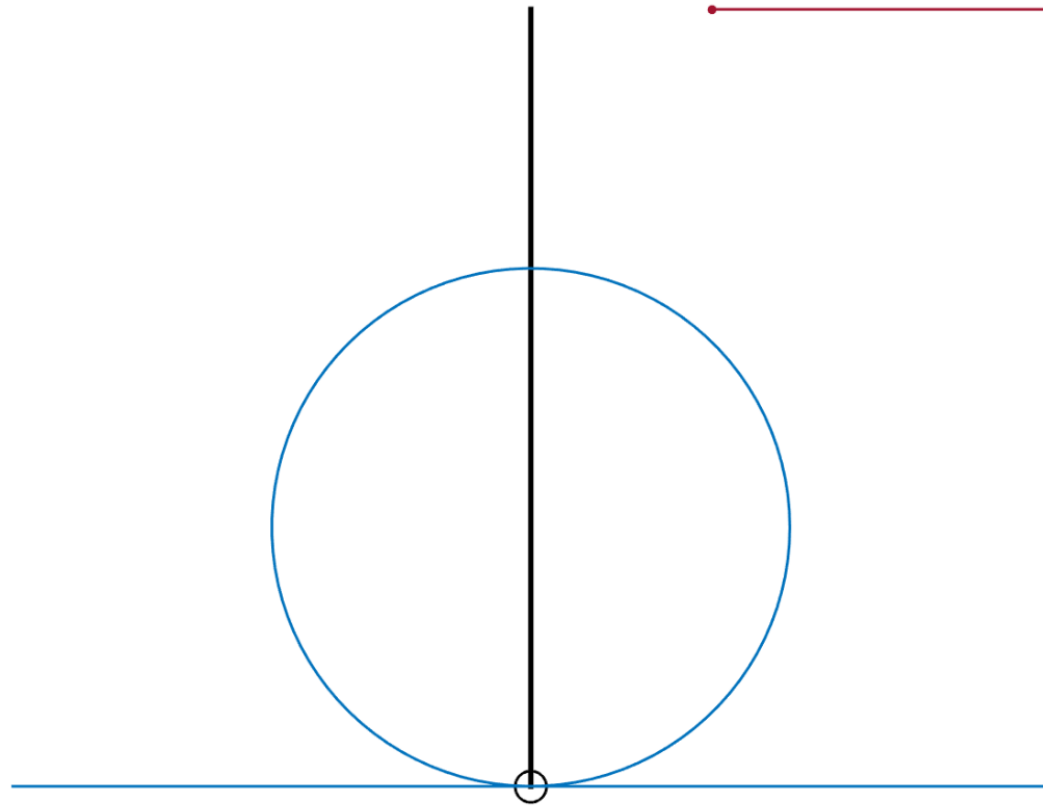
Darliński 1981

Intensité du signal en fonction de la pente

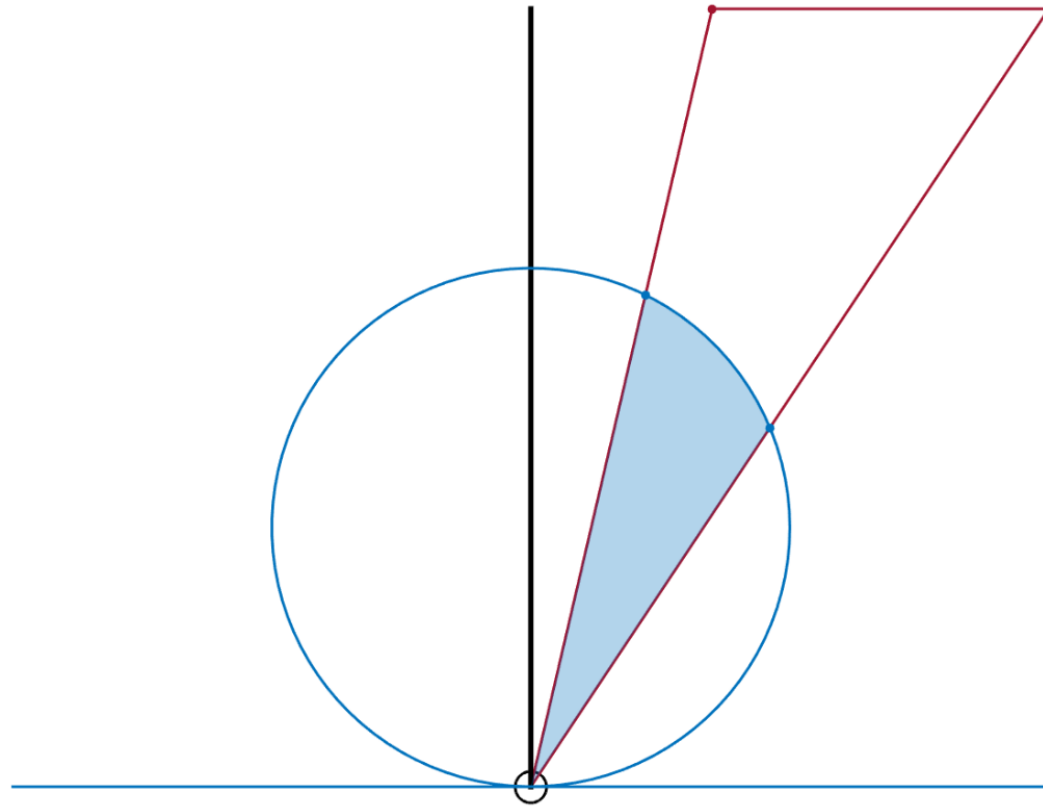
Travail de Jan Neggers, 2017
Hyp. Loi de Lambert



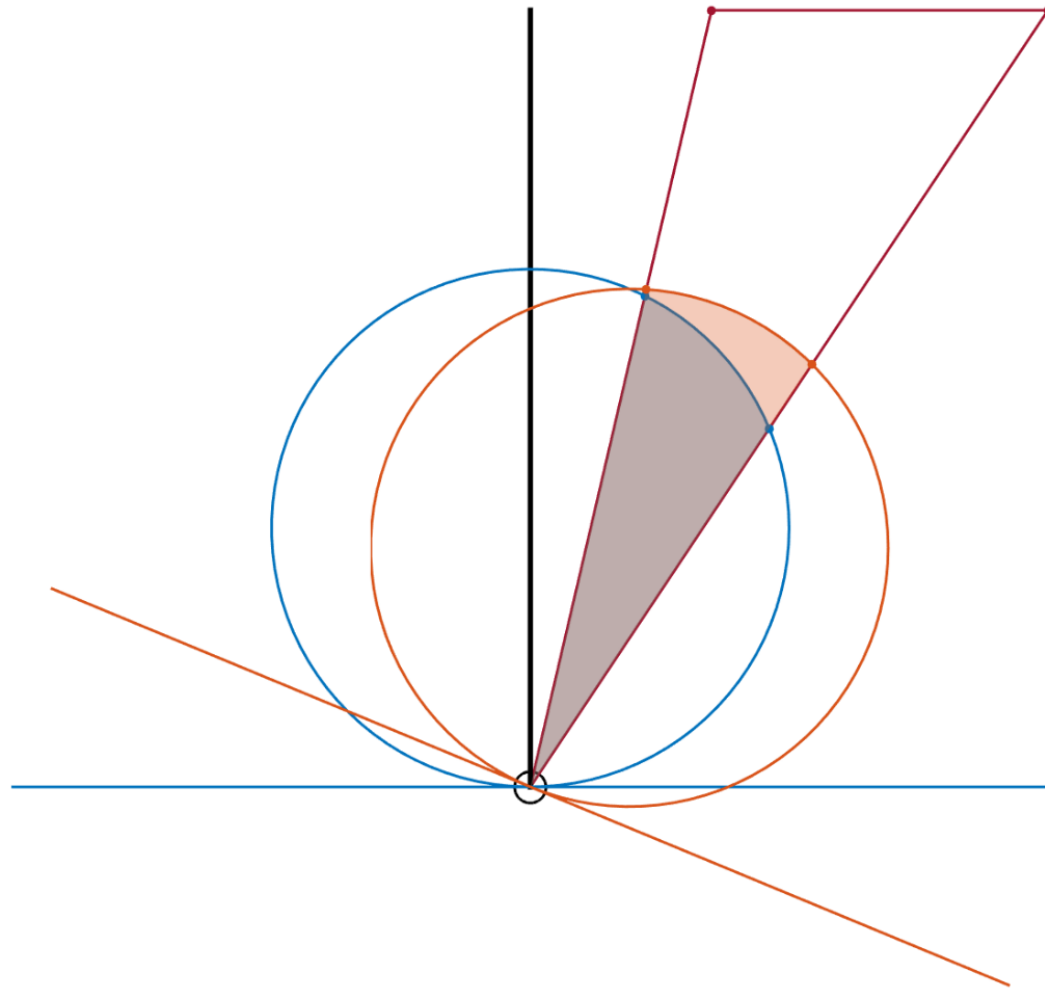
Intensité du signal en fonction de la pente



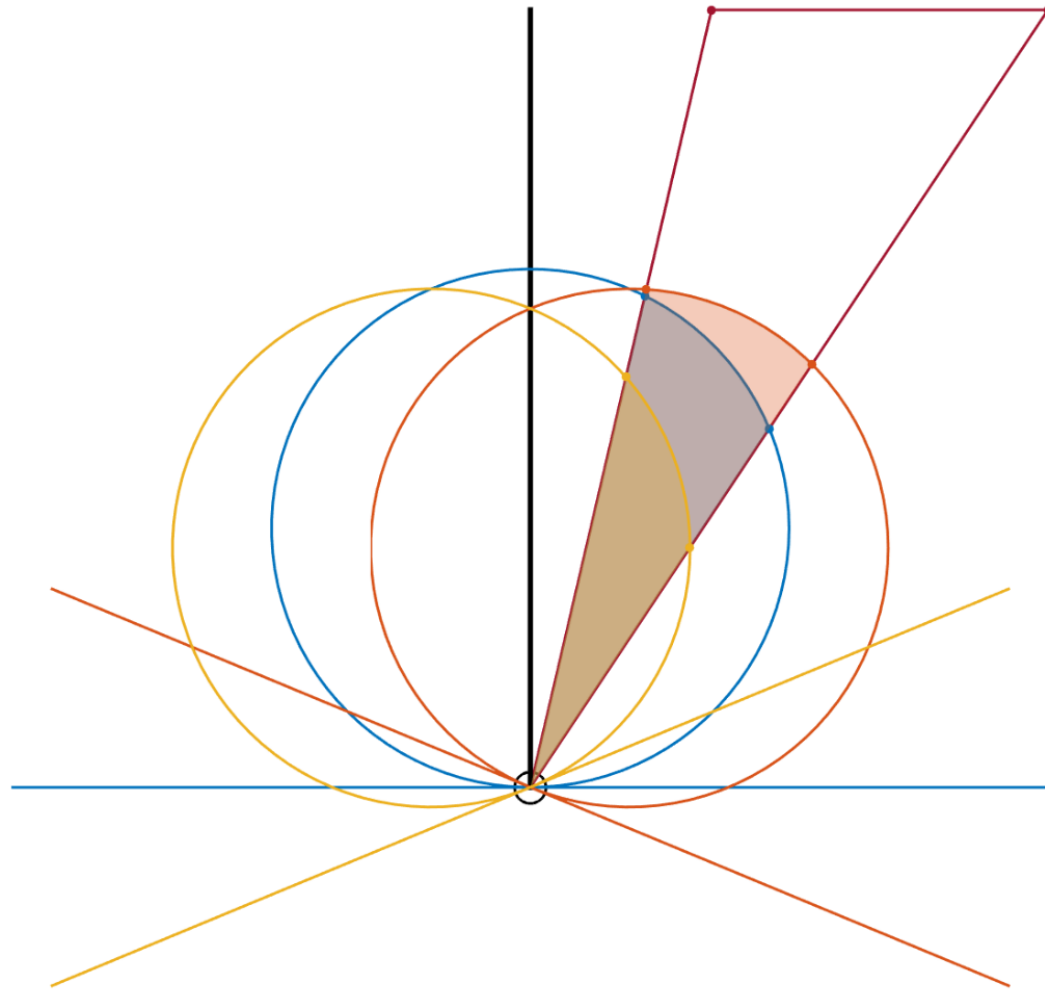
Intensité du signal en fonction de la pente



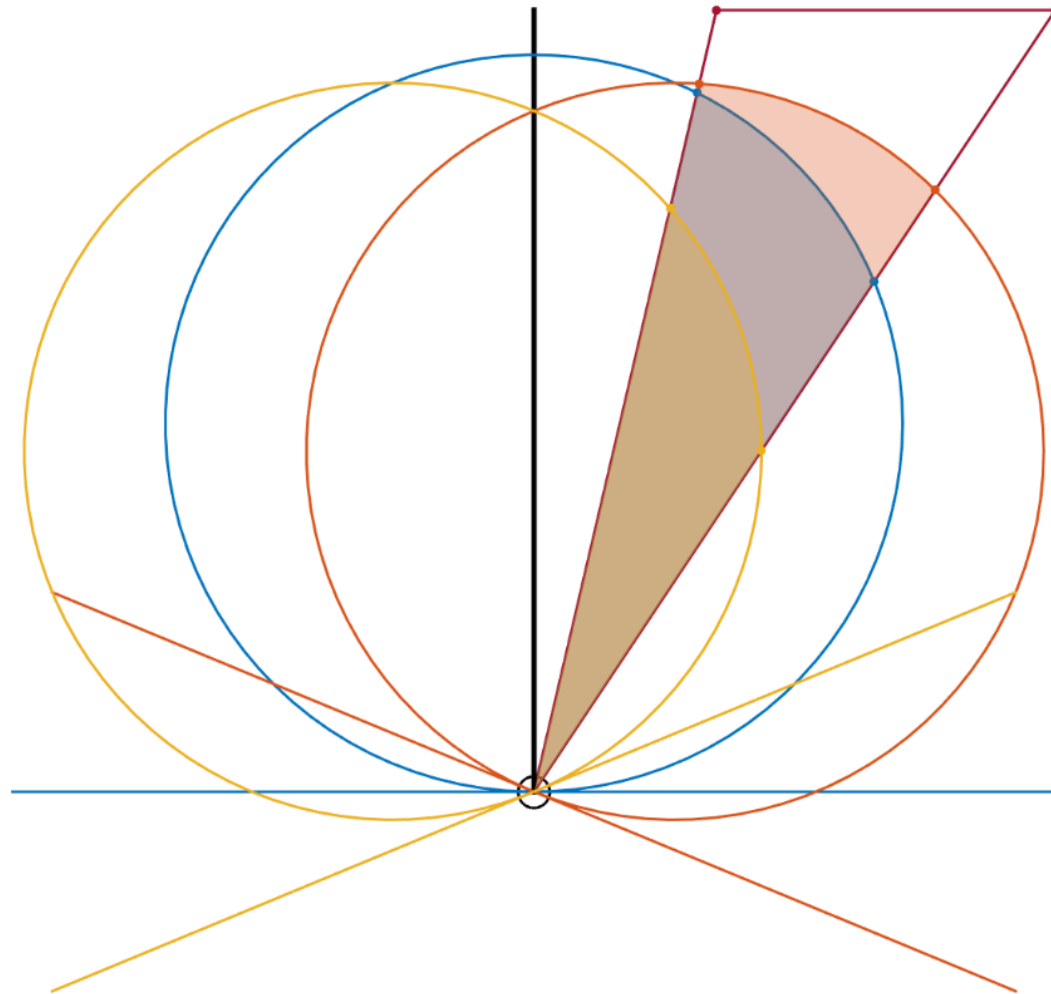
Intensité du signal en fonction de la pente



Intensité du signal en fonction de la pente

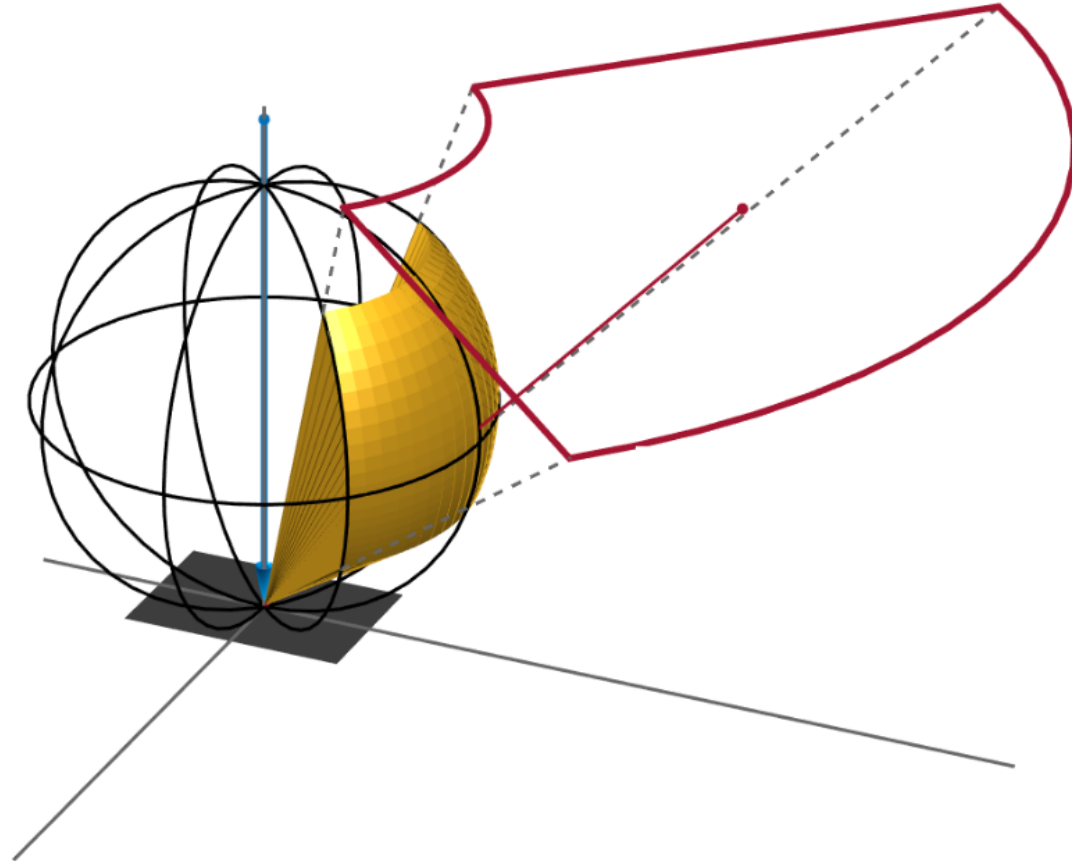


Intensité du signal en fonction de la pente

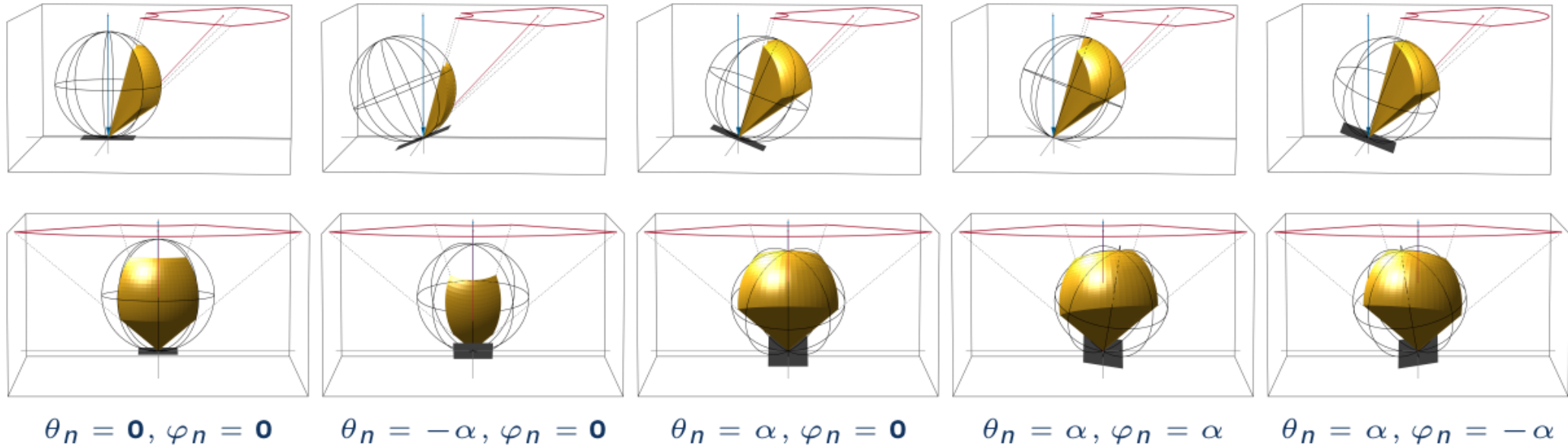


Changement
de la nature du
matériau

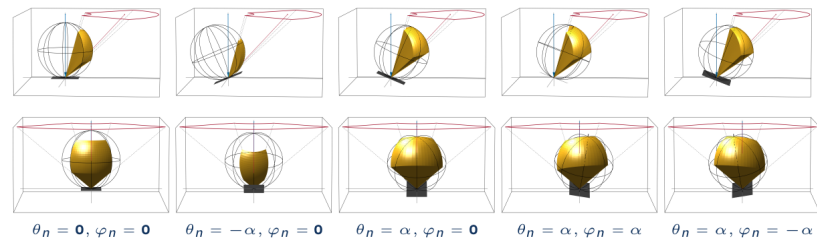
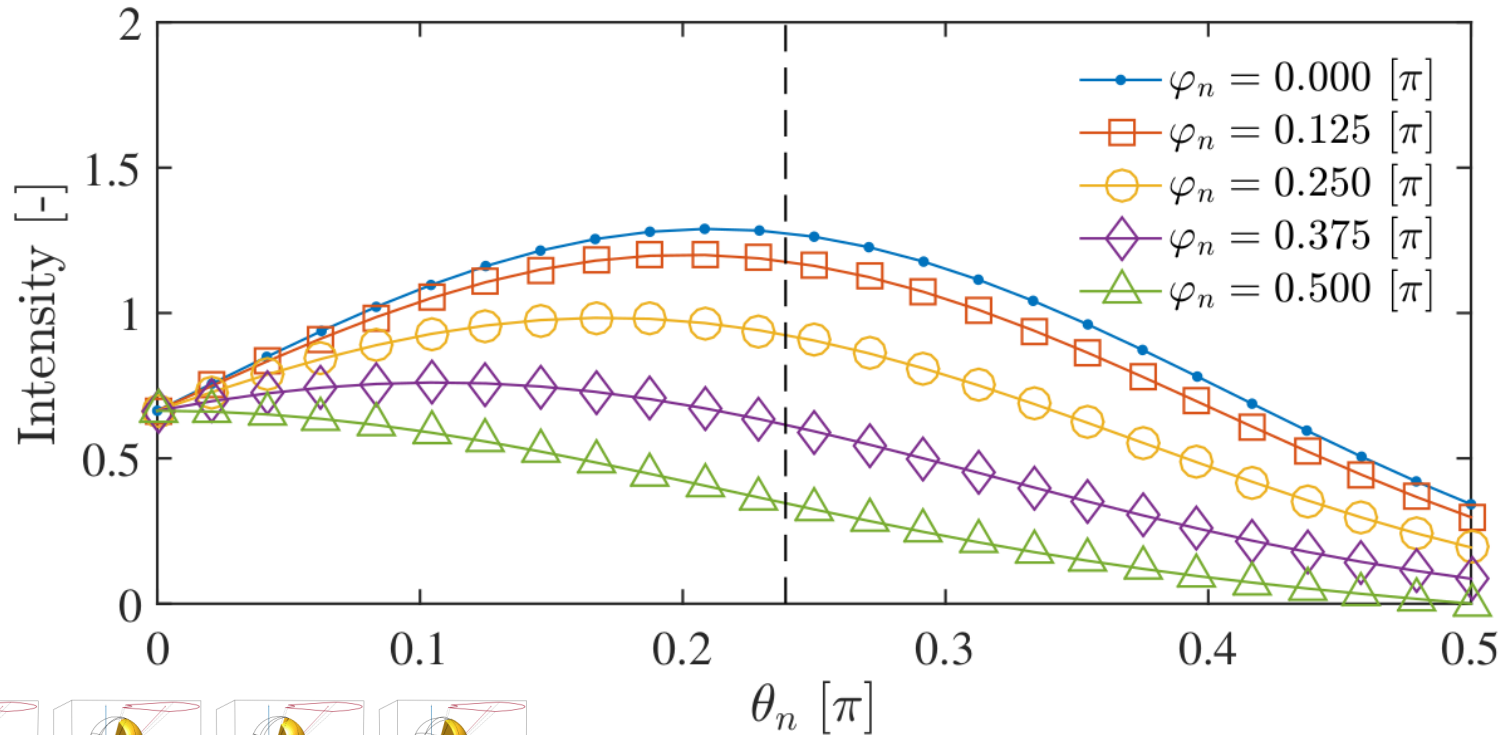
Intensité du signal en fonction de la pente



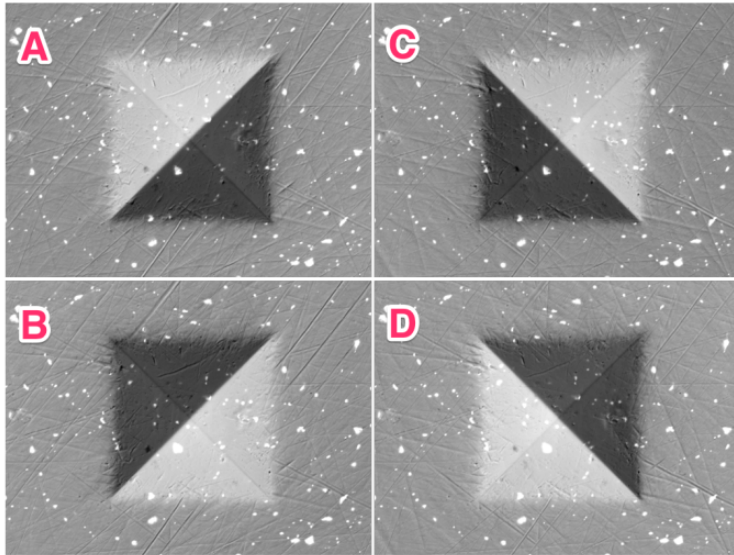
Intensité du signal en fonction de la pente définie par deux angles



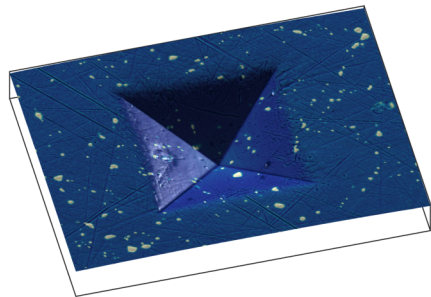
Intensité du signal en fonction de la pente définie par deux angles



Single view : shape from shading



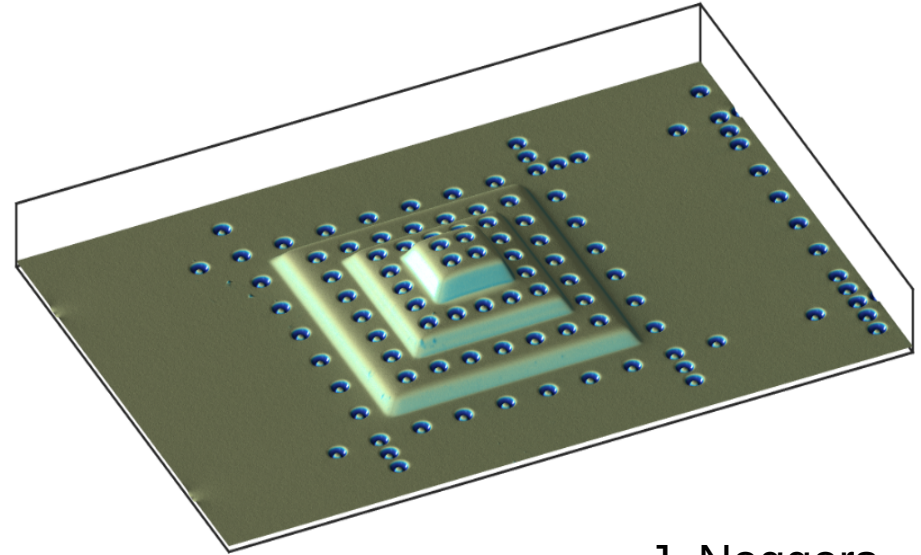
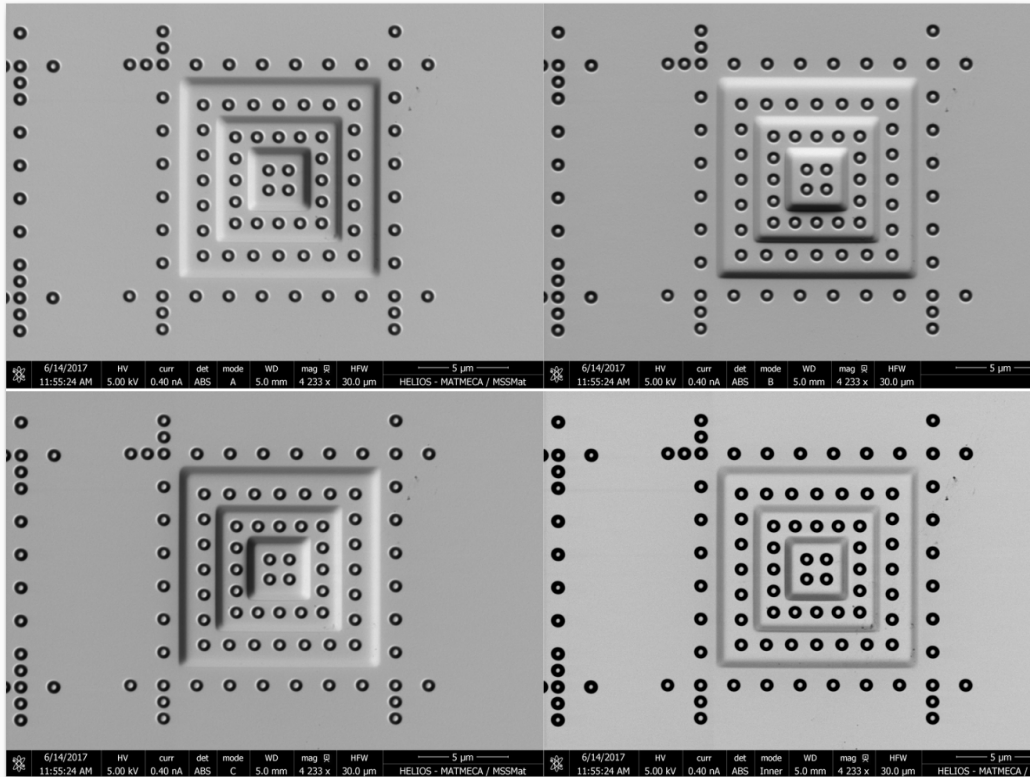
4 images BSE prises
simultanément avec
les 4 quadrants



Les différentes étapes :

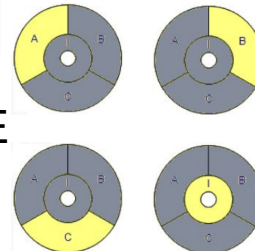
1. Prendre une série d'images avec les différents secteurs du Détecteur BSE
2. Déterminer les directions d'éclairage / Paramètres des détecteurs (orientation et sensibilité)
3. Calculer les normales aux surfaces et la composition
4. Estimer la profondeur (nécessité d'un point à une hauteur connue)

Exemple d'application



J. Neggers

Images des différents secteurs du détecteur BSE
Champ 30 μ m, 5kV, 0,4nA

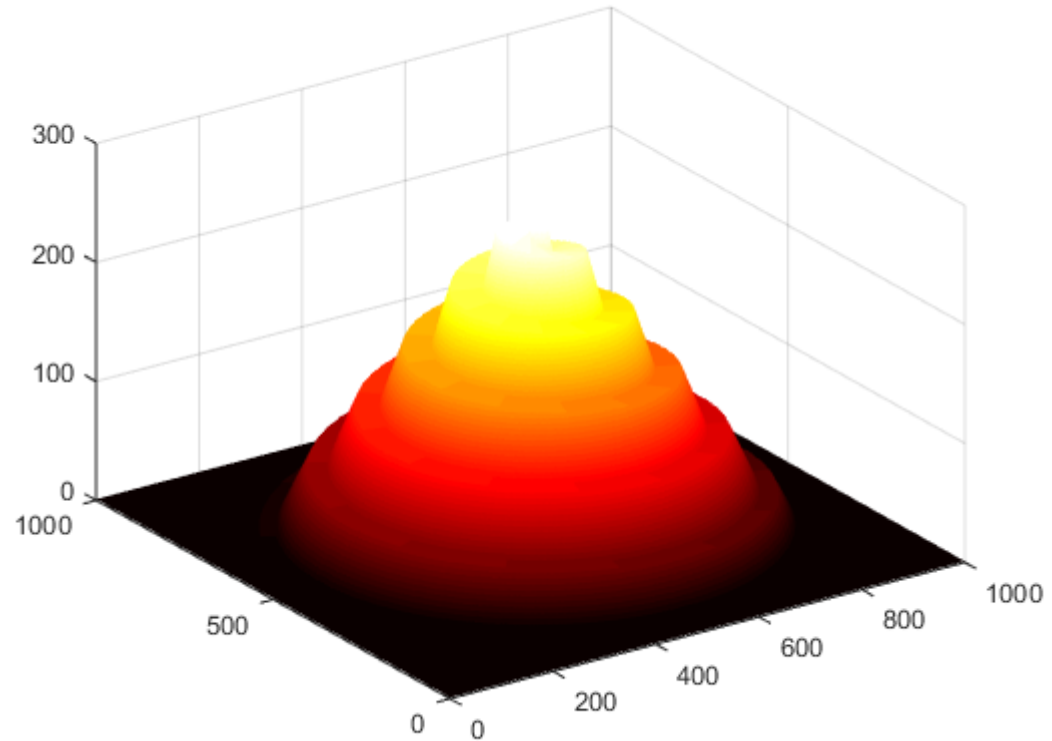


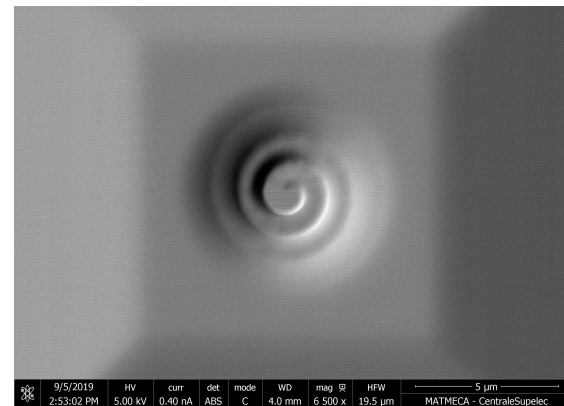
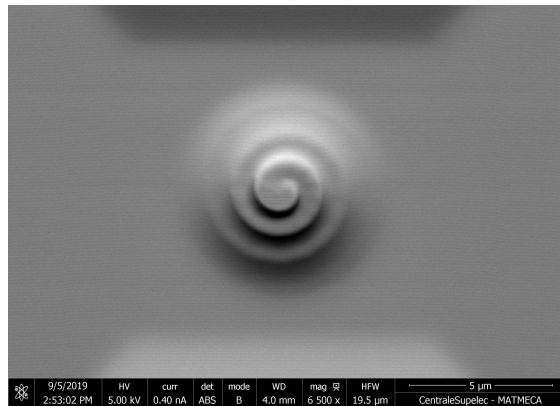
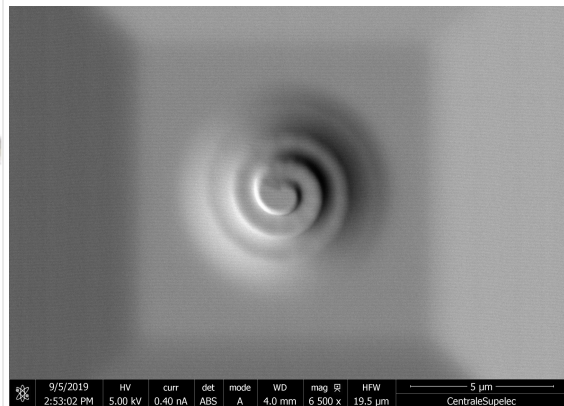
Création d'une structure en 3D pour vérifier la robustesse de l'algorithme

Structure en 3D avec variation de pente

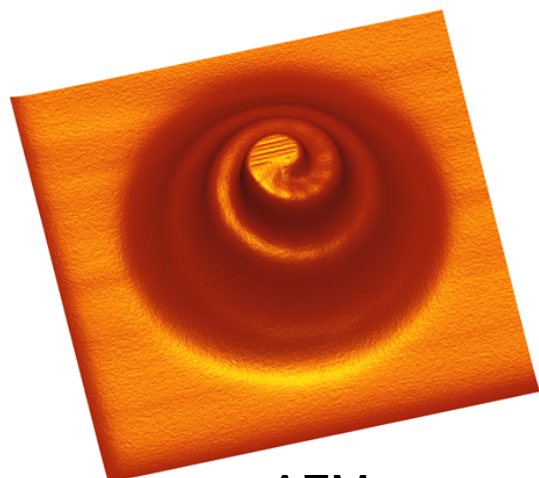
Réalisable au FIB

Dépôt de Pt (par *ibid*) puis gravage dans le dépôt

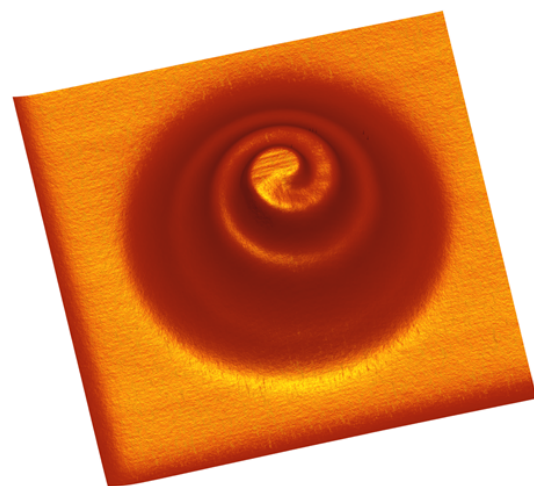




Champ 20 µm, 5kV, 0,4nA



AFM



SEM

Moyenne quadratique de la différence = 16 nm

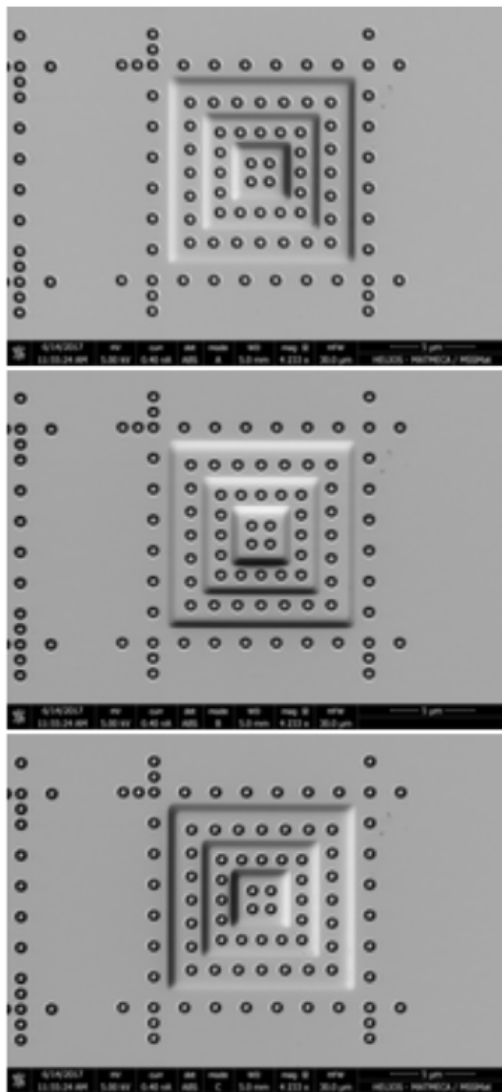
J. Neggers

Single view : Effet des paramètres MEB

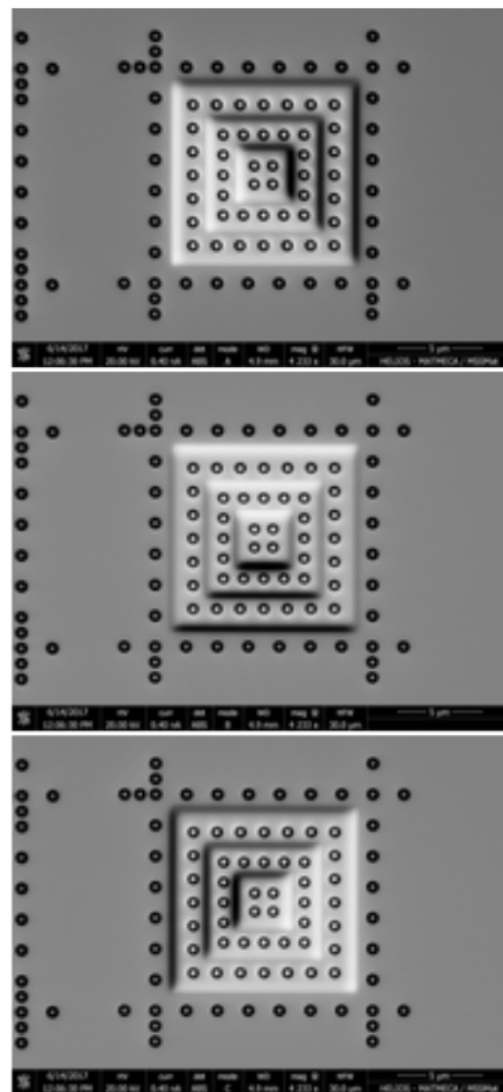
Deux paramètres testés :

- La tension d'accélération
- La distance de travail

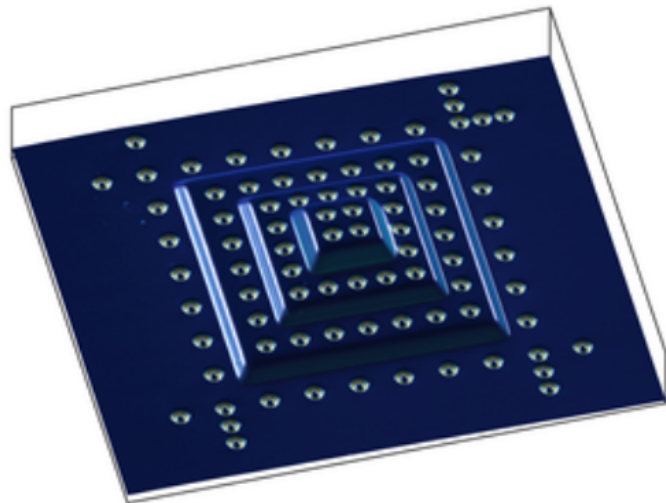
Pyramide 5kV 5mm



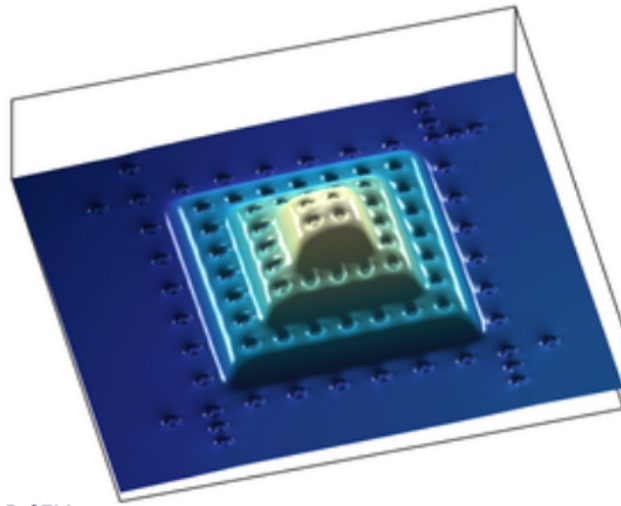
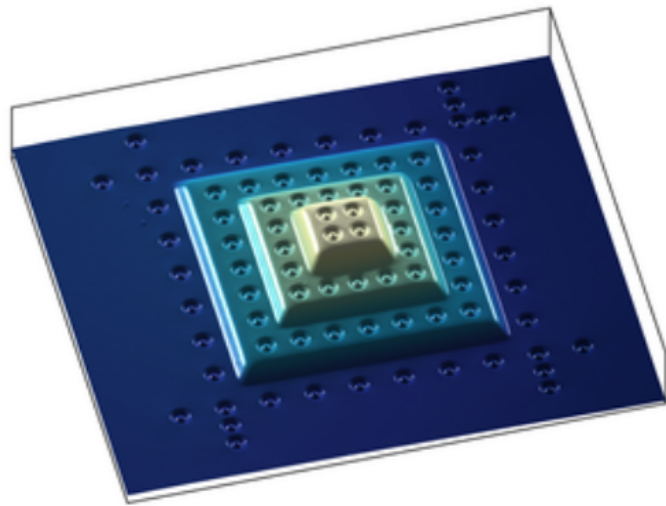
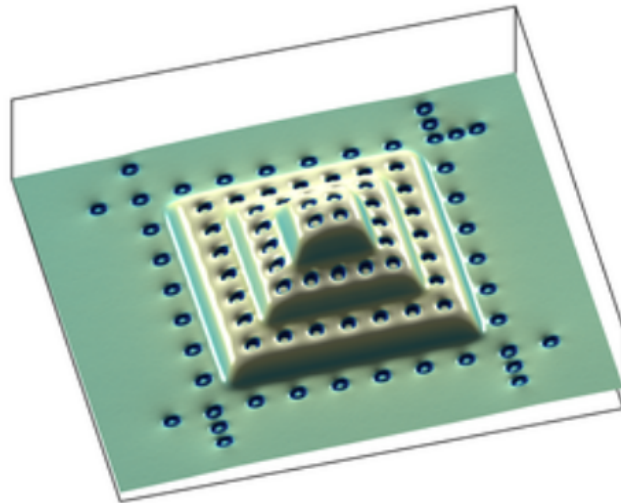
Pyramide 20kV 5mm



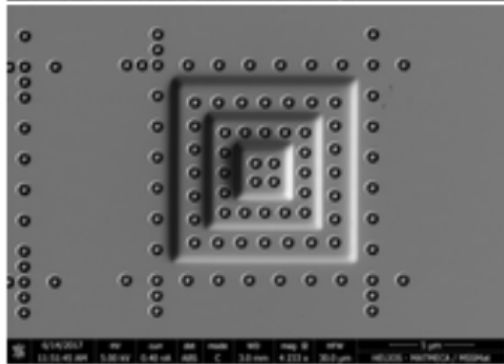
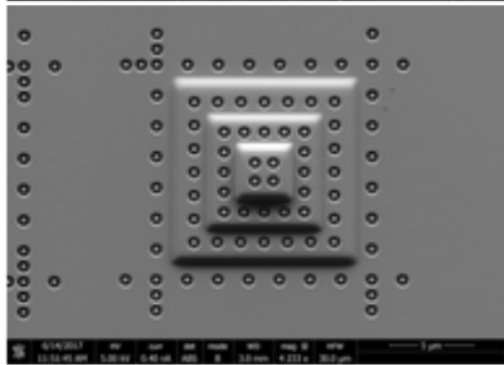
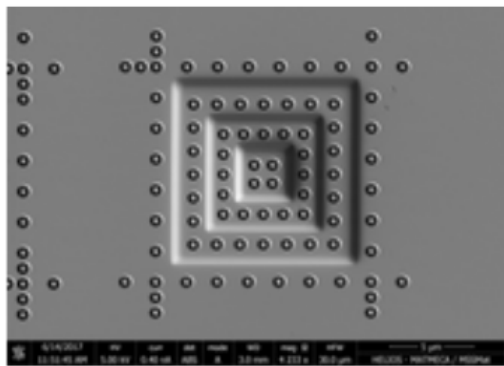
Pyramide 5kV 5mm



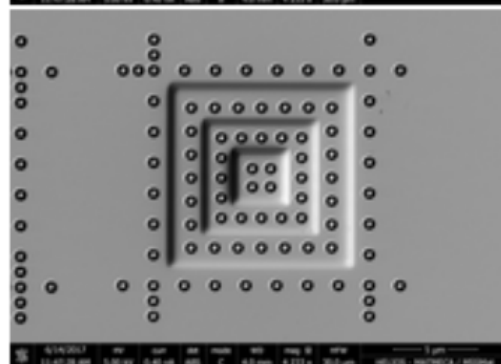
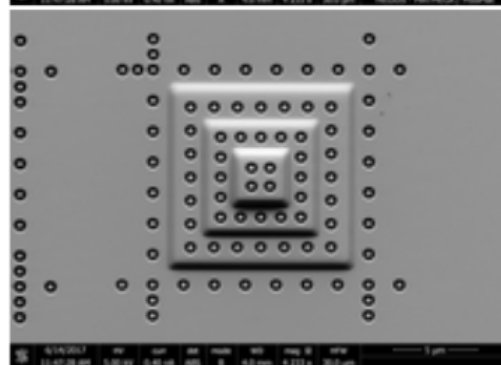
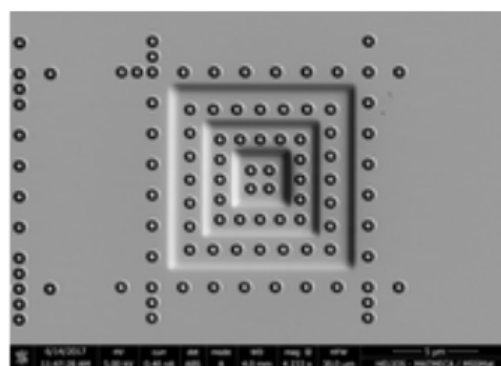
Pyramide 20kV 5mm



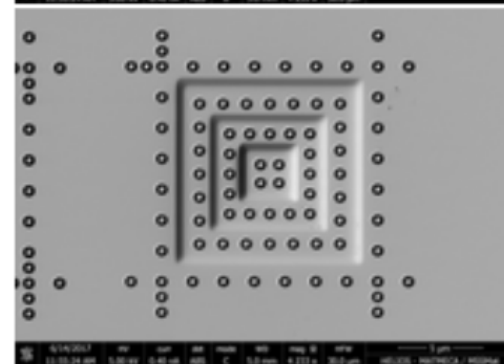
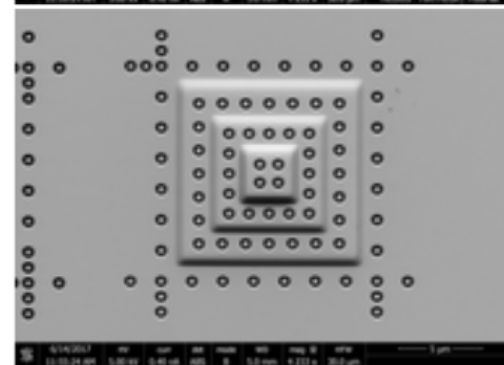
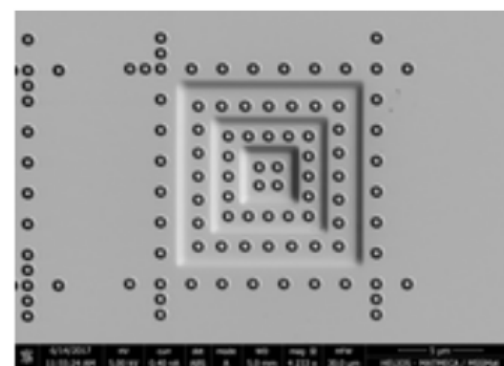
Pyramide 5kV 3mm



Pyramide 5kV 4mm



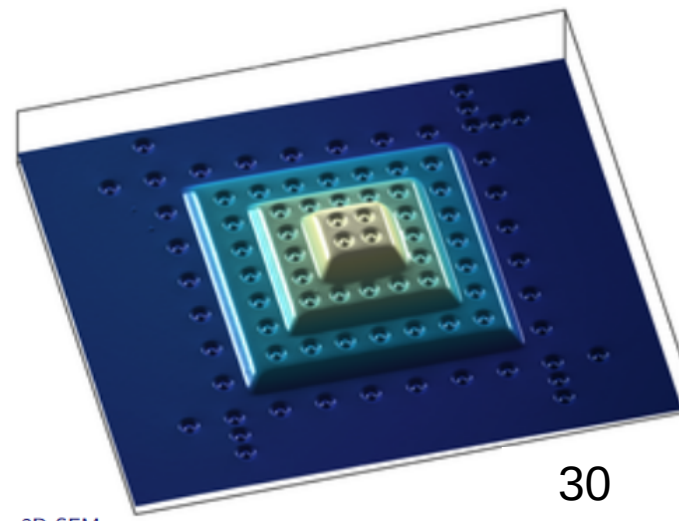
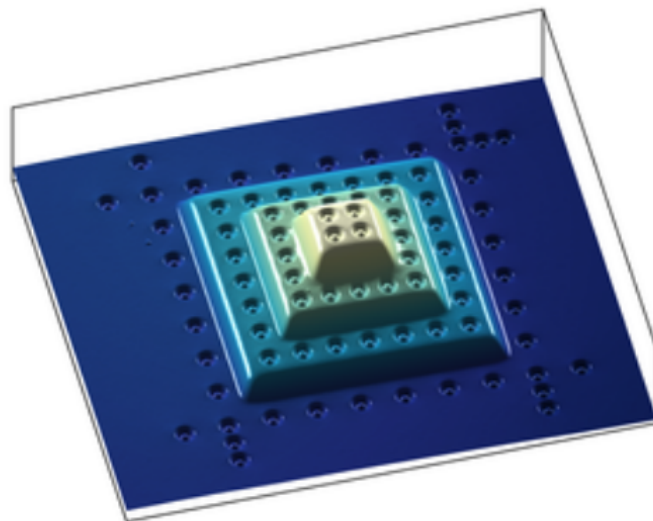
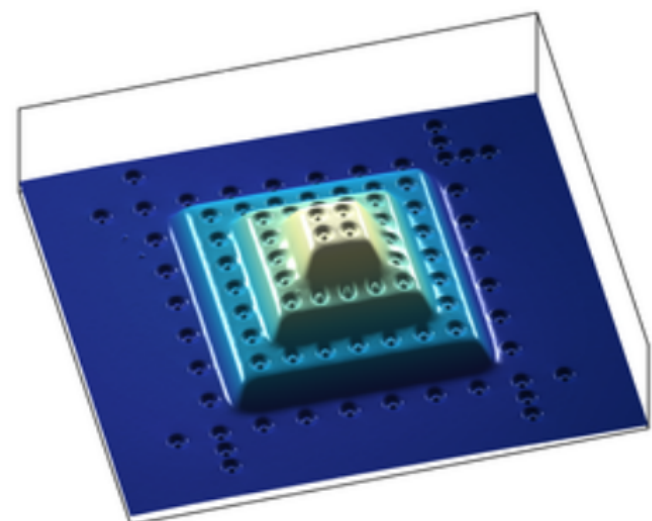
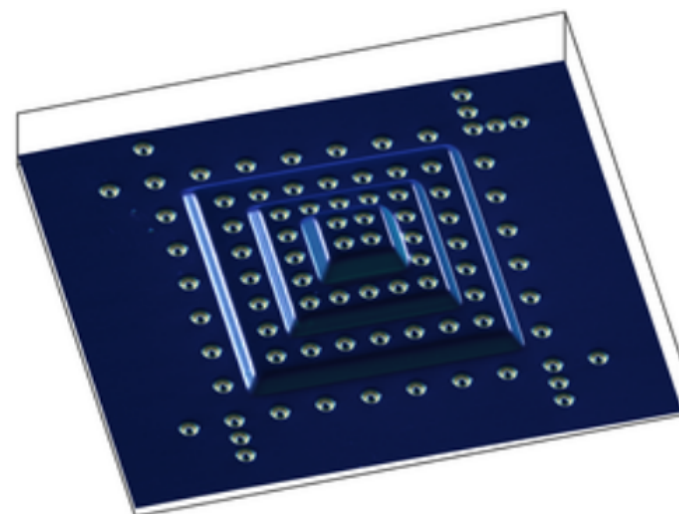
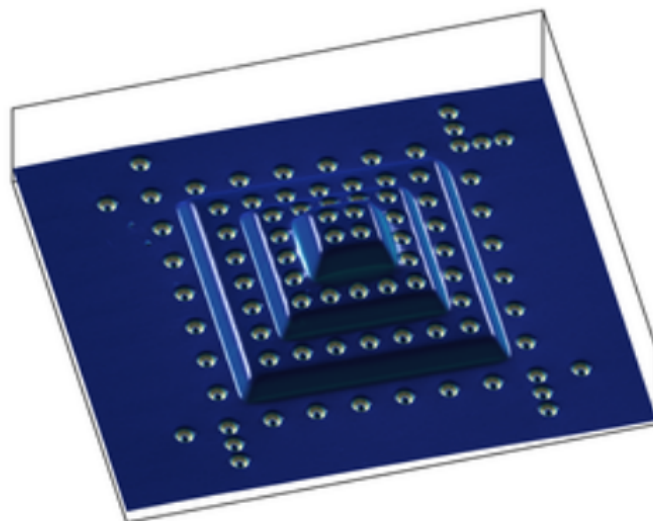
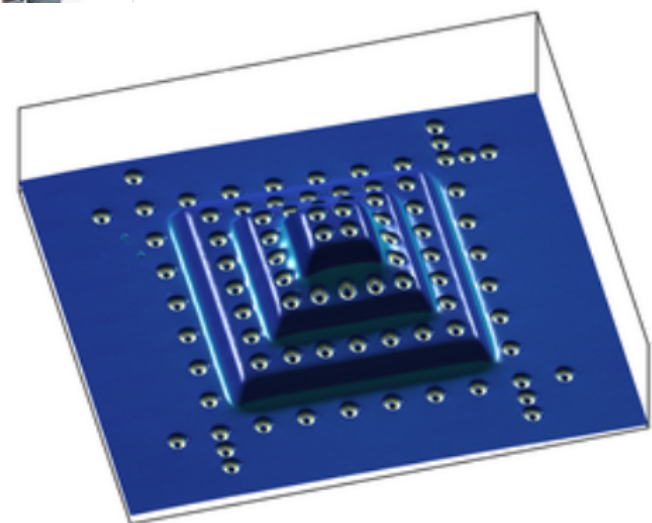
Pyramide 5kV 5mm



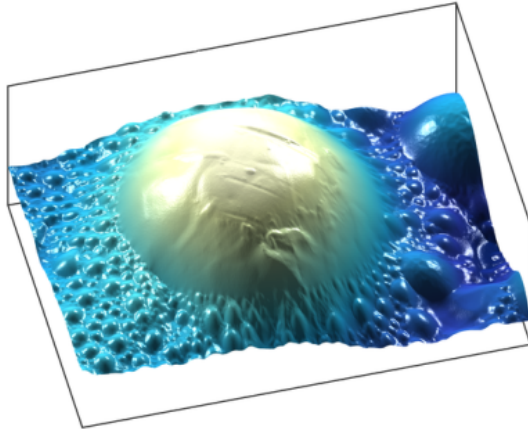
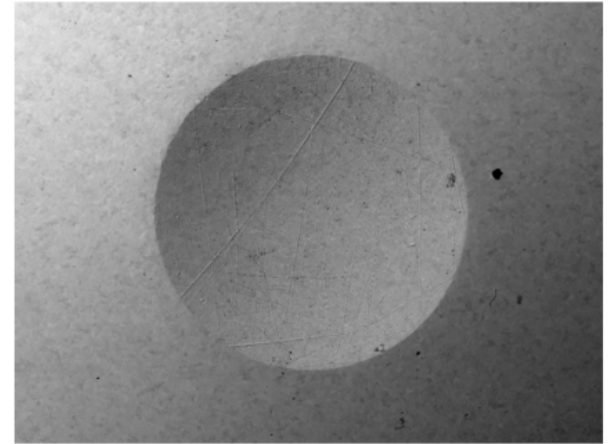
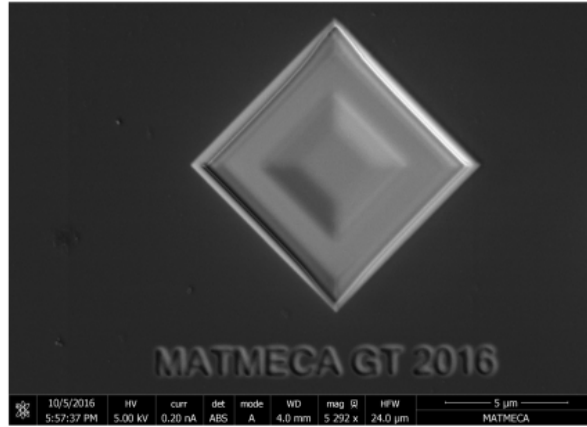
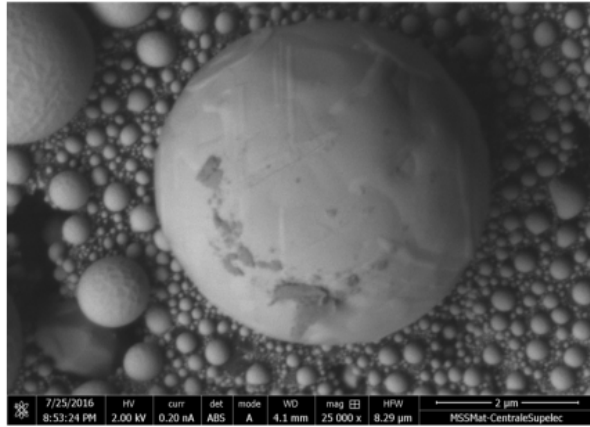
Pyramide 5kV 3mm

Pyramide 5kV 4mm

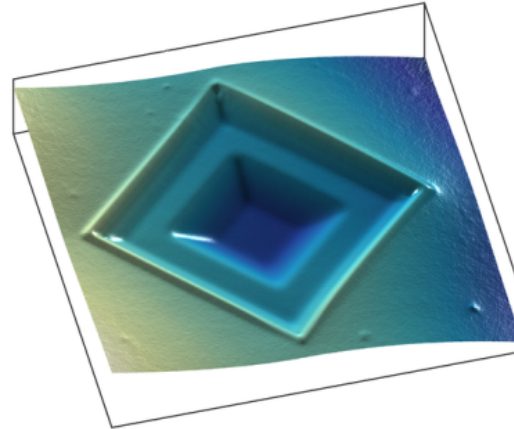
Pyramide 5kV 5mm



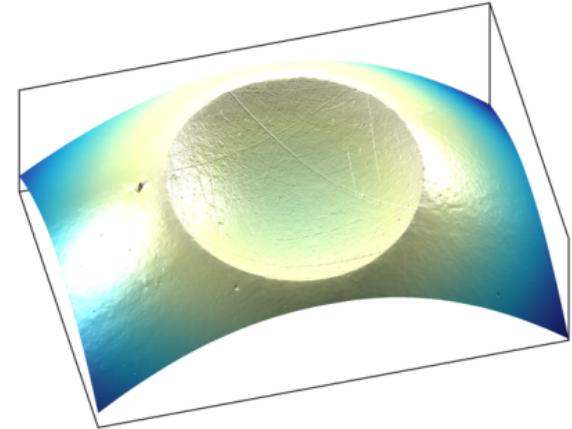
Artefacts de reconstruction



Zone cachée /
manque d'information



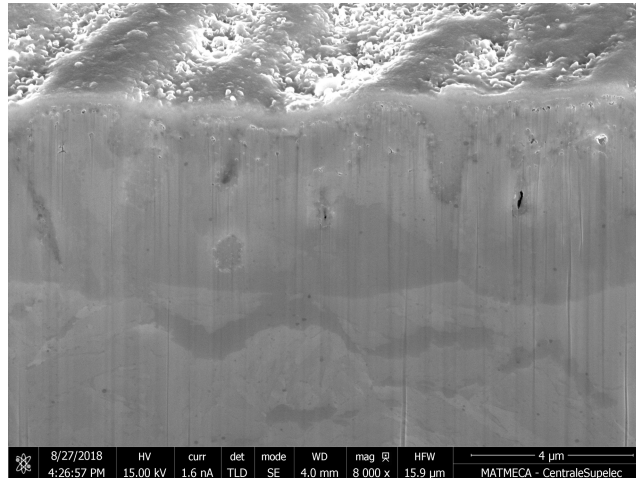
Mauvaise calibration



Courbure du plan
Manque d'information en Z

Méthodes hybrides ou exotiques

- Couplage de multi-vues et simple vue avec différentes direction de lumières (BSE avec tilt?)
- Slice and view ...



Quelques outils (liste non exhaustive)

Single view

BSE Shape from shading

- Mountains → 4 quadrants BSE
- M2C microShape → 4 quadrants BSE
- Notre logiciel maison pour toutes les config. (contact Jan Neggers, LMPS)

Les deux méthodes

- Digital Surf → 2 images stéréo ou 4 images BSE (4 quadrants)

Multi-view Images stereo

- MEX
- Scandium Solution Height
- 3D_TOPx

Bases de données pour tester les algorithmes ???

Quelques références biblio (liste non exhaustive)

- Tafti et al., Micron 78, 2015
- Marinello et al., Meas. Sci. Tech. 19, 2008
- Stampfl et al., Appl. Phys. A 63, 1996
- Neggers et al., Strain 58, 2022
- Kudryavtsev et al., Ultramicroscopy 182, 2017

Comparaison avec d'autres méthodes

Alternative methods



Contact

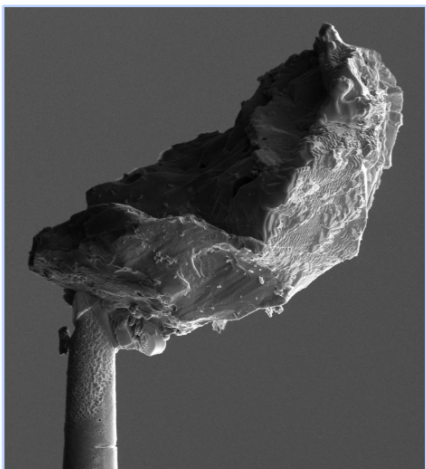
- Stylus
- SPM (AFM/STM/etc)



Optical

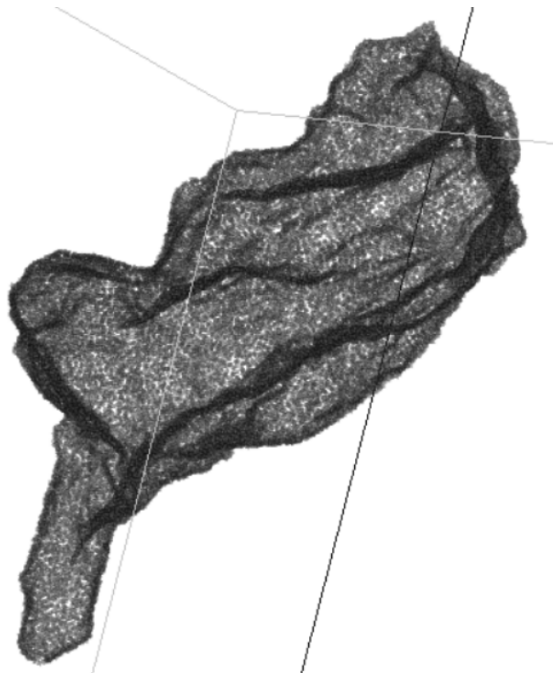
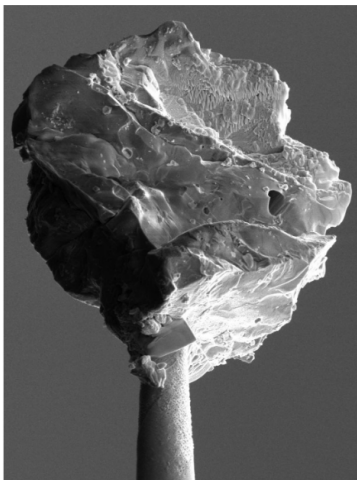
- Confocal Microscopy
- Interferometry
- Holography

	xy-resolution	z-resolution	xy-range	z-range
SPM	0.1 nm	0.1 nm	30 μm	30 μm
Optical	600 nm	5 nm	5 mm	5 mm
SEM-3D	1 nm	20 nm	1 mm	1 mm



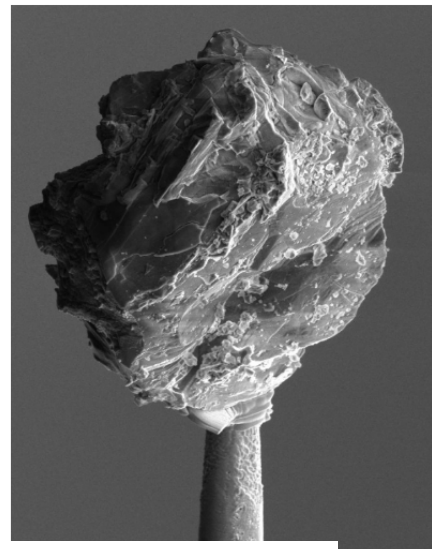
angle 0

angle 270



Autodesk ReCap Photo

rotation de 360° → 37 images



angle 180

