

*Reconstruction 3D de surface  
à partir d'images*

*de Microscopie Electronique à Balayage  
ou  
de Microscopie Optique Sériée*

*Denis Boivin, Jean-louis Pouchou, Yves Renollet  
ONERA, Département des Matériaux Métalliques et Procédés (DMMP)*

# Reconstruction de surface à partir d'images de Microscopie Électronique à Balayage

Rappel du principe général de la méthode  
(*cas d'une paire d'images stéréoscopiques*)

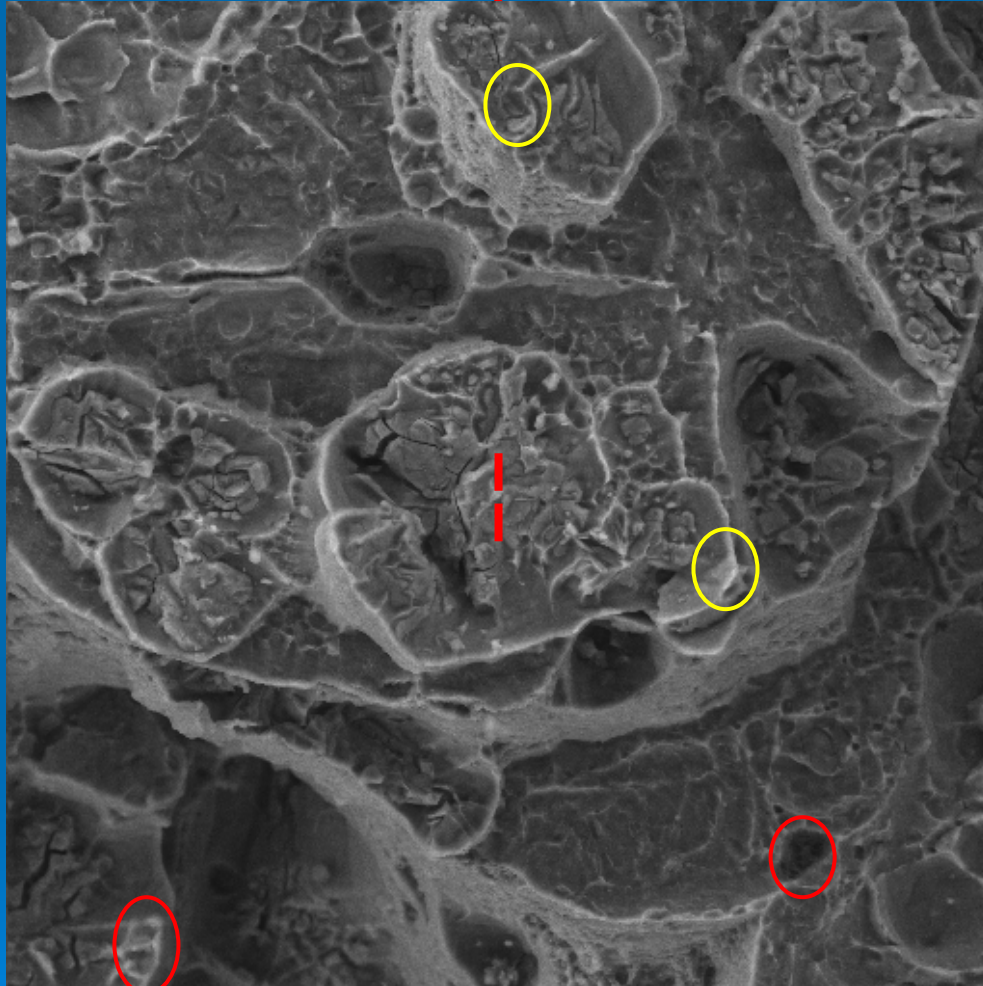
## Étapes principales (3)

1. Acquérir un couple d'images d'un même champ avec deux inclinaisons différentes du porte-échantillon
2. Etablir les appariements entre les détails se correspondant sur les 2 images → Mesure des disparités (écarts de position dans un repère fixe)
3. Déduire de la disparité l'élévation en chaque point  
→ Reconstruction dense de la surface  
(*quasi-totalité de pixels significatifs, minimum d'artefacts*)

tilt = - 10°



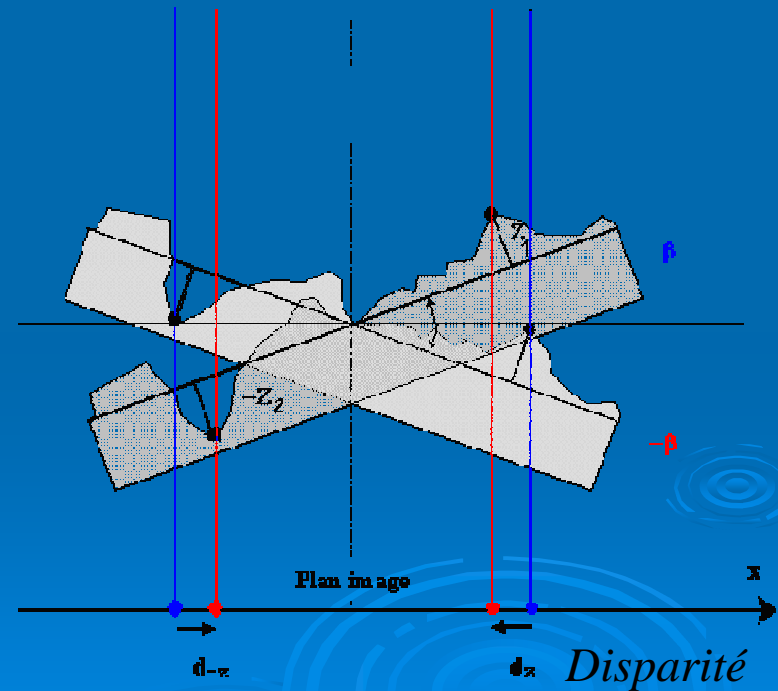
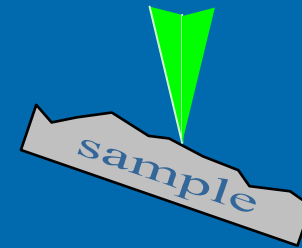
Tilt  $\pm \beta \rightarrow \Delta z \sim d / 2\sin\beta$



$d > 0$



$d > 0$

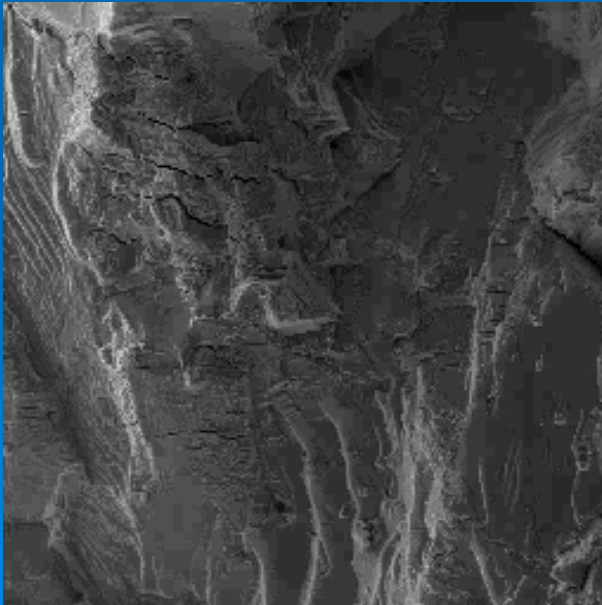


# Reconstruction de surface à partir d'images de Microscopie Électronique à Balayage

## 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 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*

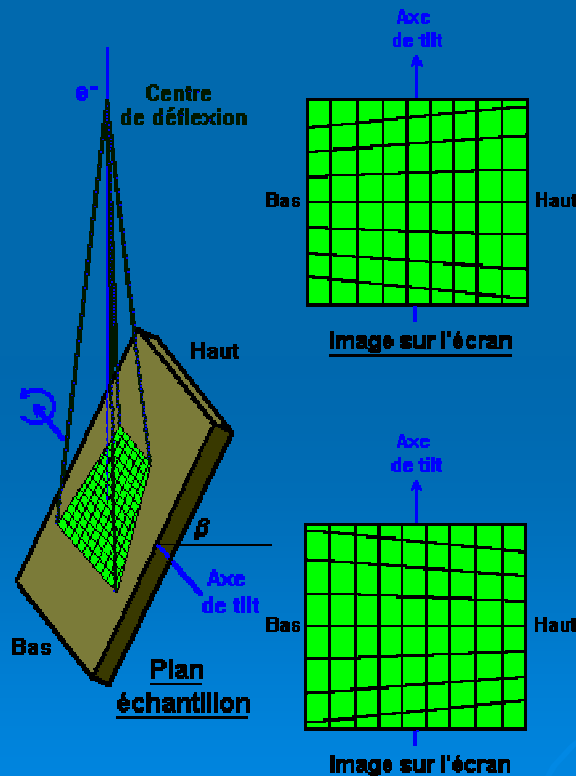
$$C_{XY} = \frac{\sum_{X,Y} (A_{X,Y} - \bar{A}) (B_{X,Y} - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{X,Y} (A_{X,Y} - \bar{A})^2} \sqrt{\sum_{X,Y} (B_{X,Y} - \bar{B})^2}} = \frac{\text{Covariance}(A,B)}{\text{Ecart-type}(A) \cdot \text{Ecart-type}(B)}$$

# Reconstruction de surface à partir d'images de Microscopie Électronique à Balayage

## 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 :

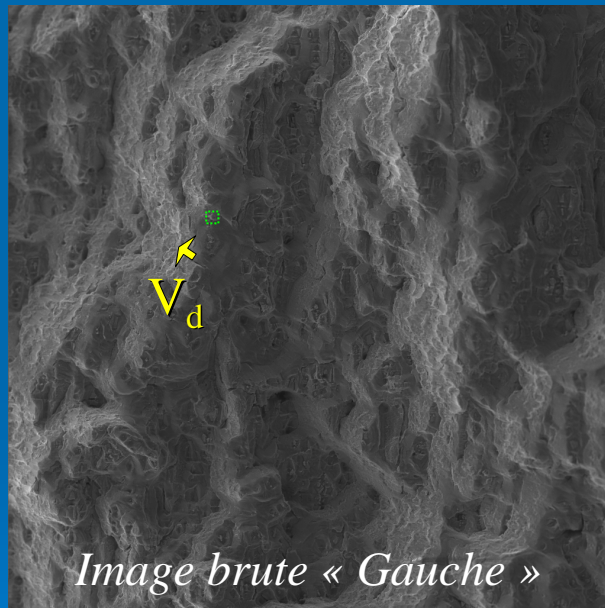


- Recherche dans les deux directions X et Y de l'image.
- Recherche dans la seule direction X, après rectification des images basée sur les paramètres géométriques nominaux d'acquisition.
- Recherche dans la seule direction X, après rectification des N images basée sur les paramètres géométriques issus d'un processus complexe d'autocalibration, nécessitant au moins 3 images à 3 inclinaisons distinctes.

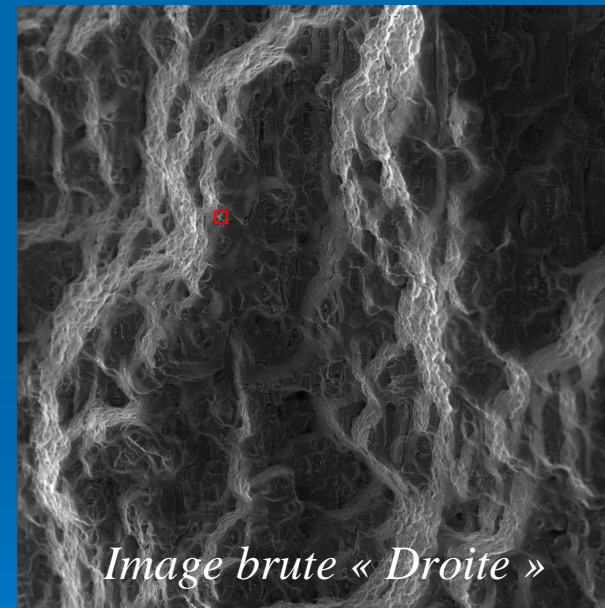
# Reconstruction de surface à partir d'images de Microscopie Électronique à Balayage

## Mesure des disparités – Approche intuitive

Vecteur Disparité  $V_d$  obtenu par recherche des pixels homologues dans les **deux directions X et Y** de l'image, avec déplacement de grande amplitude d'une fenêtre de corrélation de petite taille.



$$\begin{aligned} \vec{V}_{d_x} &\rightarrow Z \\ \vec{V}_{d_y} &\rightarrow Z \end{aligned}$$



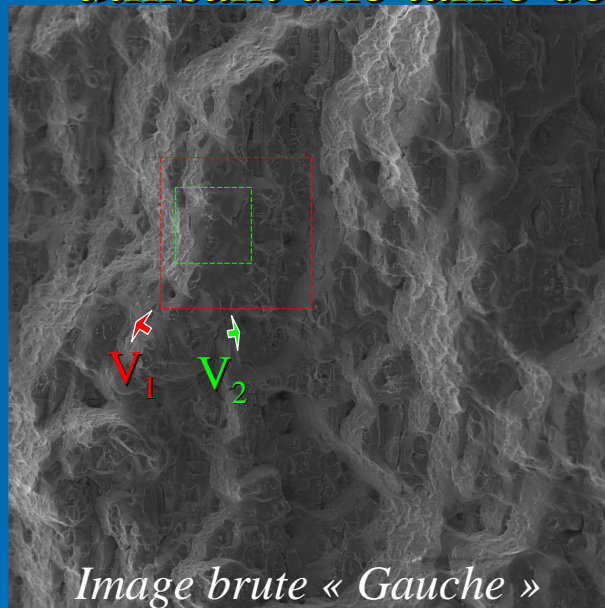
### Inconvénients

Temps de calcul conséquent (*plusieurs dizaines de mn*).  
(Grande amplitude, Petite fenêtre) → Risque d'appariement erroné

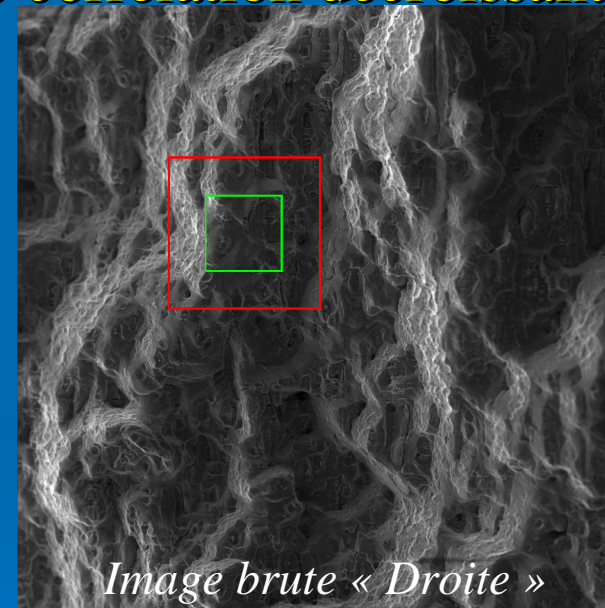
# Reconstruction de surface à partir d'images de Microscopie Électronique à Balayage

## Mesure des disparités – Approche similaire améliorée

Vecteur Disparité  $V_d$  obtenu par recherche des pixels homologues dans les **deux directions X et Y**, selon un **processus itératif** utilisant une taille de fenêtre de corrélation décroissante.



$$\vec{V}_{d_x} \rightarrow Z$$
$$\vec{V}_{d_y}$$



$$\text{Vecteur de disparité } V_d : \vec{V}_d = \vec{V}_1 + \vec{V}_2 + \dots + \vec{V}_i + \dots$$

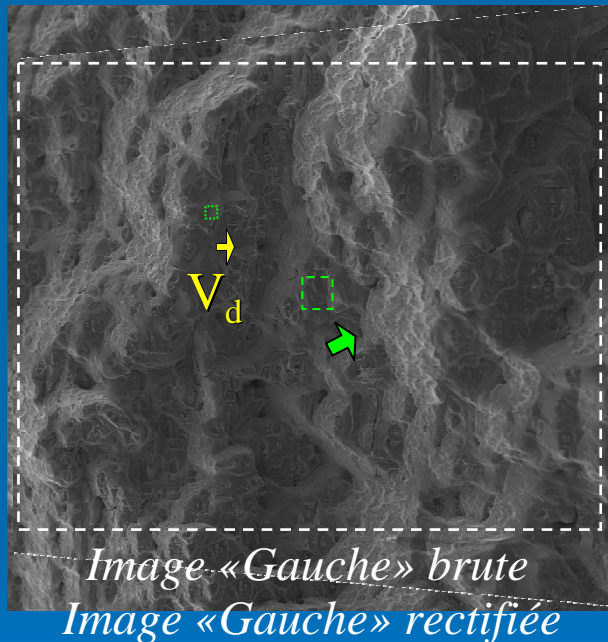
➡ Réduction du risque de fausse corrélation.

➡ Temps de calcul toujours conséquent.

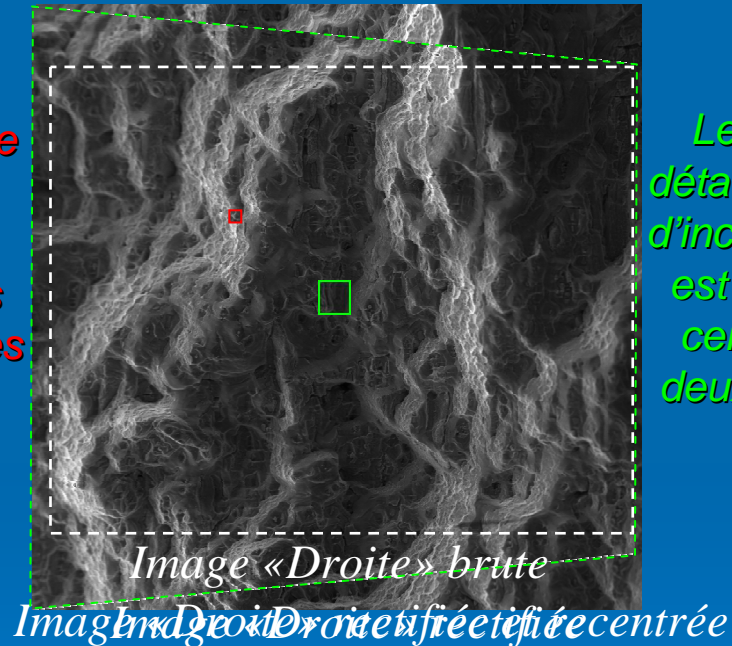
# Reconstruction de surface à partir d'images de Microscopie Électronique à Balayage

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

➔ Réduction importante du temps de calcul. (~1 mn - 1024x1024)

- Amplitude Recherche limitée
- Procédure d'appariement avec une contrainte d'ordre

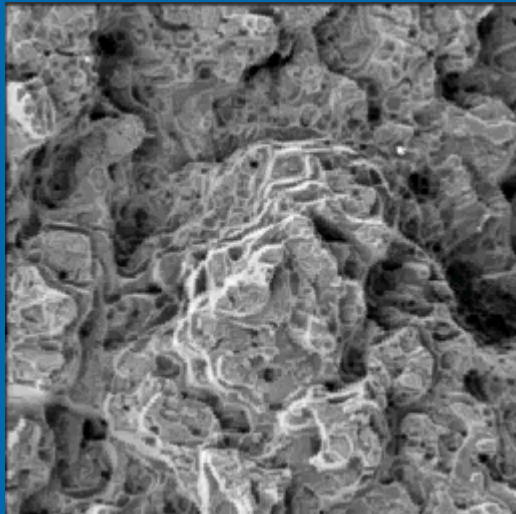


Réduction du risque  
d'appariements erronés

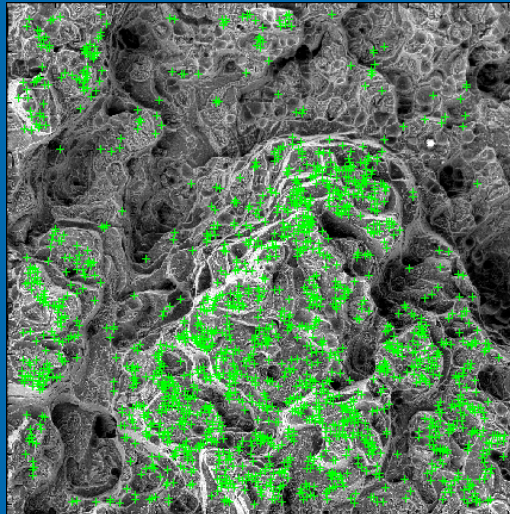
# Reconstruction de surface à partir d'images de Microscopie Électronique à Balayage

## Mesure des disparités

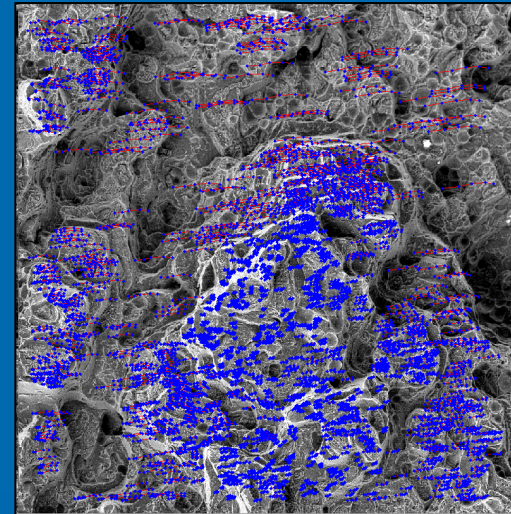
Approche par corrélation ligne à ligne plus sophistiquée  
**Rectification des images selon une procédure d'autocalibration.**



*Série de 5 images minimum.*  
ici 5: (-10°, -5°, 0°, 5°, 10°)



*Sélection de points épars*



*Suivi des points épars*

### Procédure d'autocalibration

**Récupération du mouvement et de la topographie de la surface (rotation, translation)**

→ **Tolérance accrue dans la procédure d'acquisition**

**Mise en correspondance de tous les points après rectification des images**

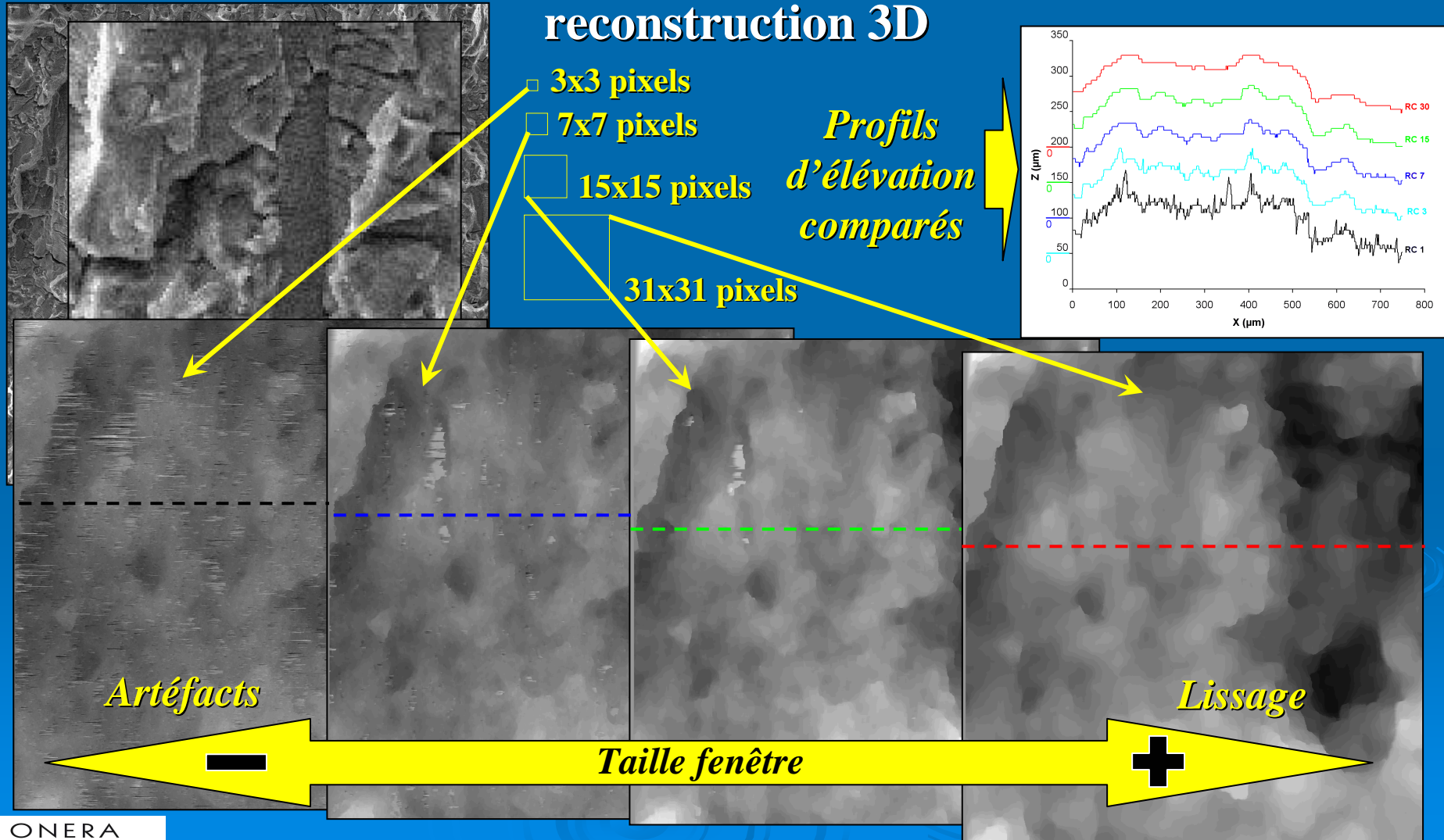
→ **Limitation des faux appariements et des occultations.**

**Temps de traitement significativement accru**

# Reconstruction de surface à partir d'images de Microscopie Électronique à Balayage

## Mesure des disparités

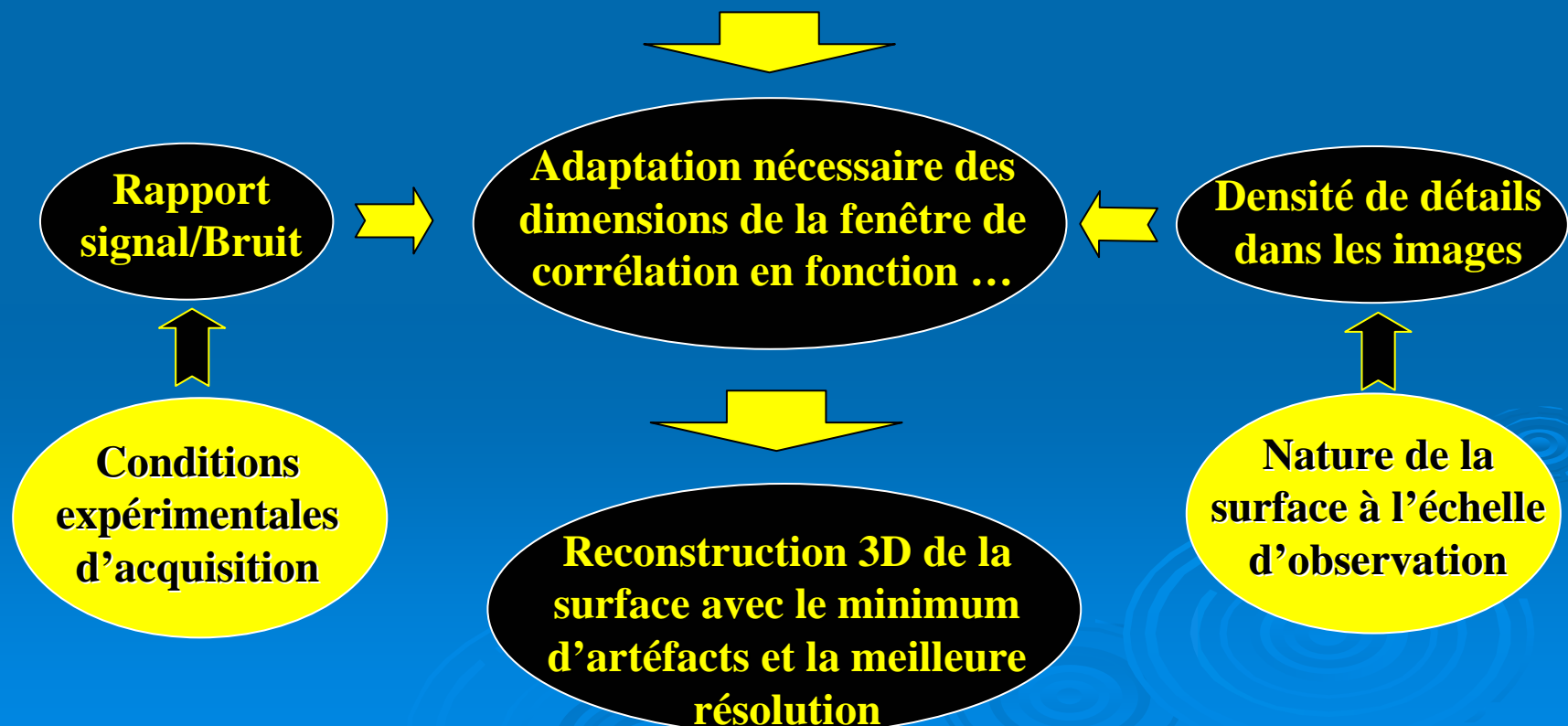
### Influence des dimensions de la fenêtre de corrélation sur la reconstruction 3D



# Reconstruction de surface à partir d'images de Microscopie Électronique à Balayage

## Mesure des disparités Influence des dimensions de la fenêtre de corrélation

**Recherche compromis entre  
Efficacité de corrélation et Résolution**



# Reconstruction de surface à partir d'images de Microscopie Électronique à Balayage

## Exemples d'application

Superaliage (Ni) protégé

Surface après écaillage

Barrière Thermique

Acquisition

Grandissement: x500

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

Inclinaisons:  $-10^\circ$  &  $+10^\circ$

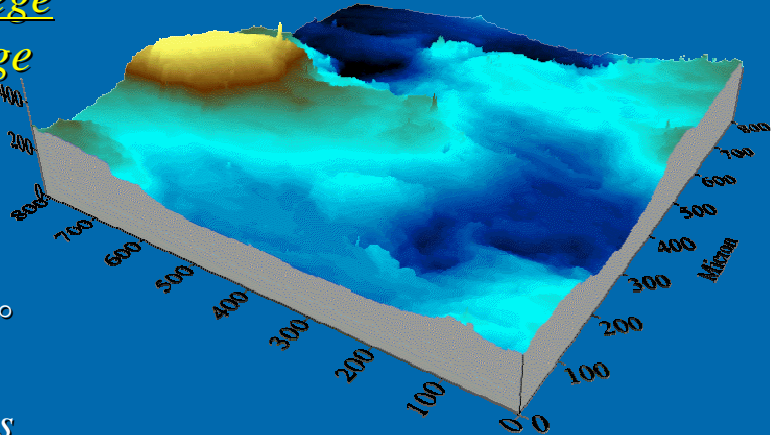
Signal: SE

Images  $1024 \times 1024$  pixels

Résolution  $\Delta Z = 0.50 \mu\text{m}$

Fenêtr. Corrél. :  $9 \times 9$  pixels

Dénivelé =  $\sim 15 \mu\text{m}$



Alliage Aluminium

Surface de rupture par  
propagation de fissure

Acquisition

Grandissement: x100

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

Inclinaisons:  $-5^\circ$  &  $+5^\circ$

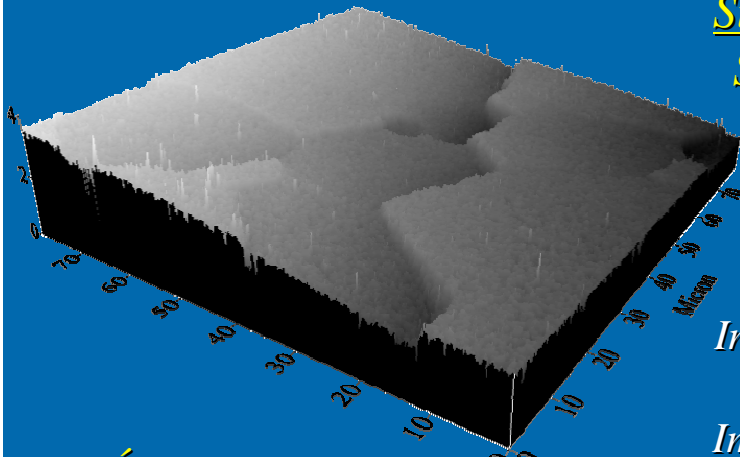
Signal SE

Images  $1024 \times 1024$  pixels

Résolution  $\Delta Z = 5.0 \mu\text{m}$

Fenêtr. Corrél. :  $5 \times 5$  pixels

Dénivelé =  $\sim 400 \mu\text{m}$



Éprouvette Base Ni

Surface polie après  
essai de fluage

Acquisition

Grandissement: x1000

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

Inclinaisons:  $-20^\circ$  &  $+20^\circ$

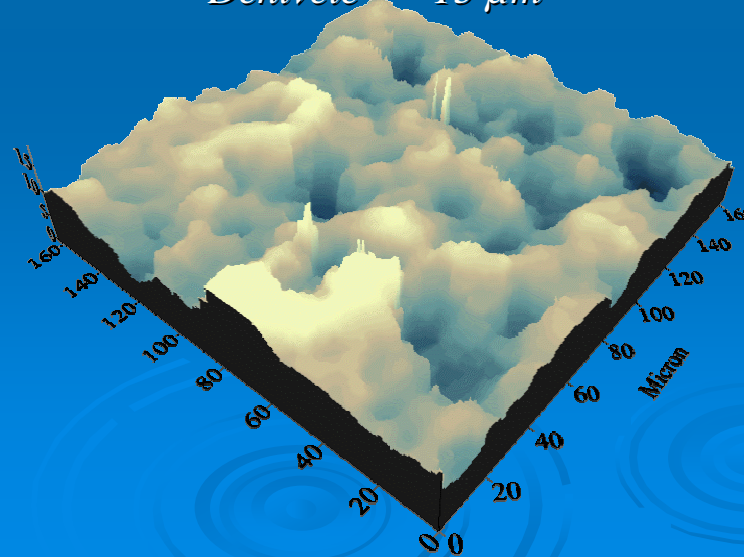
Signal: InLens

Images  $2048 \times 2048$  pixels

Résolution  $\Delta Z = 0.06 \mu\text{m}$

Fenêtr. Corrél. :  $5 \times 5$  pixels

Dénivelé =  $\sim 4 \mu\text{m}$

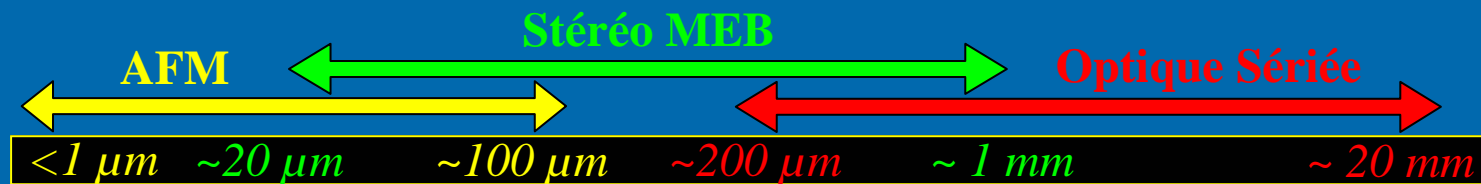


# Reconstruction de surface à partir d'images de Microscopie Optique Sériée

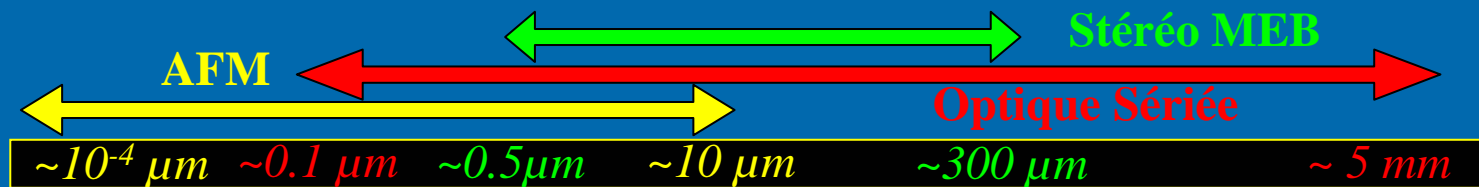
## Intérêt de la méthode

### Complémentarité avec les techniques Stéréoscopie MEB et AFM

- Champ d'observation (*Dimension Min-Max Coté*)



- Dénivelé (*Amplitude Min-Max*)



- Mise en œuvre expérimentale

	<b>Imagerie Optique Sériée</b>	<b>Stéréoscopie MEB</b>	<b>AFM</b>
<b>Repérage</b>	Délicat (Faible profondeur de champ)	Aisé	Difficile
<b>Acquisition</b>	Aisée	Rigueur expérimentale	Parfois délicate

# Reconstruction de surface à partir d'images de Microscopie Optique Sériée

Rappel du principe général de la méthode

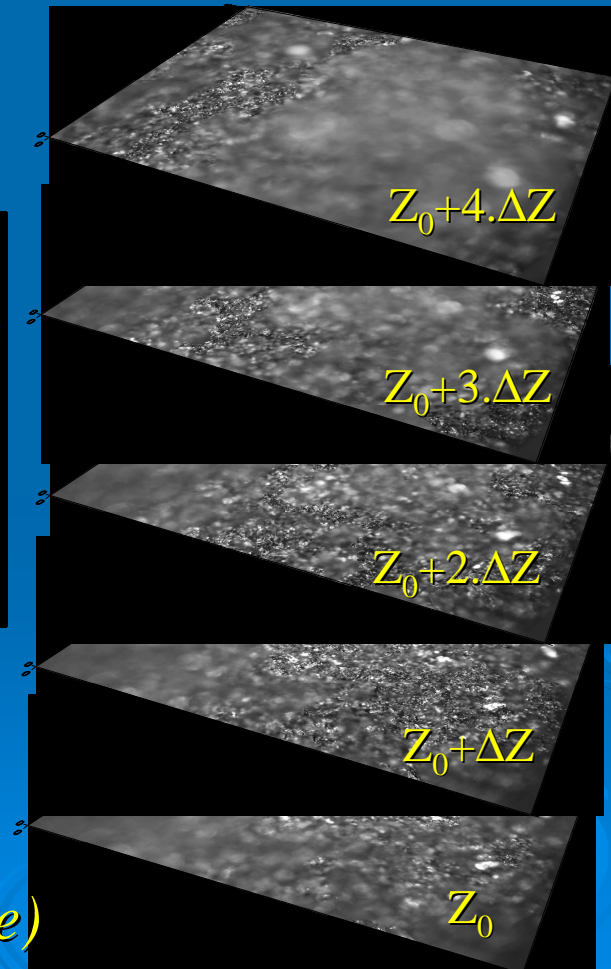
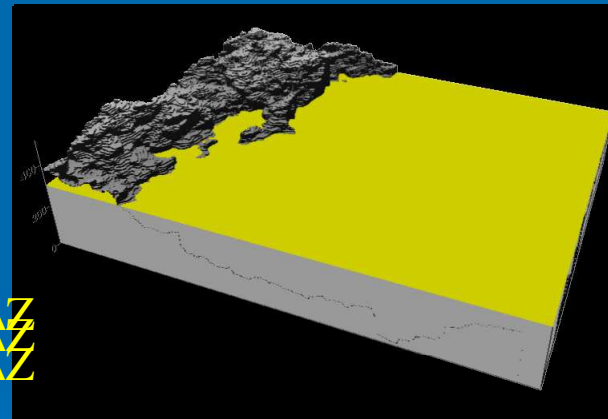
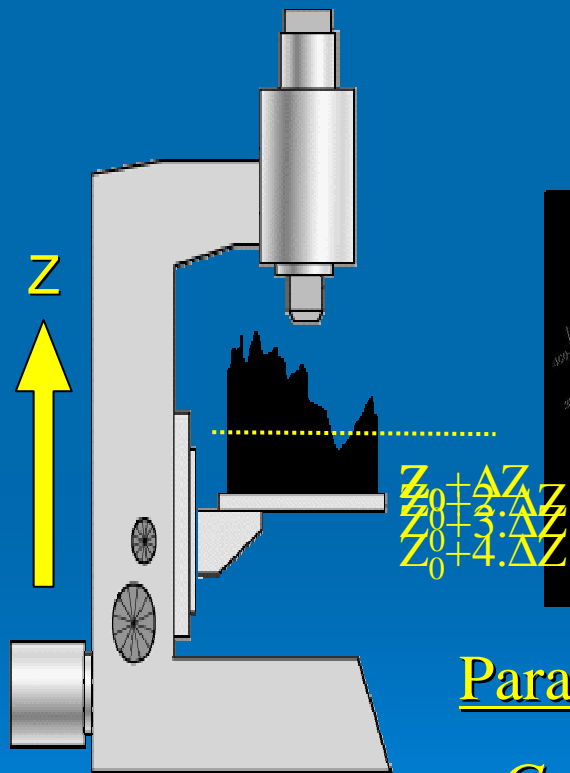
## Deux Étapes principales

1. Acquisition une série d'images à distance Echantillon-Objectif variable pas à pas.
2. Identification des pixels « les plus au point » dans la série d'images pour leur attribuer une altitude  $Z$ .

→ Reconstruction dense de la surface

# Reconstruction de surface à partir d'images de Microscopie Optique Sériée

## Acquisition de la série d'images du même champ



### Paramètres expérimentaux

- *Grossissement-Objectif*
- *Pas  $\Delta Z$  (platine motorisée)*

# Reconstruction de surface à partir d'images de Microscopie Optique Sériée

## Principe de la détermination des altitudes en chaque pixel

*Détermination de l'indice de netteté maximum dans la série d'images, calculé dans une fenêtre  $F_L$  de taille paramétrable.*

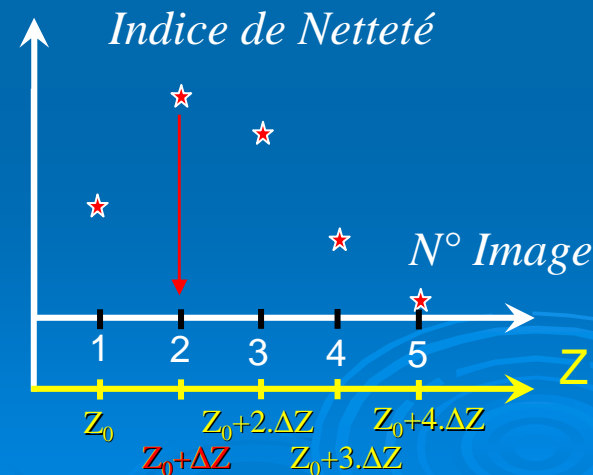
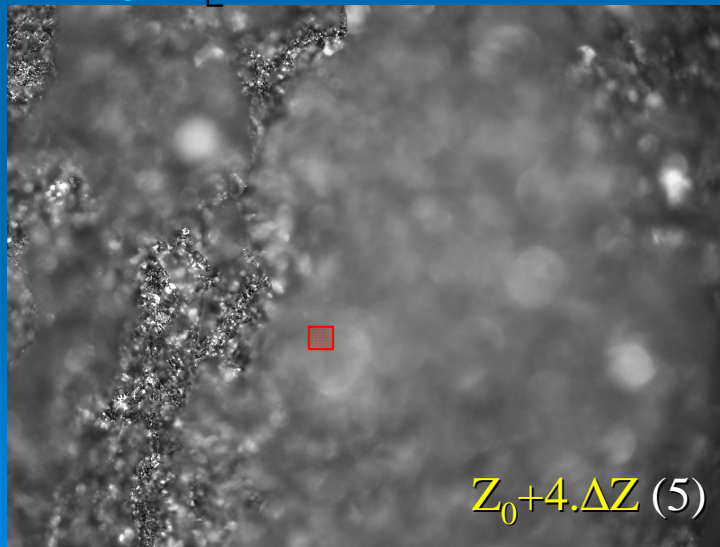
**Indice de Netteté :**  $\sim$  Laplacien  $\Delta$  sur une fenêtre carrée  $N \times N$  pixels ( $N$  Impair)

$$\Delta = \sum_{i=1, j=1}^{N, N} \underbrace{I_{i,j}}_{\text{Intensité du pixel}} \left[ (N \times N) \delta(i, j, (N+1)/2) - 1 \right]$$

$\underbrace{\delta(i, j, (N+1)/2)}_{\substack{= \dots 1 \dots \text{si} \dots i=j=(N+1)/2 \\ = \dots 0 \dots \text{ailleurs}}}$



Exemple des coefficients sur une fenêtre  $F_L$   $3 \times 3$  :

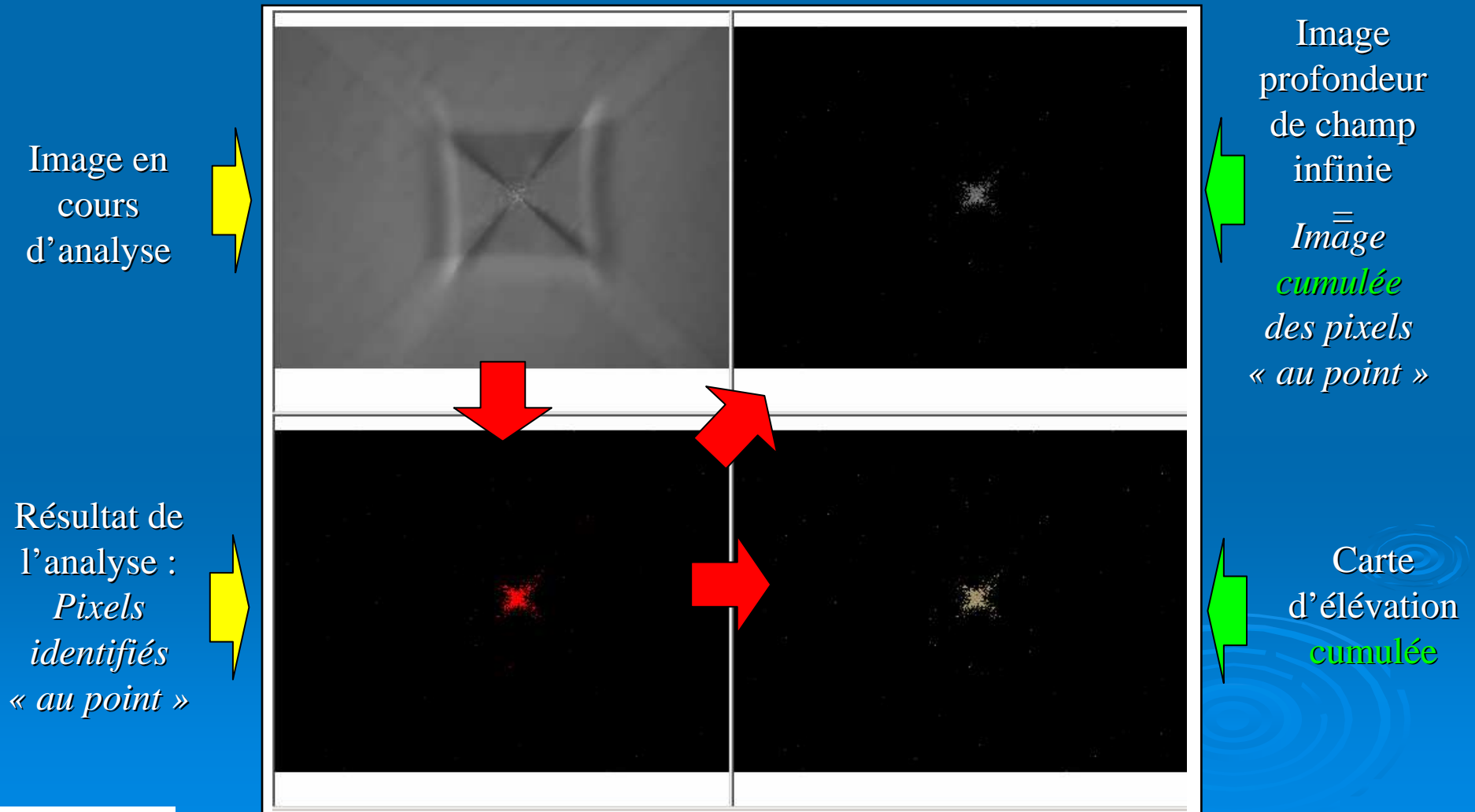
$$\begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$


**Indice Maximum  $\rightarrow$  Altitude  $Z$**

# Reconstruction de surface à partir d'images de Microscopie Optique Sériée

## Principe de la reconstruction 3D

### *Processus séquentiel de traitement de la série d'images*



# Reconstruction de surface à partir d'images de Microscopie Optique Sériée

## Principe de la reconstruction 3D

### *Processus séquentiel de traitement de la série d'images*

Image en  
cours  
d'analyse

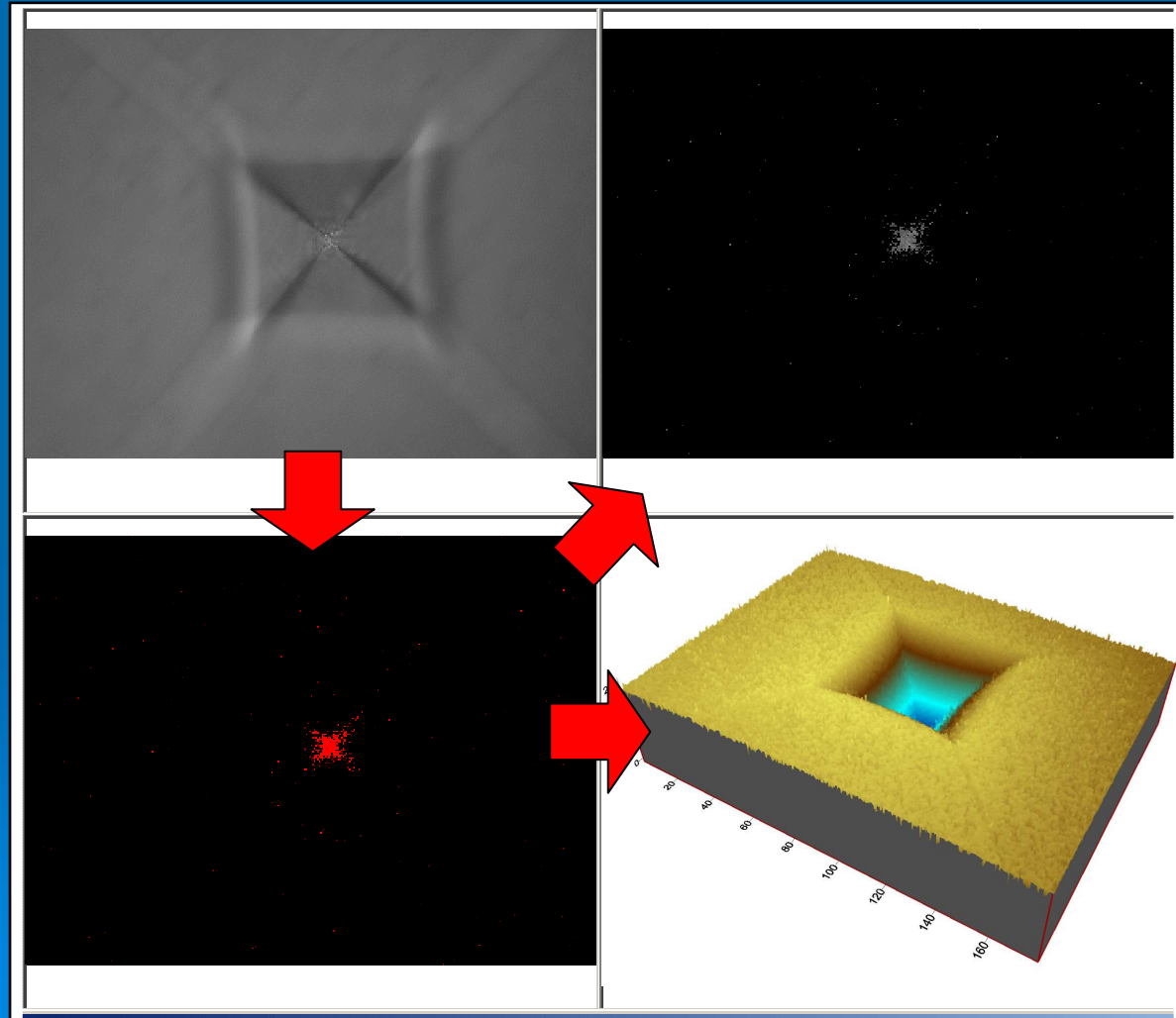


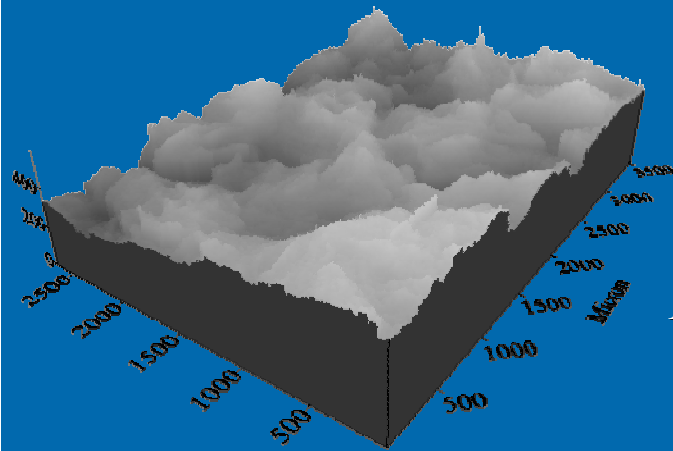
Image  
profondeur  
de champ  
infinie  
*Image*  
*cumulée*  
des pixels  
« au point »

Résultat de  
l'analyse :  
*Pixels*  
*identifiés*  
« au point »

Carte  
d'élévation  
*cumulée*

# Reconstruction de surface à partir d'images de Microscopie Optique Sériée

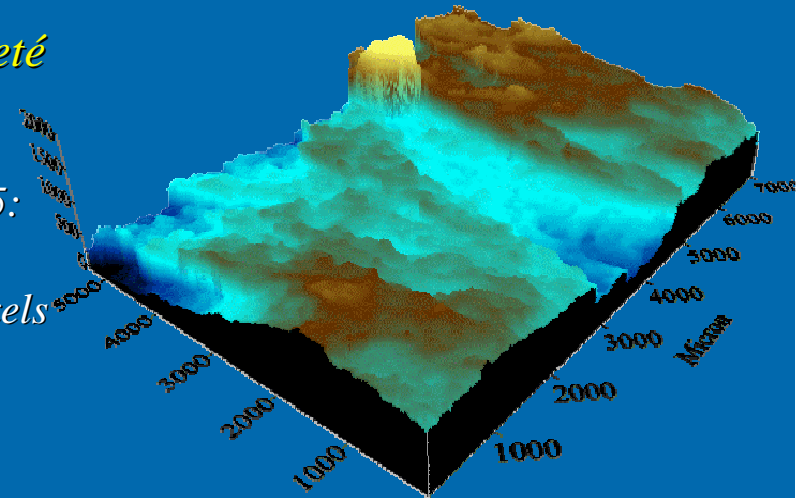
## Exemples d'application



### *Empreinte Microdureté*

#### Acquisition

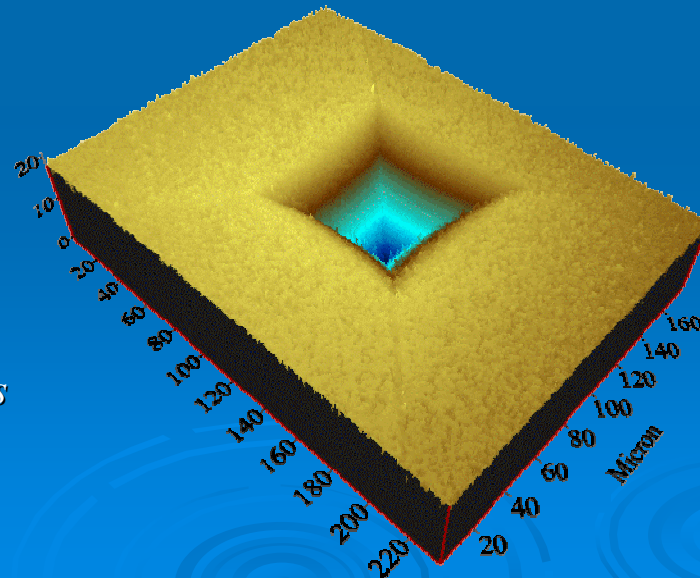
Objectif x50 + Zoom x1.5:  
Champ 235 x 180  $\mu\text{m}^2$   
157 Images 2040x1536 pixels  
(491 Mo)  
Pas  $\Delta Z = 0.2 \mu\text{m}$   
Dénivelé = 31  $\mu\text{m}$



### *Faciès de rupture (Alliage TiAl)*

#### Acquisition

Objectif x5:  
Champ 3.5 x 2.5  $\text{mm}^2$   
148 Images 1350x1024 pixels  
(205 Mo)  
Pas  $\Delta Z = 5 \mu\text{m}$   
Dénivelé = 739  $\mu\text{m}$



### *Faciès rupture (Acier)*

#### Acquisition

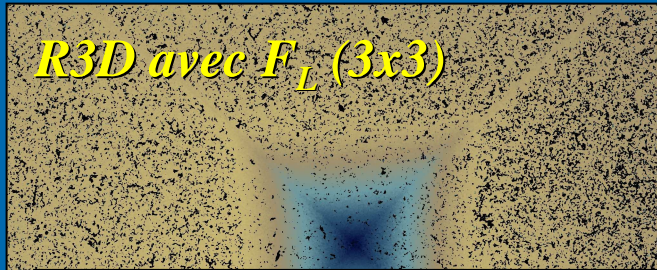
Objectif x2.5:  
Champ 7 x 5  $\text{mm}^2$   
600 Images 2040x1536 pixels  
(1.9 Go)  
Pas  $\Delta Z = 5 \mu\text{m}$   
Dénivelé = 3 mm

# Reconstruction de surface à partir d'images de Microscopie Optique Sériée

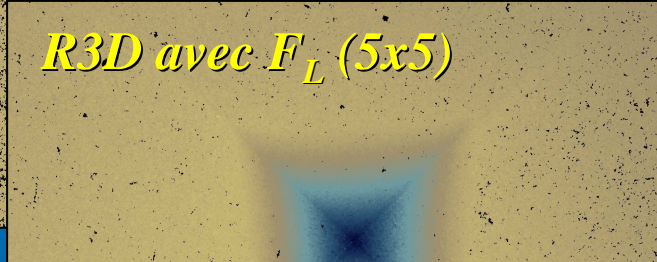
Influence de la Taille fenêtre  $F_L$  (Calcul indice de netteté)

Reconstruction 3D d'une empreinte de microdureté sur échantillon poli.

*R3D avec  $F_L$  (3x3)*



*R3D avec  $F_L$  (5x5)*



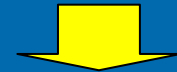
*R3D avec  $F_L$  (9x9)*



Présences de zones noires:

Zones uniformes à l'échelle de la fenêtre 3x3,  
sans maximum de l'indice de netteté  
→ Zones d'altitude non renseignées  
= « Trous »

Augmentation de la taille de fenêtre



- Variation plus probable d'intensité dans la fenêtre  
→ Probabilité accrue d'un indice de netteté Max.

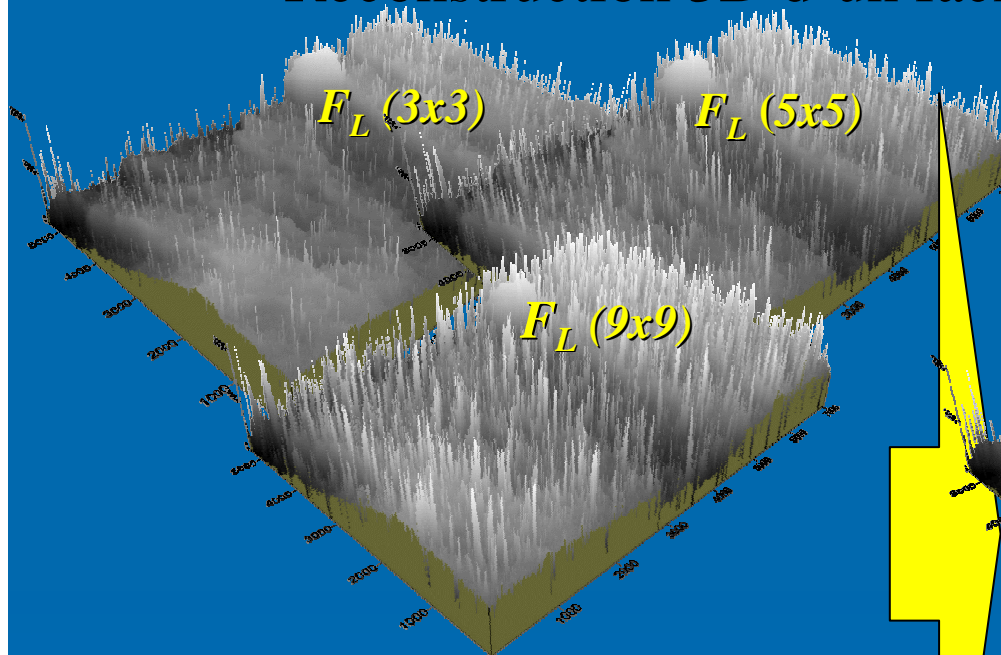


Réduction significative des « Trous »

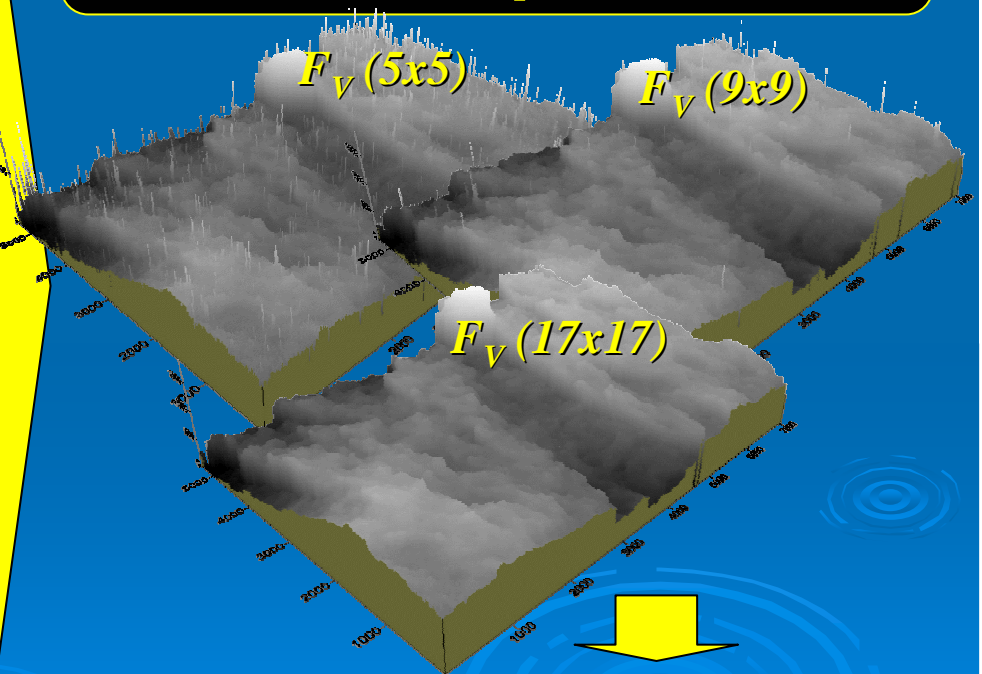
# Reconstruction de surface à partir d'images de Microscopie Optique Sériée

Influence de la Taille de fenêtre  $F_L$  (Calcul indice de netteté)

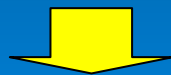
Reconstruction 3D d'un faciès de rupture d'un acier.



Filtrage passe-bas  
(Filtre de voisinage sur une fenêtre  $F_V$   
carrée de taille paramétrable)



Augmentation de la taille de fenêtre  $F_N$



Augmentation des artefacts  
de reconstruction

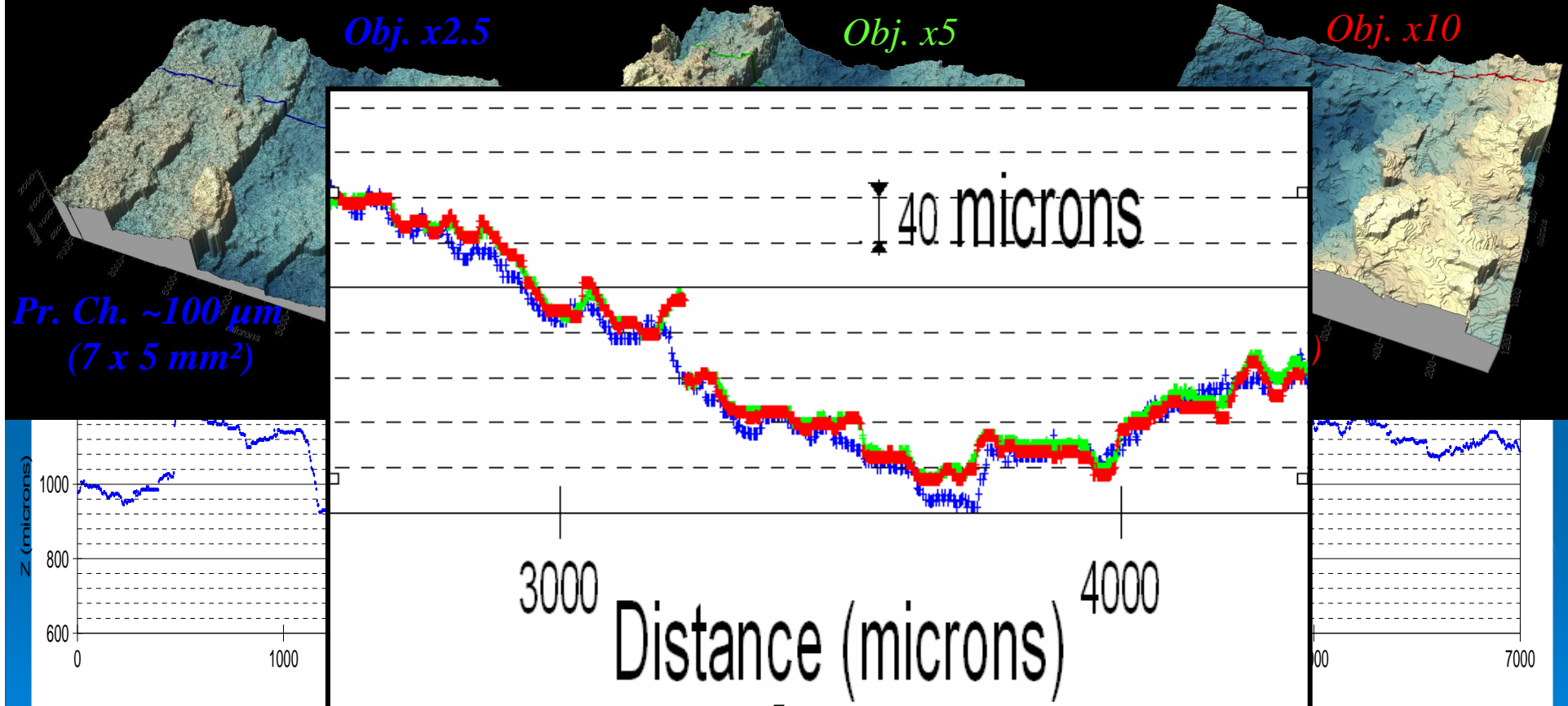
Réduction / Elimination  
des artefacts de reconstruction

# Reconstruction de surface à partir d'images de Microscopie Optique Sériée

Influence du paramètre « Objectif » - (Grossissement et Profondeur de Champ)

*Premier test: Faciès de rupture d'un acier*

*Pas  $\Delta Z$  de  $5\mu\text{m}$  < Profondeur de champ Nominale*



**Sensibilité de la méthode de reconstruction  
5 à 10 fois meilleure que la profondeur de champ nominale**

# Interprétation / Exploitation des reconstructions 3D

Attention aux post-traitements automatiques (invisibles ?)  
des données brutes !

Reconstruction 3D  
Brute



Filtrage  
Passe-bas



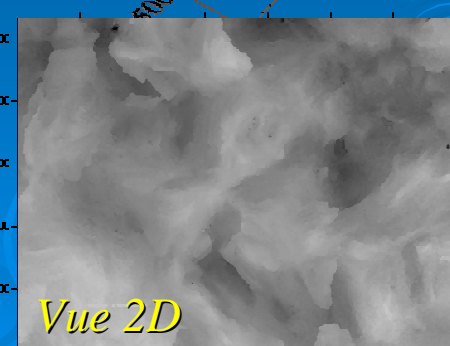
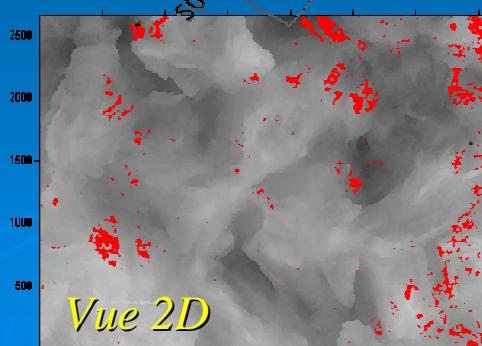
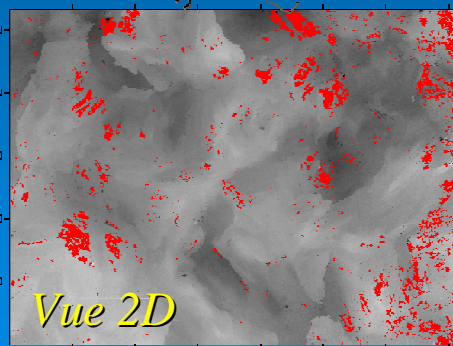
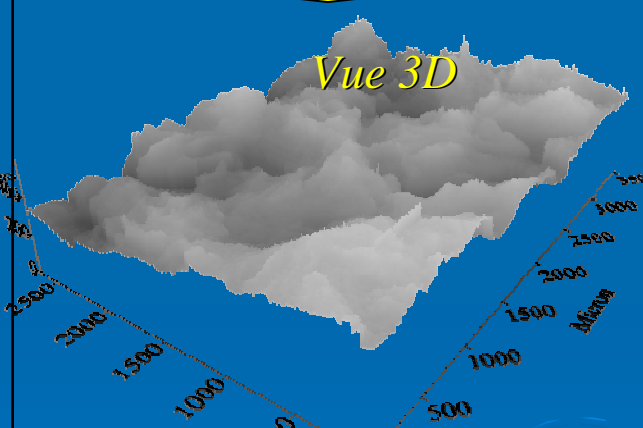
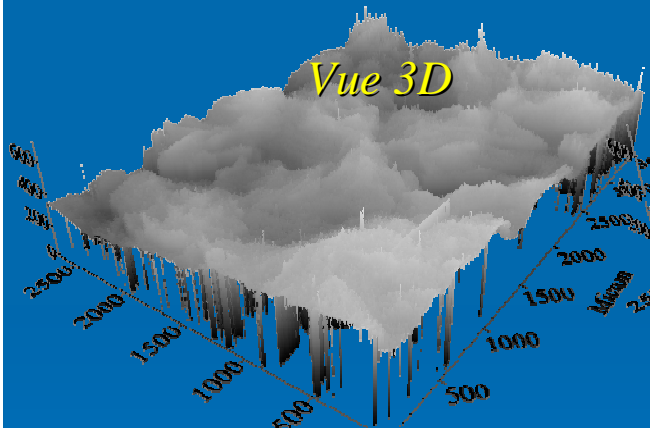
Interpolation  
dans les « trous »

Artéfacts de reconstruction

Trous de reconstruction

Filtrage des Artéfacts  
Réduction des « trous »

Remplissage des « trous »



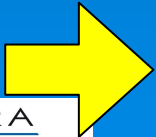
# Comparaison des deux méthodes

## Analogie

- Nécessité d'un signal significatif à l'échelle du pixel
  - *Optimisation des paramètres expérimentaux d'acquisition*
- Processus de traitement basé sur l'utilisation de « fenêtres » de tailles à optimiser
  - *Recherche compromis entre Résolution et Minimum d'artéfacts*
- Présence possible de zones occultées non traitées (*Image obtenue par projection sur un plan image*)
- Utilisation de post-traitements des données brutes (*filtrage, interpolation*)

## Différences (*Applications*)

- Domaine d'application
  - Champ d'analyse , Amplitude rugosité, Résolution altimétrique
  - Résolution latérale (*limitée en optique - Meilleure au MEB*)
  - Type échantillons (*Caractérisation isolants sans difficultés en Optique, délicate en MEB*)
- Mise en œuvre (*Plus rapide et moins délicate en Optique qu'au MEB*)



2 méthodes de caractérisation 3D de surface complémentaires