



Bordeaux 3-7 juillet 2017

C14

ECOLE D'ÉTÉ GN-MEBA

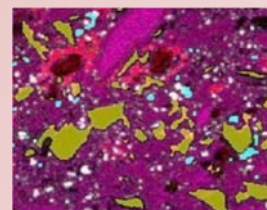
Microscopie Electronique à
Balayage et Microanalyses

ANALYSE D'IMAGES MEB

Jean-Marc CHAIX



CNRS, Grenoble INP



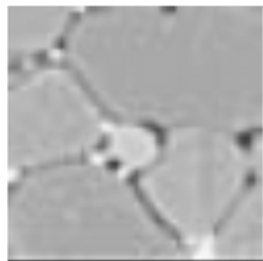
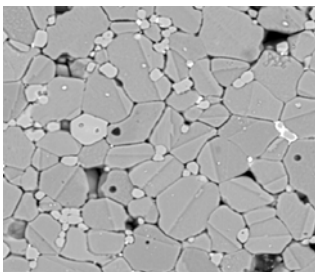
Traitement et analyse d'images

- **Saisie et le codage des images**
 - transformation d'un objet analogique bidimensionnel en un tableau de nombres que peut traiter l'ordinateur
- **Traitement d'images**
 - transformation des images en d'autres images mettant en exergue certaines informations
- **Analyse d'images**
 - extraction de renseignements quantitatifs (nombres, courbes) sur les images : proportions de phases, des tailles moyennes, etc.

Caractéristiques des images numériques

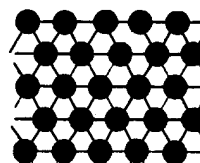
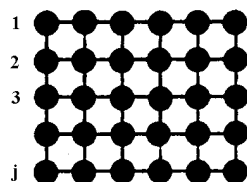
Image numérisée

- Niveaux de gris : tableau de nombres



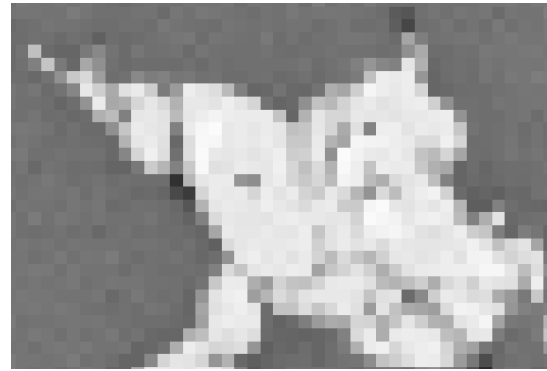
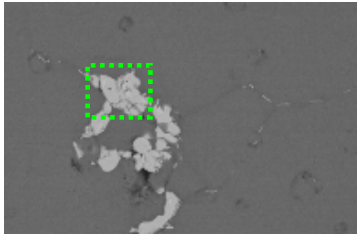
100	180	220	210	160
250	105	106	176	194
174	80	5	102	175
120	97	76	180	220
119	118	117	245	175

- Trame carrée, trame hexagonale



Les pixels sont-ils des carrés ?

- zoom numérique



logiciel de traitement d'images (Aphelion ADCIS)

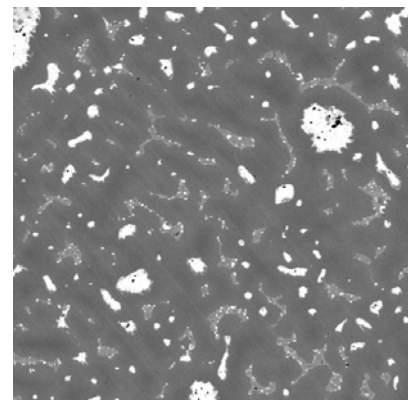
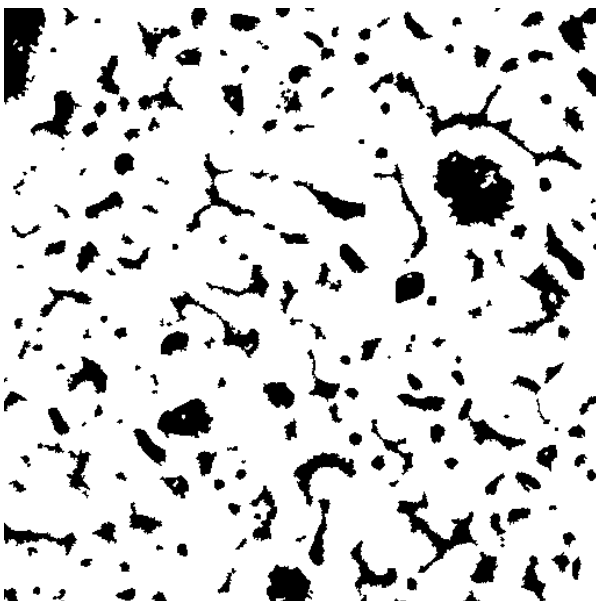


Logiciel « de visualisation » (Word, powerpoint)



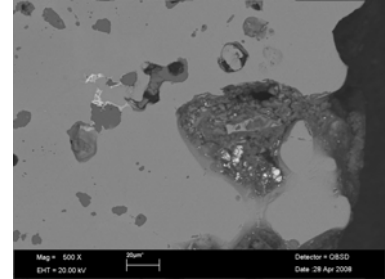
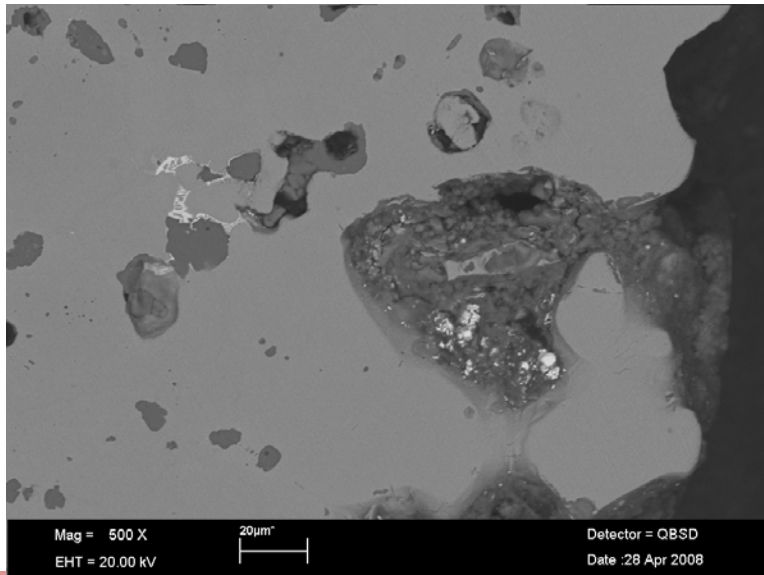
Image binaire

- 2 niveaux « de gris »



Grandissement ?

- Grandissement = repère arbitraire
- « Taille » de pixel ? **Distance entre pixels**
→ adaptée à la taille de sonde
- Barre d'échelle



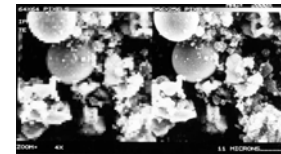
Fichiers d'images

- Formats et compression
 - « bitmap »: BMP, TIFF : autant d'octets que de pixels
 - Lourd, mais toute l'information
 - Compressés : Jpeg, png
 - Petits fichiers, informations perdues non contrôlées
- Informations pas toujours incluses ou lisibles
 - Taille d'image en μm
 - Taille de pixel,
 - Conditions d'acquisition MEB
 - ...



Acquisition d'images : quelle résolution ?

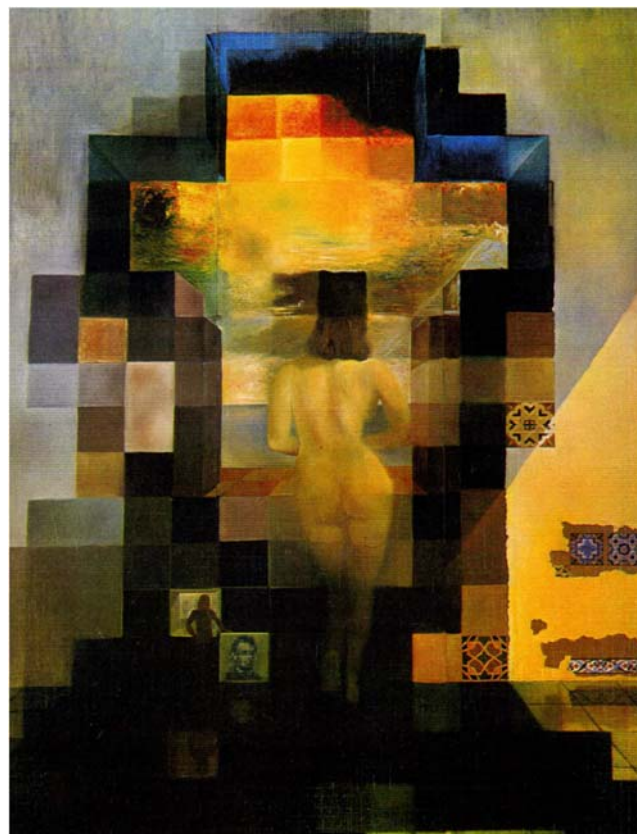
- Echantillonnage (Norton, Shannon, Nyquist)
 - Fréquence d'échantillonnage = 2 X fréquence la plus élevée...
qui vous intéresse !



Laquelle de ces images est la meilleure ?

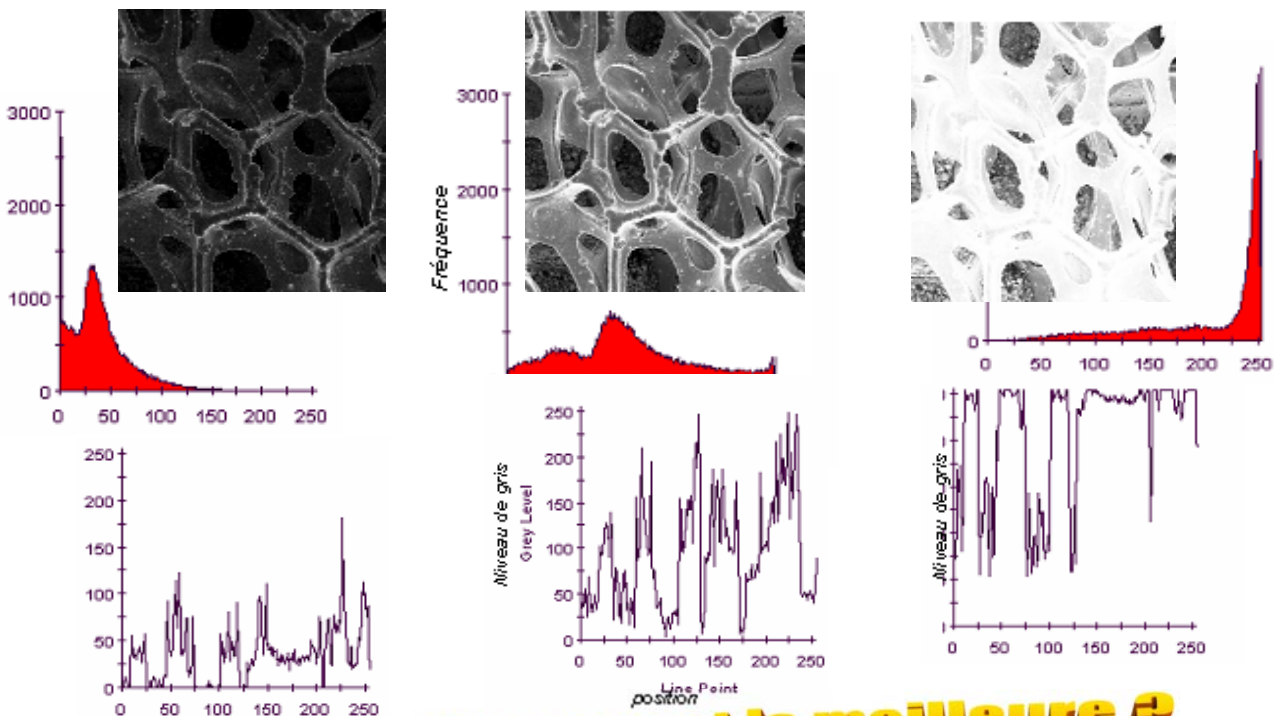


Résolution : Dali et les pixels...



Acquisition d'images : quelle calibration des intensités?

- Ajuster l'intensité du signal MEB aux niveaux de gris disponibles



Laquelle de ces images est la meilleure ?

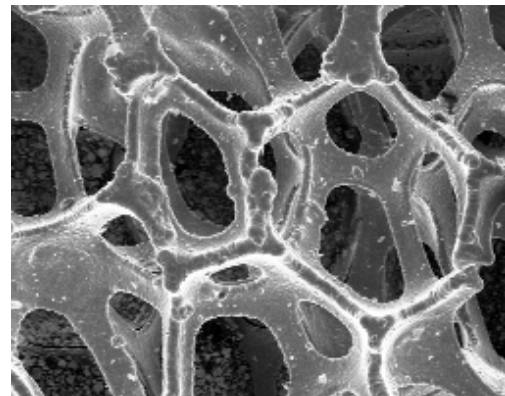
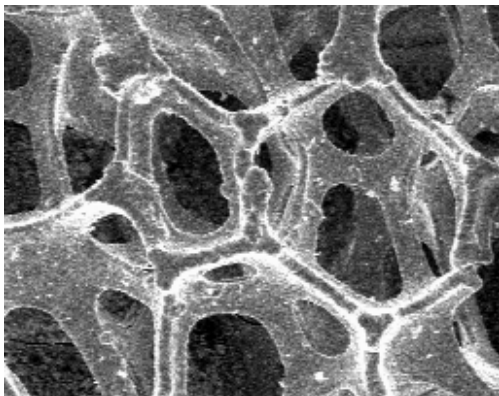


Ecole d'été GN-MEBA - Bordeaux 2017

13

Acquisition des images : bruit

- Origine : fluctuations aléatoire de comptage
 - Bruit « poissonien » $N = \sqrt{S}$
 - Rapport signal/bruit $\frac{S}{N} = \sqrt{S}$
- Remèdes $S = \frac{dS}{dt} \Delta t$
 - Augmenter le signal
 - Augmenter le temps d'acquisition (beaucoup !)



Ecole d'été GN-MEBA - Bordeaux 2017

14

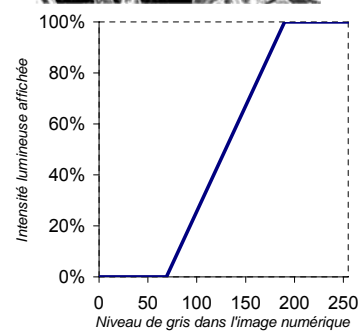
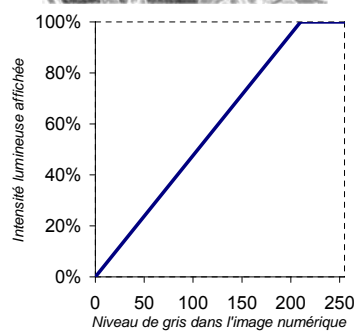
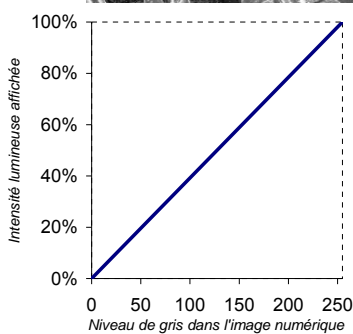
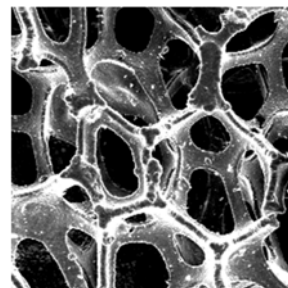
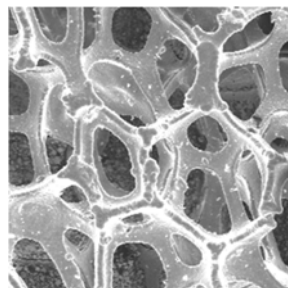
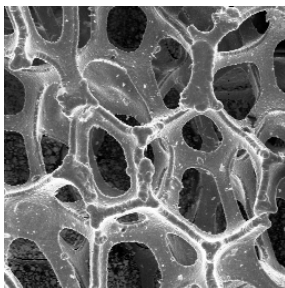
Transformation des images

Traitement d'image



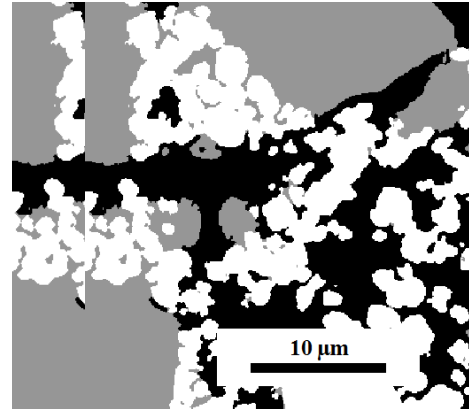
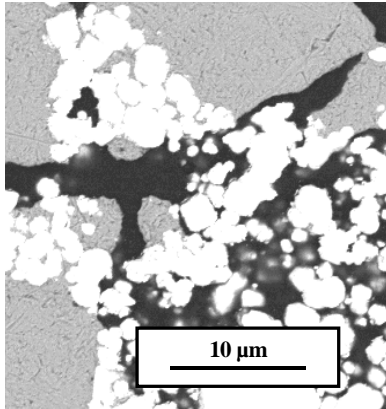
Modifier les intensités

- LUT ou transformation en mémoire
 - contraste, brillance...



Segmentation

Extraction des objets ou phases pertinents de l'image



Segmentation : seuillage

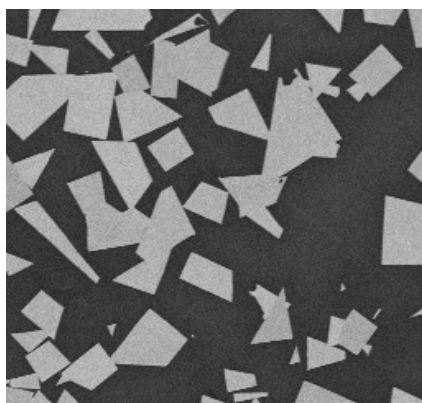


Image en niveaux de gris

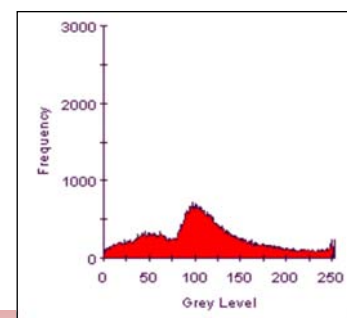


Image binaire (support usuel des mesures)

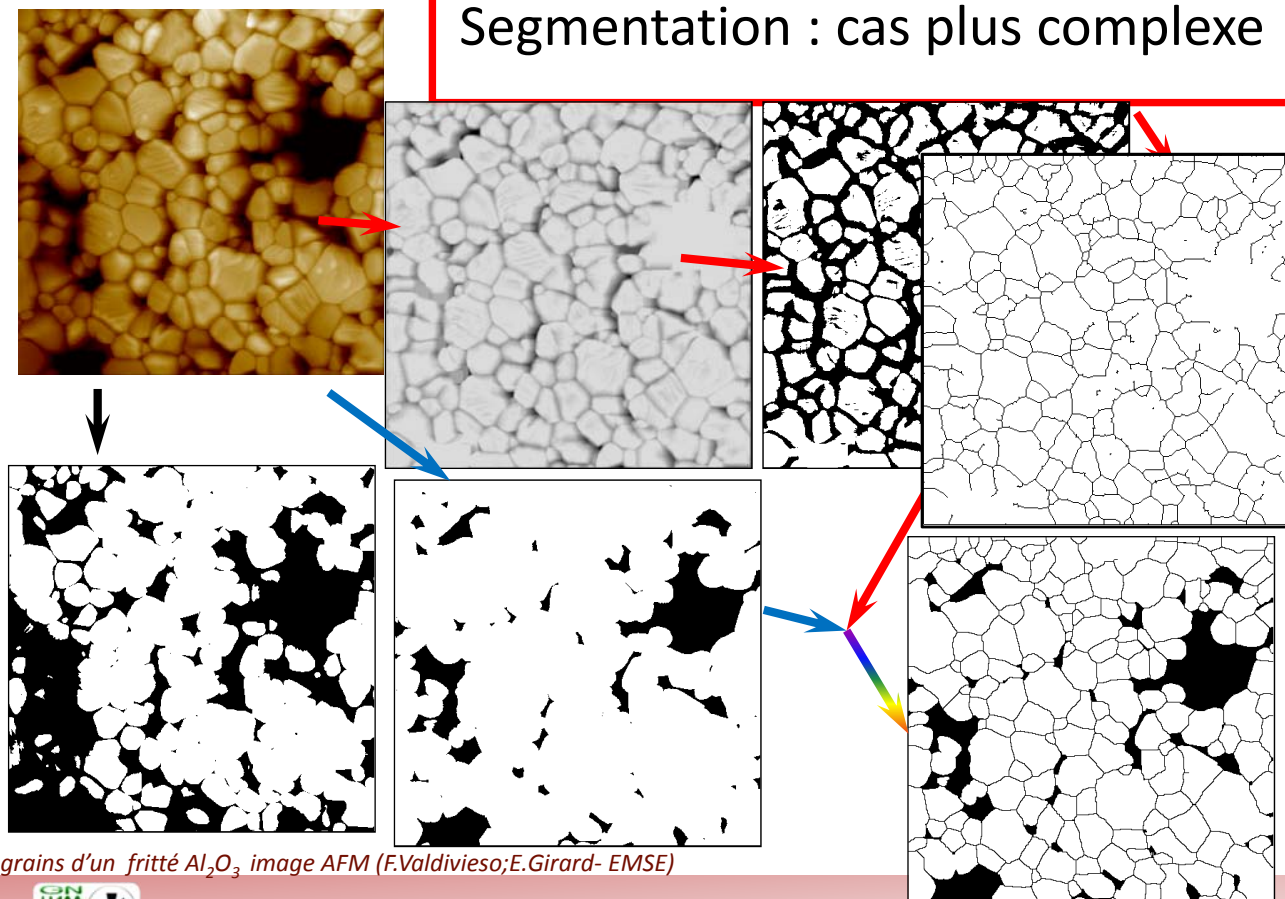
seuillage à partir de l'histogramme des niveaux de gris :

pixels dont le niveau est compris entre 2 seuils

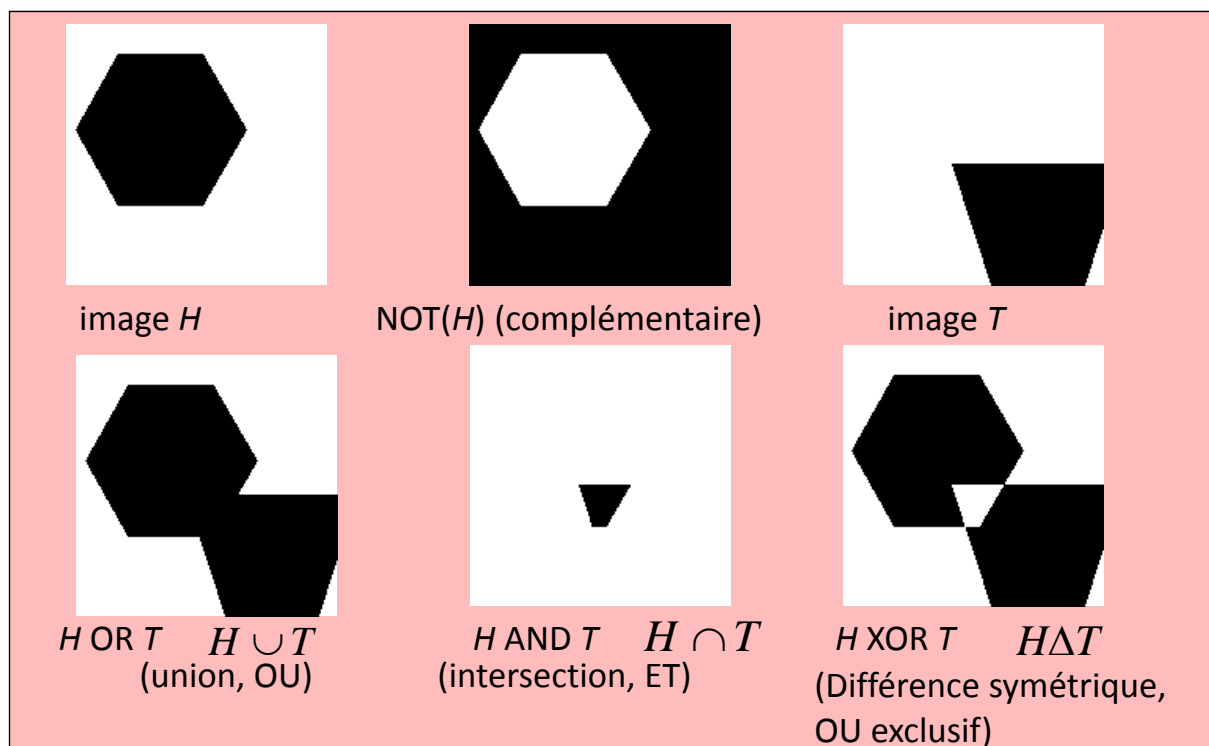
(manuel ou automatique)



Segmentation : cas plus complexe



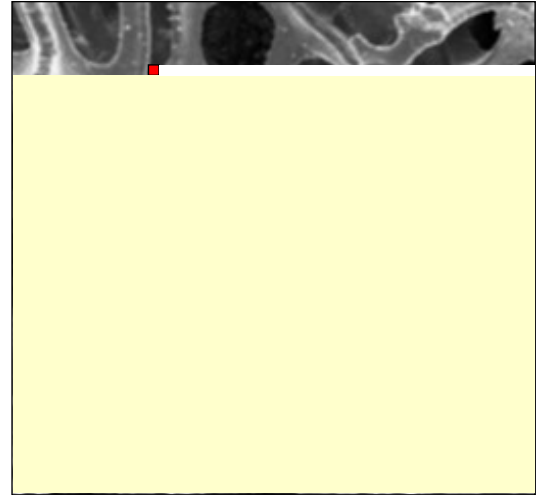
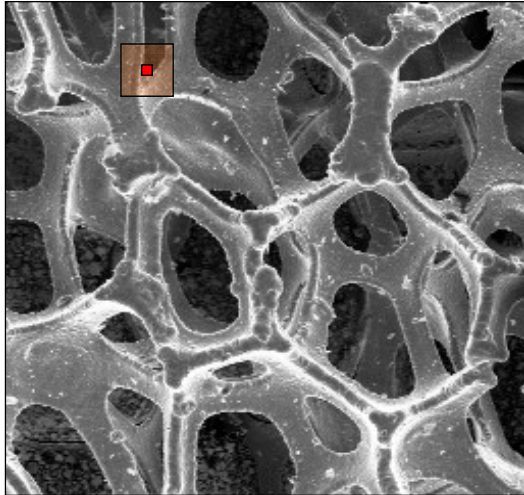
Opérations logiques (images binaires)



Filtrage numérique

Filtrage linéaire (convolution) : principe

- Transformer l'image en fonction du voisinage de chaque point
- valeur sur la nouvelle image : moyenne pondérée des points voisins
- coefficients de pondération : « filtre », noyau (kernel)



Filtrage numérique

Filtrage linéaire (convolution)

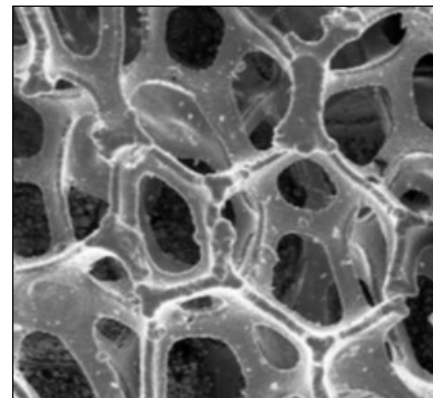
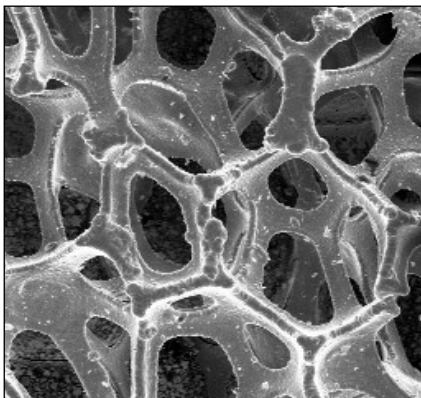
Passes-bas

1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9

→ « lissage » : élimination des hautes fréquences de l'image (bruit)

→ dégradation de la résolution (effet de flou)

(somme des coefficients = 1 => plage uniforme : valeurs inchangées)



Filtrage numérique

Filtrage linéaire (convolution)

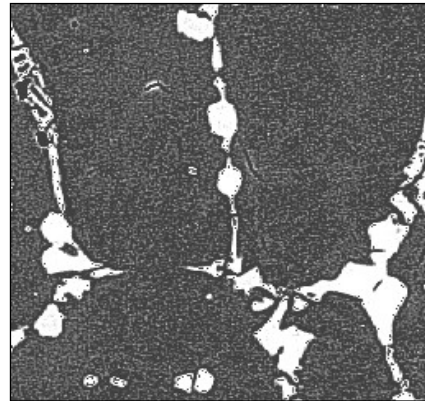
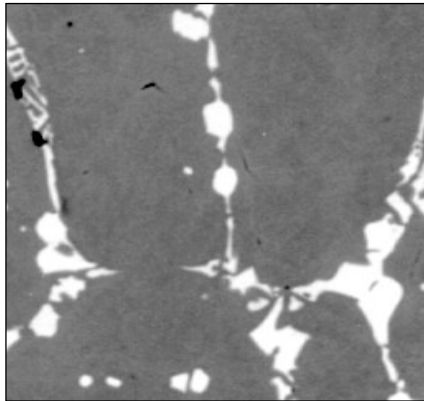
Passe-haut

-1	-1	-1
-1	9	-1
-1	-1	-1

→ accentuation des détails (contours des objets, joints de grains) : renforcement des hautes fréquences de l'image

→ accentuation du bruit !

(somme des coefficients = 1 => plage uniforme : valeurs inchangées)

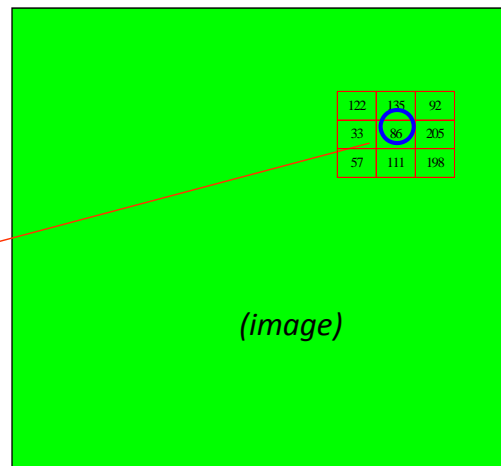


Filtrage numérique

Filtrage de rang

Principe : liste classée des valeurs du voisinage et choix d'une de ces valeurs

111	135	110
33	86	205
57	111	198



→ (33, 57, 86, 110, 111, 111, 135, 198, 205)

↓
Min.
(erosion)

↓
Médian

↓
Max
(dilatation)

Filtrage numérique

Filtrage de rang

Erosion : → érosion des parties claires (dilatation des parties sombres)

Dilatation → dilatation des parties claires (érosion des parties sombres)

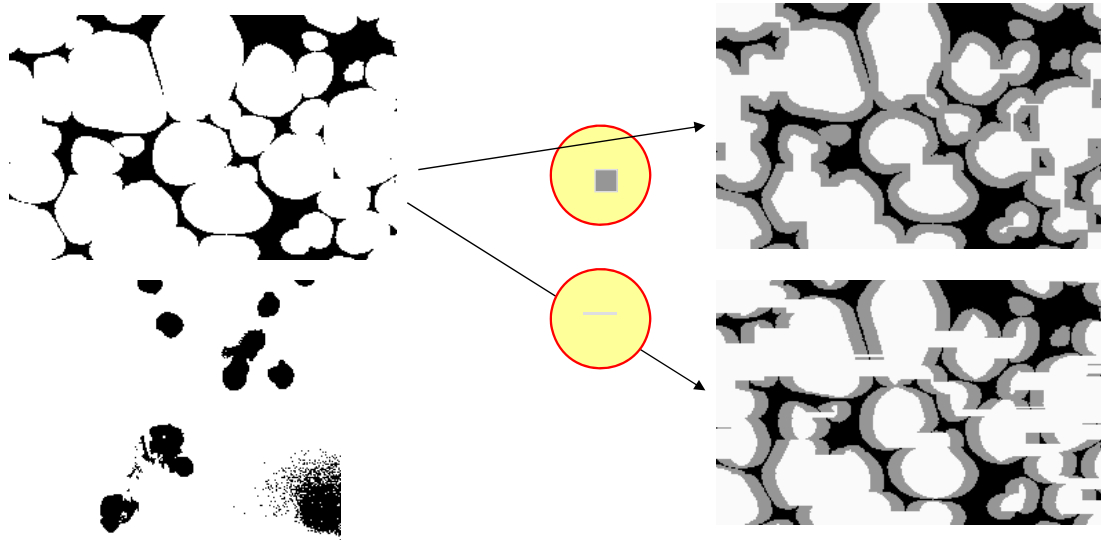
Médian → élimination des détails « sans flou »



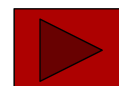
Morphologie mathématique binaire

Erosion, dilatation

Erosion $E(Y) = \{x | B_x \subset Y\}$ = « gomme sur le contour »



dilatation $D = \{x | B_x \cap Y \neq \emptyset\}$ « feutre sur le contour »

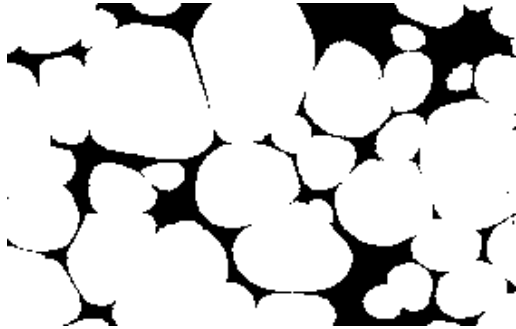


Morphologie mathématique binaire

Ouverture, fermeture

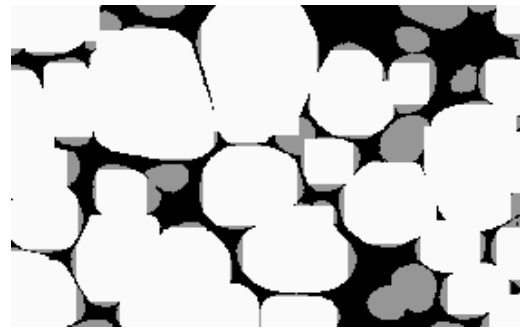
ouverture= érosion puis dilatation
(même élément structurant)

supprime tout ce qui ne peut pas
contenir l'E.S.



fermeture= dilatation puis érosion
(même élément structurant)

« remplit » tout ce qui ne peut pas
contenir l'E.S. dans l'image inverse



carré 10



linéaire 16

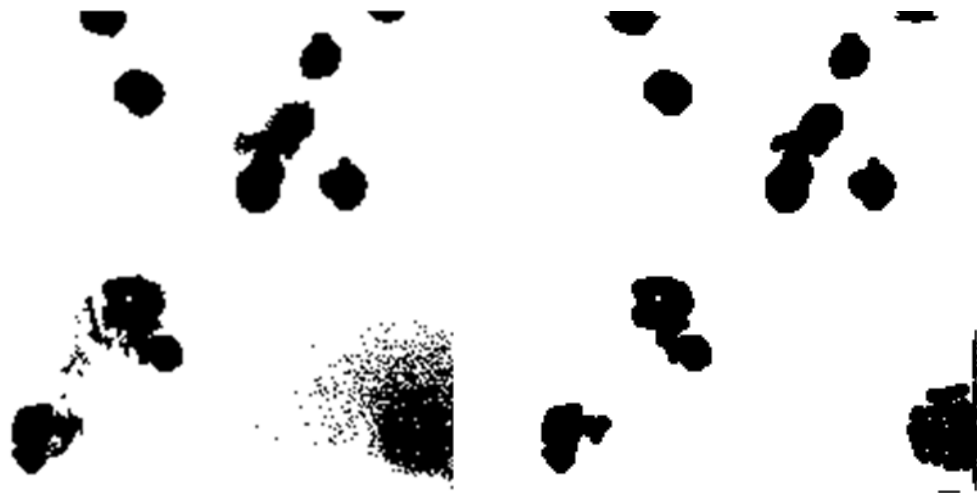


Morphologie mathématique binaire

Ouverture, fermeture, « nettoyage » des détails

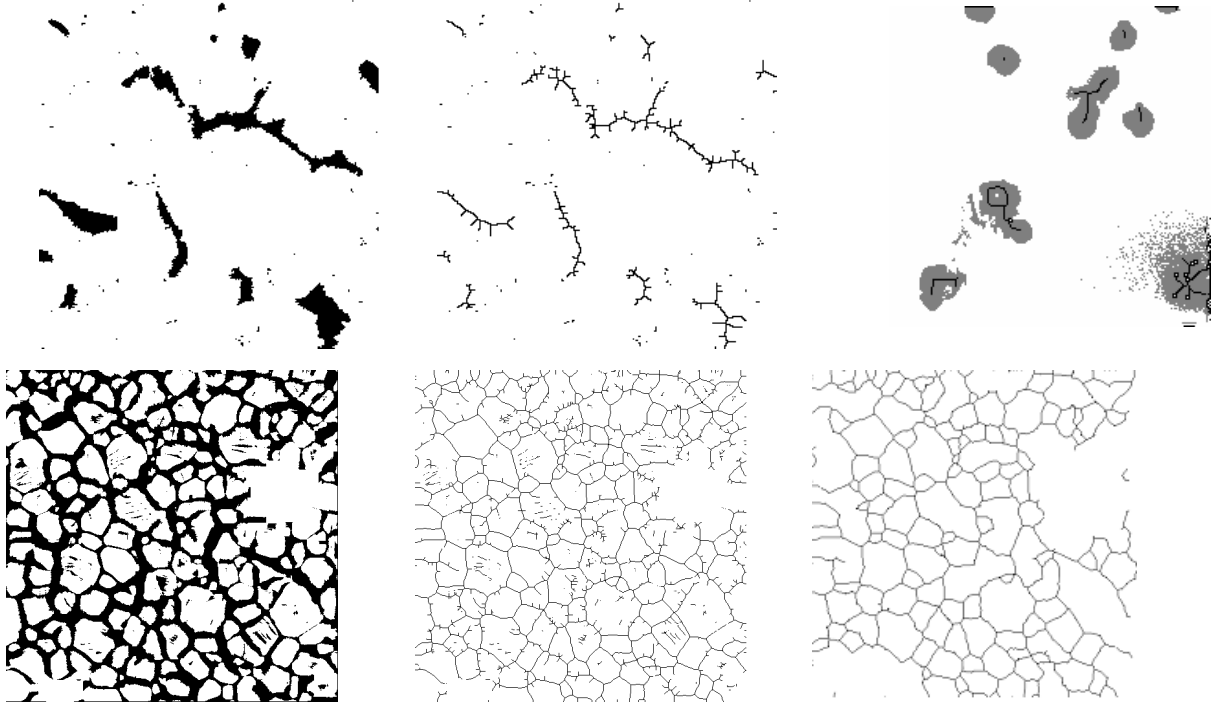
ouverture :

supprime tout ce qui ne peut pas
contenir l'E.S.



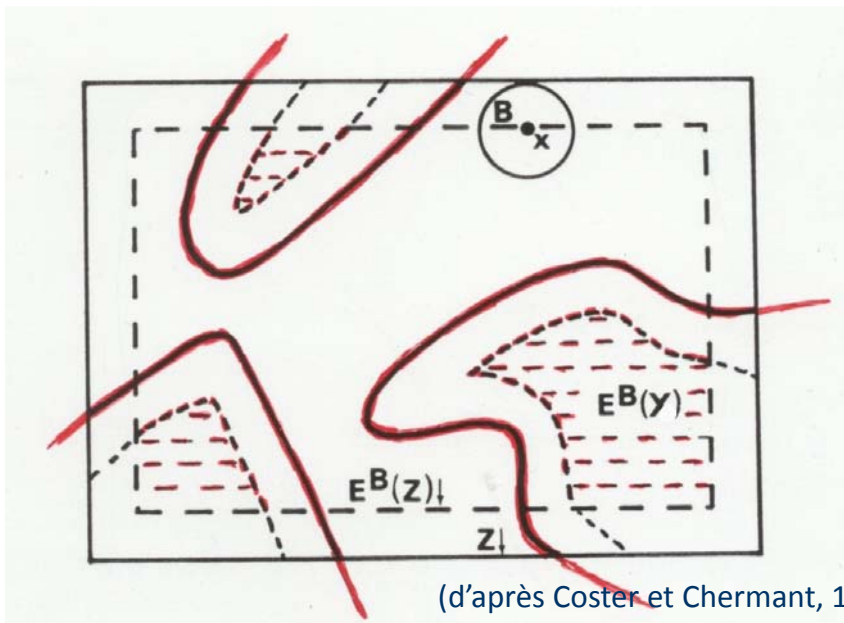
Morphologie mathématique binaire

Amincissement, squelette, squelette par zones d'influence



Théorème du masque de mesure

« Pour toute transformation « en tout ou rien » avec un élément structurant B , réalisée à l'intérieur d'un masque de mesure Z , le résultat n'est connu sans biais que dans le champ Z' obtenu en érodant Z par B »



(d'après Coster et Chermant, 1989)

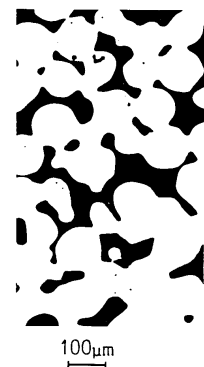
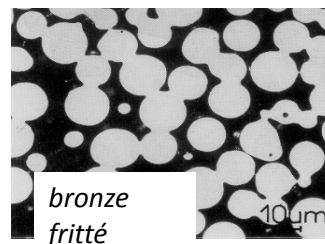
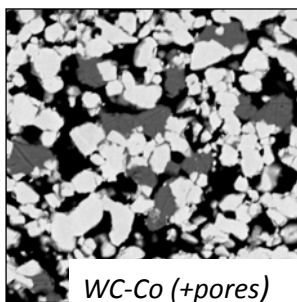


Mesures sur des images

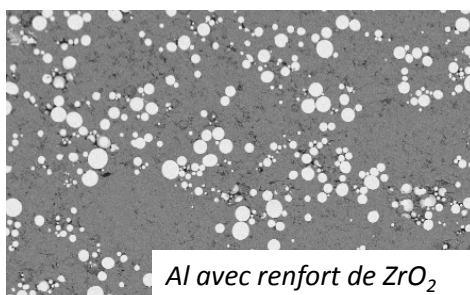
Analyse d'images

Analyse texturale

Quand on ne peut pas identifier des objets individuels



Quand on ne veut pas se limiter aux objets individuels



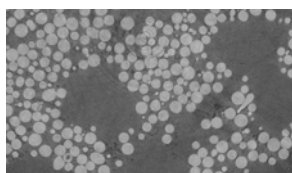
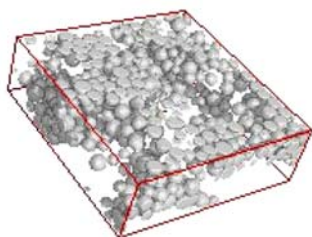
Quelles mesures pertinentes ?

- Mesures par unité de volume, d'aire, de longueur

- « stéréologie »

Stéréologie - relations stéréométriques

Mesures directes sur images 2D, voire 1D ou 0D



dim	Fraction volumique	Structure isotrope Surface spécifique	Spécif Courbure moyenne	"nombre"
3D	$V_V(\mathbf{X}) = N_P(\mathbf{X})$	$S_V(\mathbf{X}) = 4N_L(\mathbf{X})$	$M_V(\mathbf{X}) = 2\pi N_A(\mathbf{X})$	$N_V(\mathbf{X})$
2D	$A_A(\mathbf{X}) = N_P(\mathbf{X})$	$L_A(\mathbf{X}) = \pi N_L(\mathbf{X})$	$N_A(\mathbf{X})$	X
1D	$L_L(\mathbf{X}) = N_P(\mathbf{X})$	$N_L(\mathbf{X})$	X	X
0D	$N_P(\mathbf{X})$	X	X	X



Stéréologie : paramètres

En 3 dimensions :

- V_V Fraction volumique
- S_V Surface spécifique
- M_V Intégrale de courbure moyenne/unité de volume
- N_V Nombre de connexité par unité de volume
(nombre d'objets si objets convexes)



En 2 dimensions :

- A_A Fraction surfacique
- L_A Périmètre spécifique (/unité de surface)
- N_A Nombre de connexité par unité de surface
(nombre d'objets – nombre de trous)

En 1 dimension :

- L_L Fraction linéique
- N_L Nombre de connexité par unité de longueur :
nombre de segments découpés par unité de longueur (= nombre d'intercepts).



En 0 dimension :

- N_P Fraction de points

Stéréologie - relations stéréométriques (2)

En 3 dimensions :	V_V	Fraction volumique
	S_V	Surface spécifique
	M_V	Intégrale de courbure moyenne/unité de volume
	N_V	Nombre de connexité par unité de volume (nombre d'objets si objets convexes)
En 2 dimensions :	A_A	Fraction surfacique
	L_A	Périmètre spécifique (/unité de surface)
	N_A	Nombre de connexité par unité de surface (nombre d'objets – nombre de trous)
En 1 dimension :	L_L	Fraction linéique
	N_L	Nombre de connexité par unité de longueur : nombre de segments découpés par unité de longueur (= nombre d'intercepts).
En 0 dimension :	N_P	Fraction de points

dim	Paramètres Spécifiques			
3D	$V_V(\mathbf{X}) = N_P(\mathbf{X})$	$S_V(\mathbf{X}) = 4N_L(\mathbf{X})$	$M_V(\mathbf{X}) = 2\pi N_A(\mathbf{X})$	$N_V(\mathbf{X})$
2D	$A_A(\mathbf{X}) = N_P(\mathbf{X})$	$L_A(\mathbf{X}) = \pi N_L(\mathbf{X})$	$N_A(\mathbf{X})$	
1D	$L_L(\mathbf{X}) = N_P(\mathbf{X})$	$N_L(\mathbf{X})$		
0D	$N_P(\mathbf{X})$			

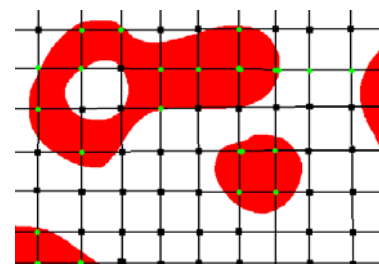
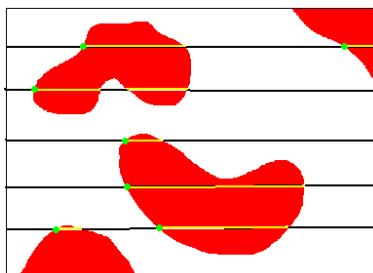
Structure isotrope



Mesures : de simples comptages

0D: Fractions de points (0D) : N_V, A_A, V_V

1D : Nombre d'intercepts : N_L, L_A, S_V



2D : Nombre d'objets et de trous: N_L, L_A, S_V
(en fait comptage de tangentes)

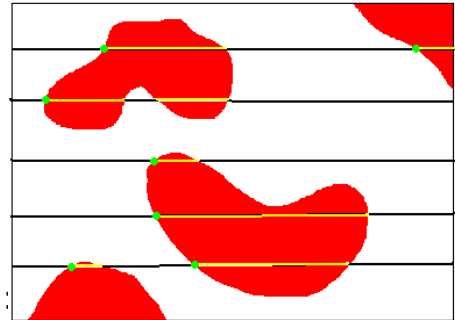


Paramètres secondaires

Corde moyenne (libre parcours moyen ou intercept moyen)

= longueur moyenne d'un segment de droite inclus

$$\bar{L}_l = \frac{L_L}{N_L} = \frac{N_P}{N_L} = 4 \frac{V_V}{S_V} \dots = \frac{V_V}{N_L}$$

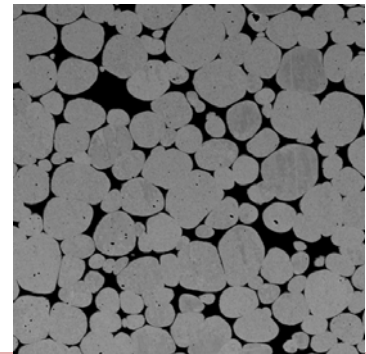


Corde moyenne dans deux phases complémentaires :

$$\frac{\bar{L}_l^2}{\bar{L}_l^1} = \frac{N_L^1 V_V^2}{N_L^2 V_V^1}$$

$$N_L^1 = N_L^2$$

$$\frac{\bar{L}_l^2}{\bar{L}_l^1} = \frac{V_V^2}{V_V^1} = \frac{1 - V_V^1}{V_V^1}$$



Analyse individuelle

Surface S

Périmètre P

Longueurs de projection (diamètres de Féret): $X_{\text{Féret}}, Y_{\text{Féret}}$

Largeur l_1 : plus petite projection selon diverses orientations

Longueur L : plus grande projection

Largeur l_2 : projection \perp L

Orientation : direction de la plus grande projection (angle/axe X)

Longueurs de cordes

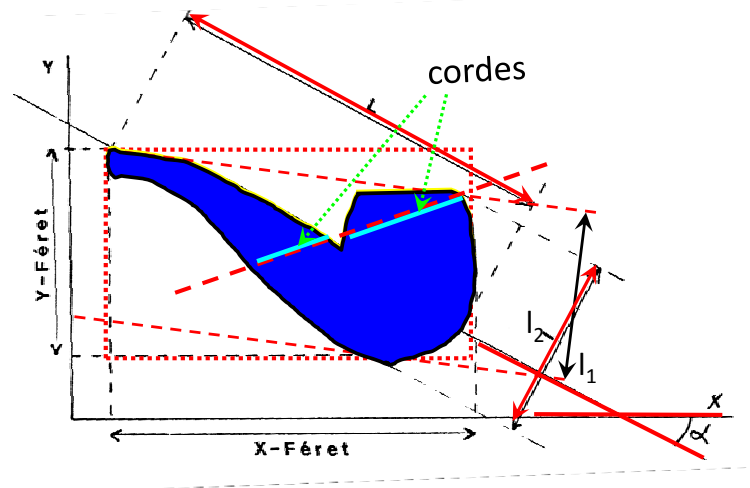
Corde moyenne (selon les directions et les positions)

Diamètre équivalent (du cercle de même aire) :

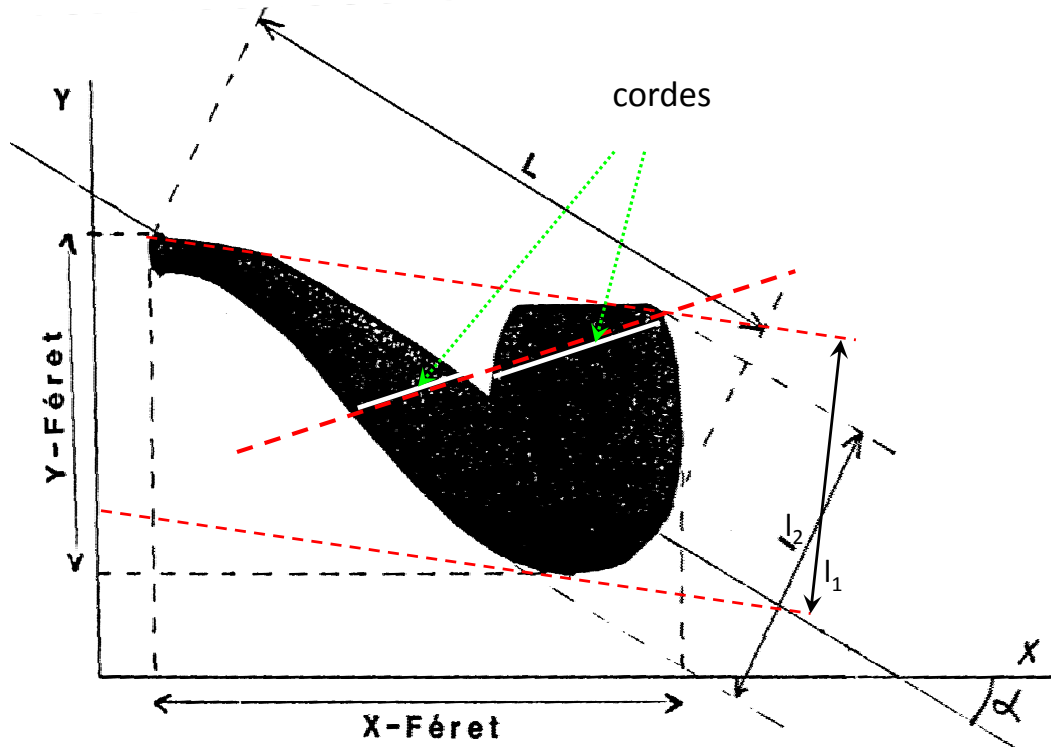
$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$



Ces paramètres sont exploités de façon statistique sur les différents objets: courbes de distribution, moyennes...

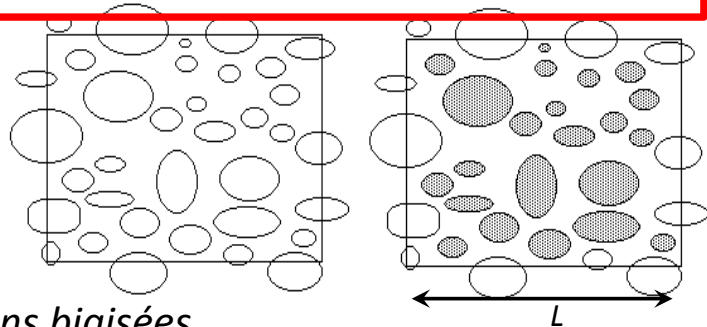


Analyse individuelle



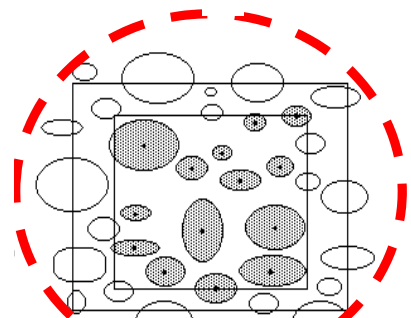
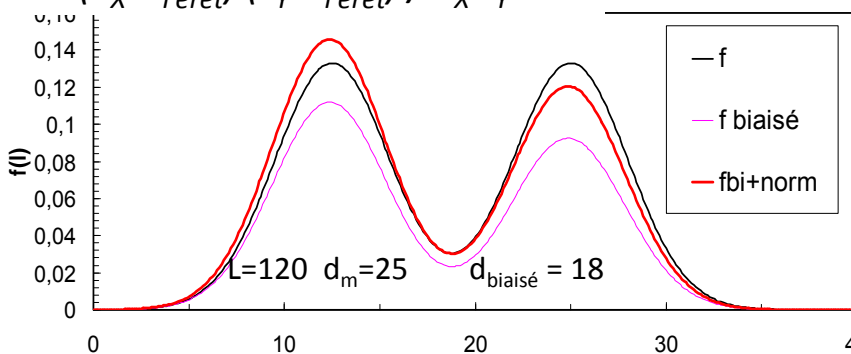
Bord d'image : bord de masque source d'erreur

Des particules touchent le bord : que faire ?



Les supprimer ? distributions biaisées...

$$P = (L_X - X_{Féret}) (L_Y - Y_{Féret}) / L_X L_Y$$



Eviter l'erreur ou la corriger



Forme – indices de forme 2D

On ne peut pas caractériser la forme par un paramètre : seulement comparer et classer

- indice isopérimétrique :

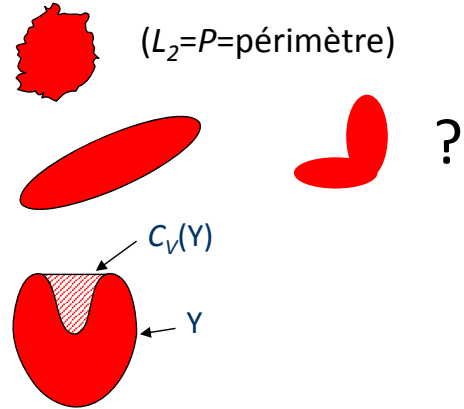
(très sensible aux irrégularités du contour) $I_P = \sqrt{\frac{4\pi A}{L_2^2}}$ ($L_2=P$ =périmètre)

- indice d'allongement :

(ne traduit réellement un allongement que pour des particules convexes) $I_A = \frac{l}{L}$

- indice de concavité :

$$I_C = \frac{A(Y)}{A(C_V(Y))}$$



On choisit un indice en fonction de ce qu'on veut faire ou comparer



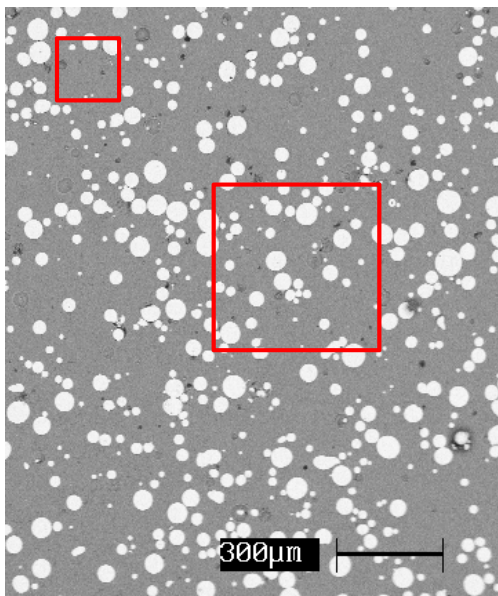
Catalyseur ou échangeur :
surface/volume

Défaut mécanique :
allongement,

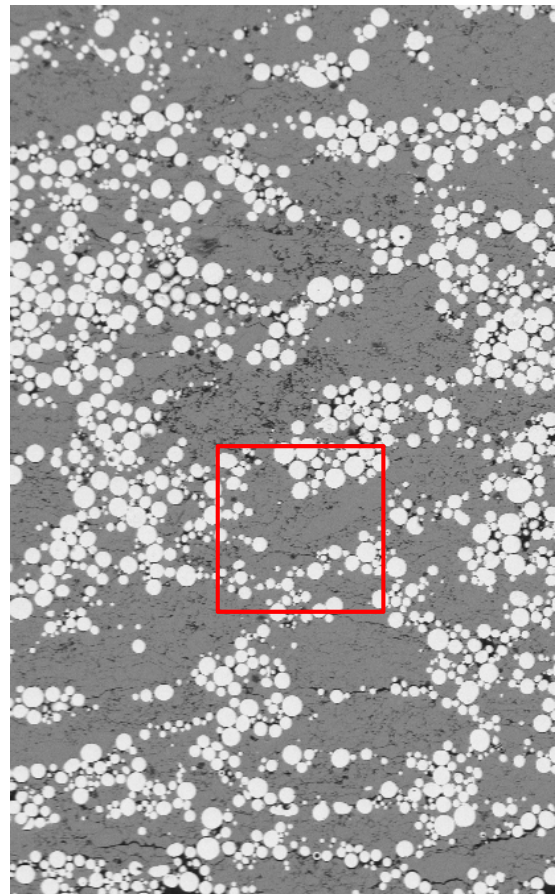


Homogénéité

Dépend de l'échelle à laquelle on se place

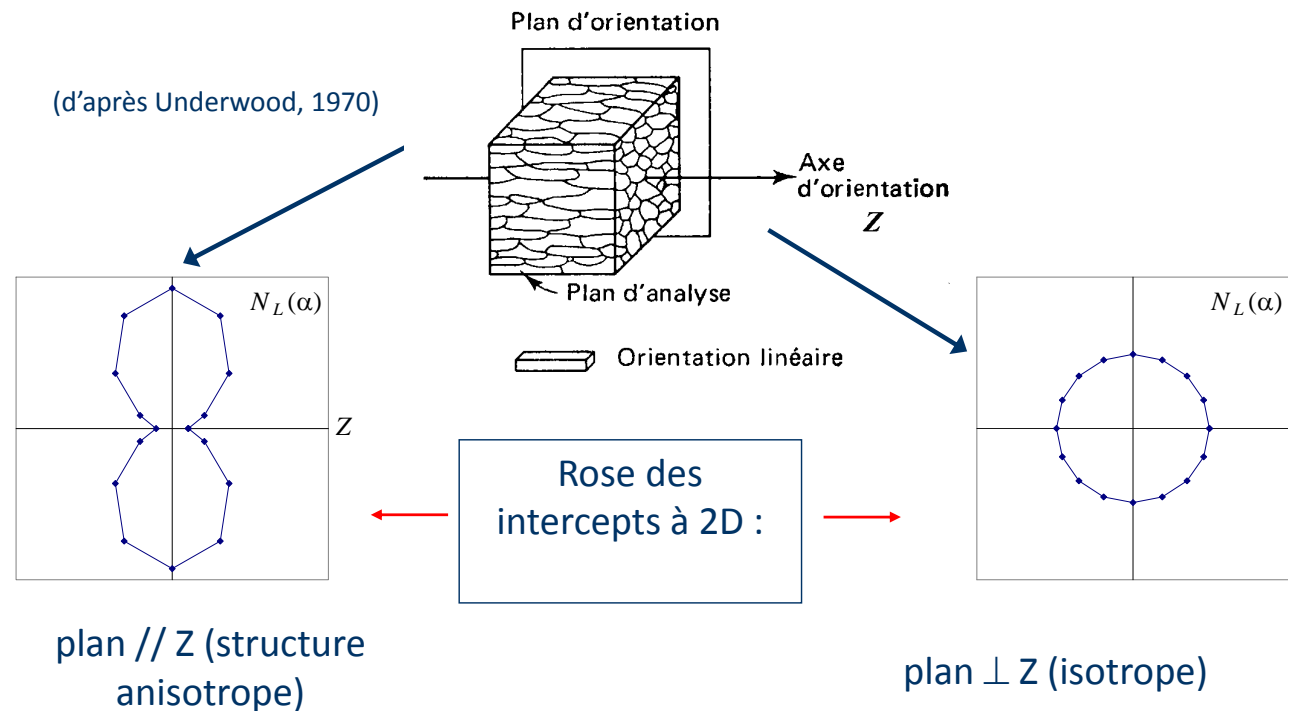


Billes de zirconie
(60µm) dans
une matrice Al



Anisotropie

Mesures dans différentes directions



Avec quoi faire de l'analyse d'images ?

- L'outil lié à votre équipement MEB ou « clés en main »
 - fait pour l'appareil ou votre problème
 - des fonctions et mesures choisies par le fabricant
 - Adaptées,
 - limitées
 - un surcoût ?
- Un outil classique : Image J
 - « Universel » (J=« Java » → PC, Mac, Linux...)
 - des fonctions ouvertes, beaucoup de « plugins » sur internet, mais demande de s'adapter
 - gratuit et disponible sur internet (dont la livraison « Fiji » avec un ensemble plugins utiles)

