

Quelques éléments pour exploiter les images numériques du MEB

Jean-Marc CHAIX



SIMaP

CNRS, Grenoble INP

Traitement et analyse d'images

- **Saisie et 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 avant 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



7-8 décembre 2017

Images, vision et couleur...
de l'œil à l'image numérique.

Jacky RUSTE
GN-MEBA /Microscopie Icaunaise

Image numérisisée

- Image MEB : une image bit-map

caractéristiques d'une image bit-map

1 – sa définition x, y

x nombre de pixels par ligne
y nombre de lignes

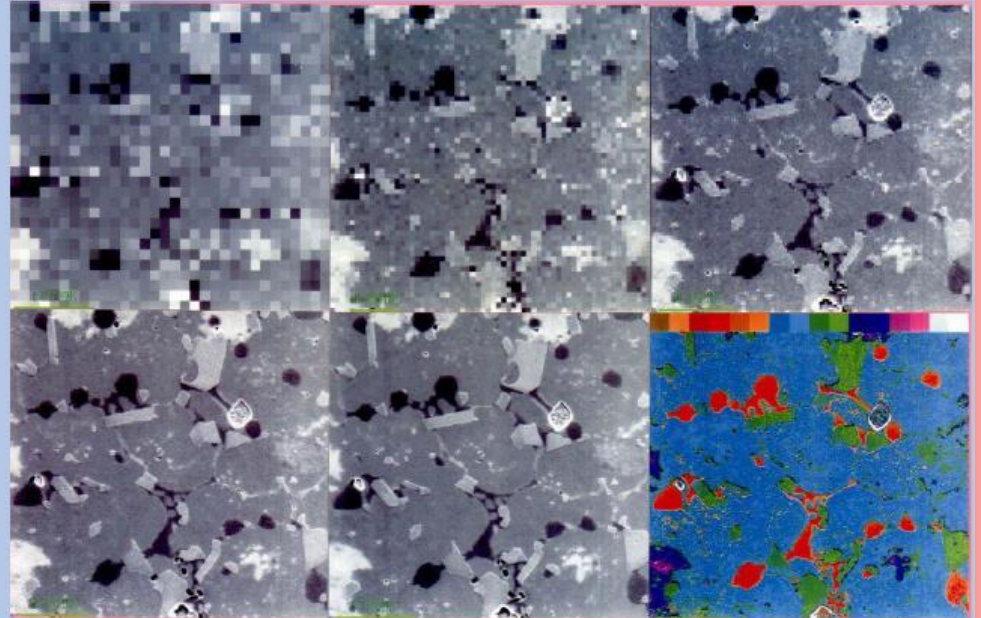
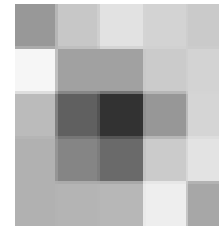
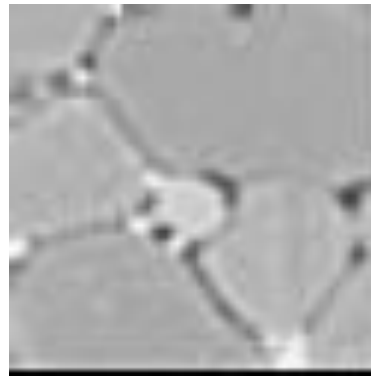
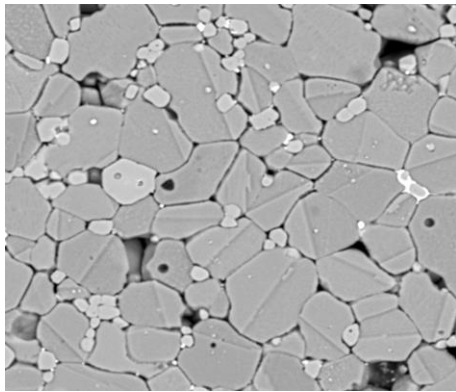


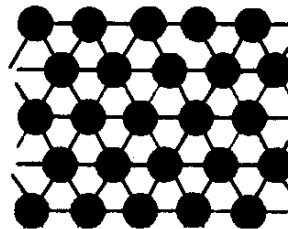
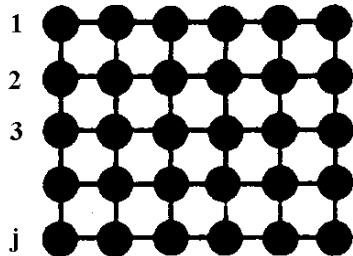
Image numérisisée

- Niveaux de gris : tableau de nombres



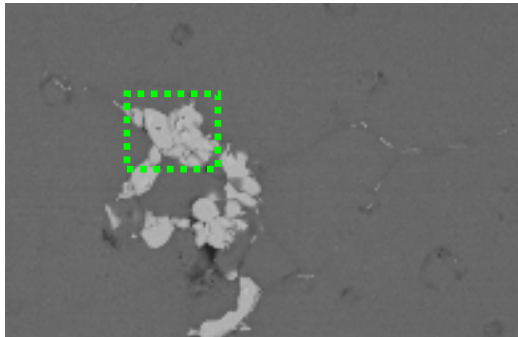
100	180	220	210	160
250	105	106	176	194
174	80	5	102	175
120	97	76	180	220
119	118	117	245	175

- Trame carrée, trame hexagonale



Les pixels sont-ils des carrés ?

- zoom numérique



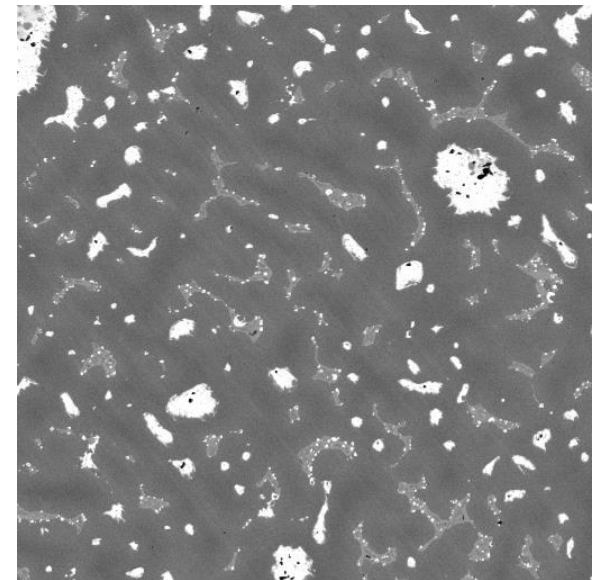
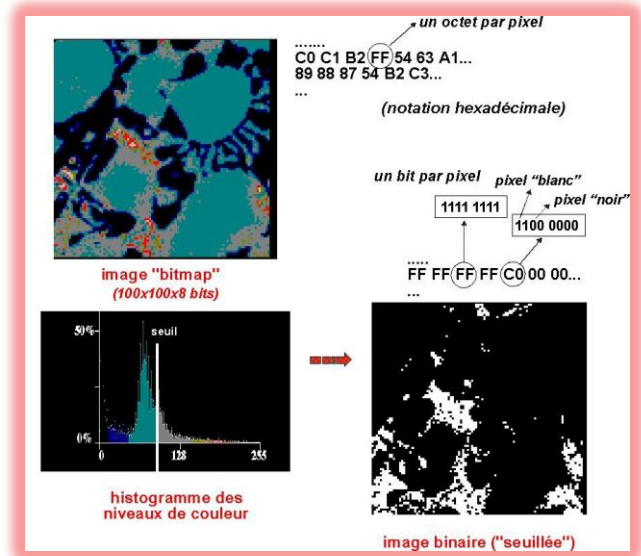
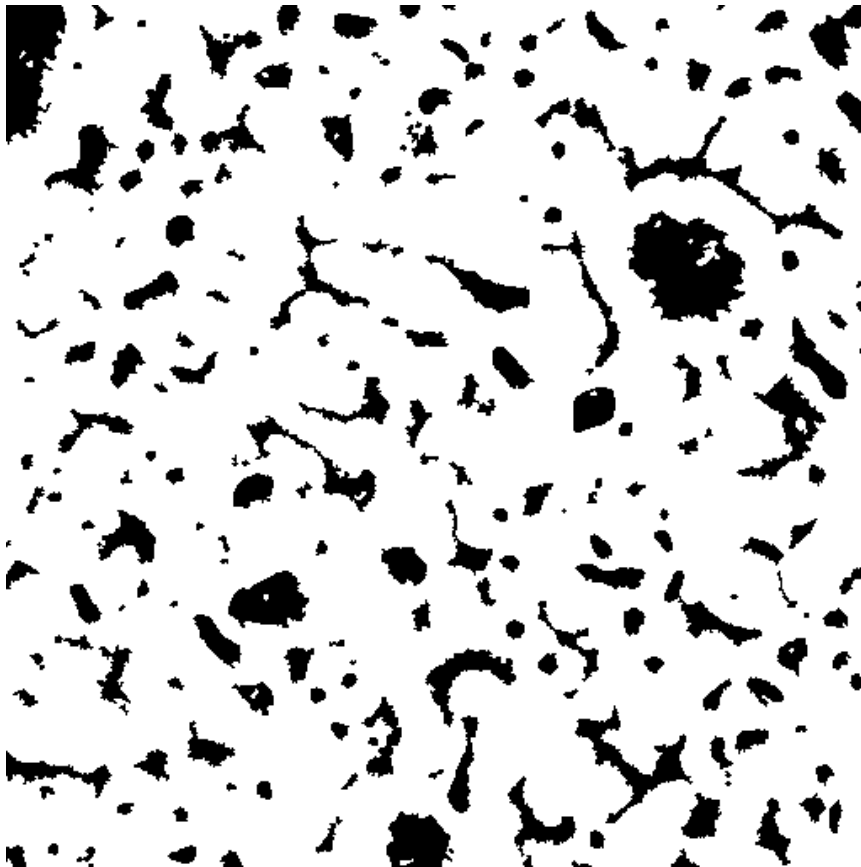
logiciel de traitement d'images (Aphelion ADCIS)



Logiciel « de visualisation » (Word, powerpoint)

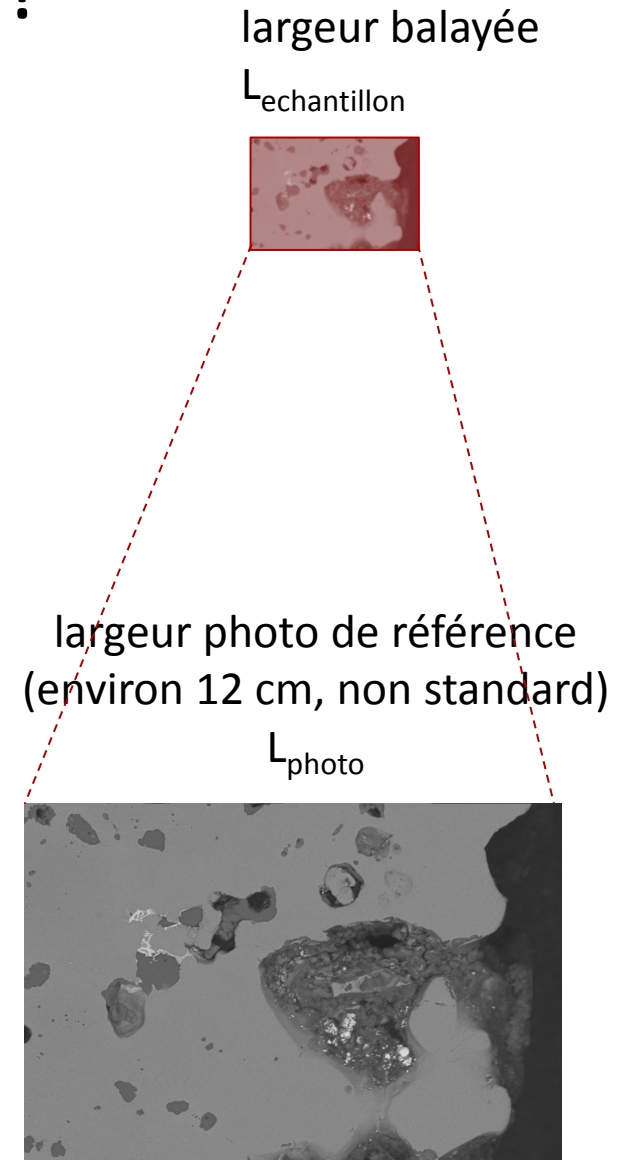
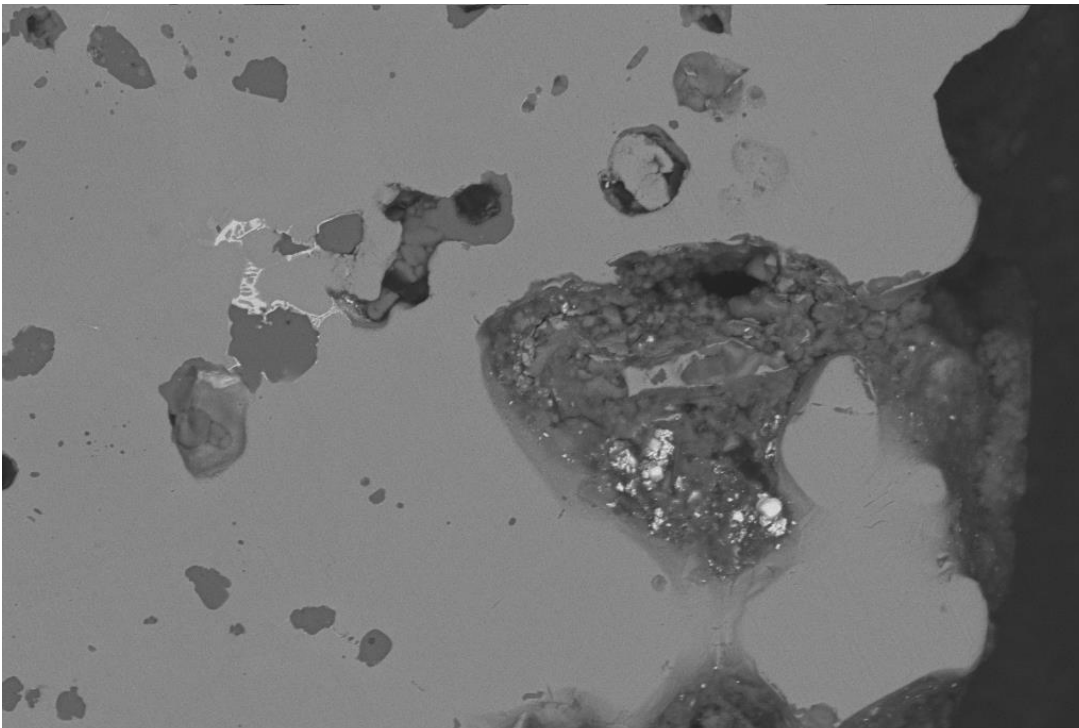
Image binaire

- 2 niveaux « de gris »



Grandissement ?

- Grandissement = repère arbitraire (conventionnel)
- $\text{Mag} = L_{\text{photo}} / L_{\text{echantillon}}$
-



Grandissement ?

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

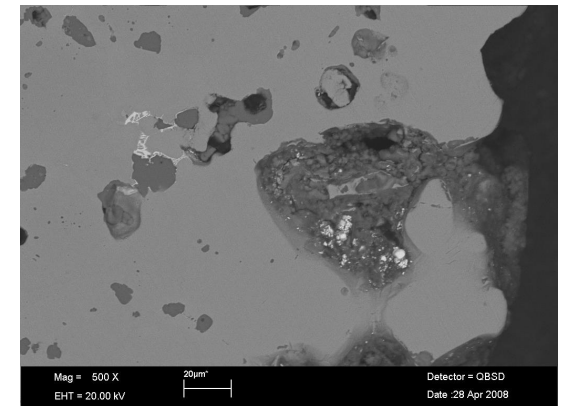
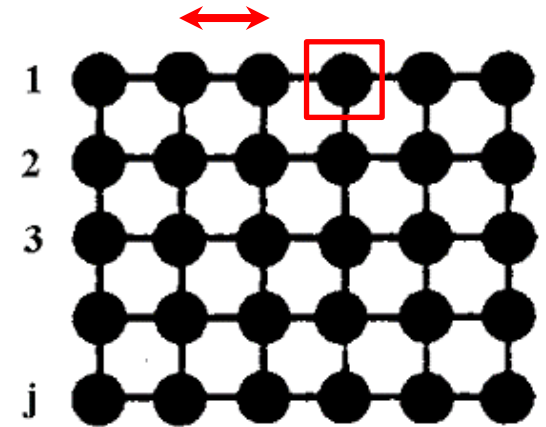
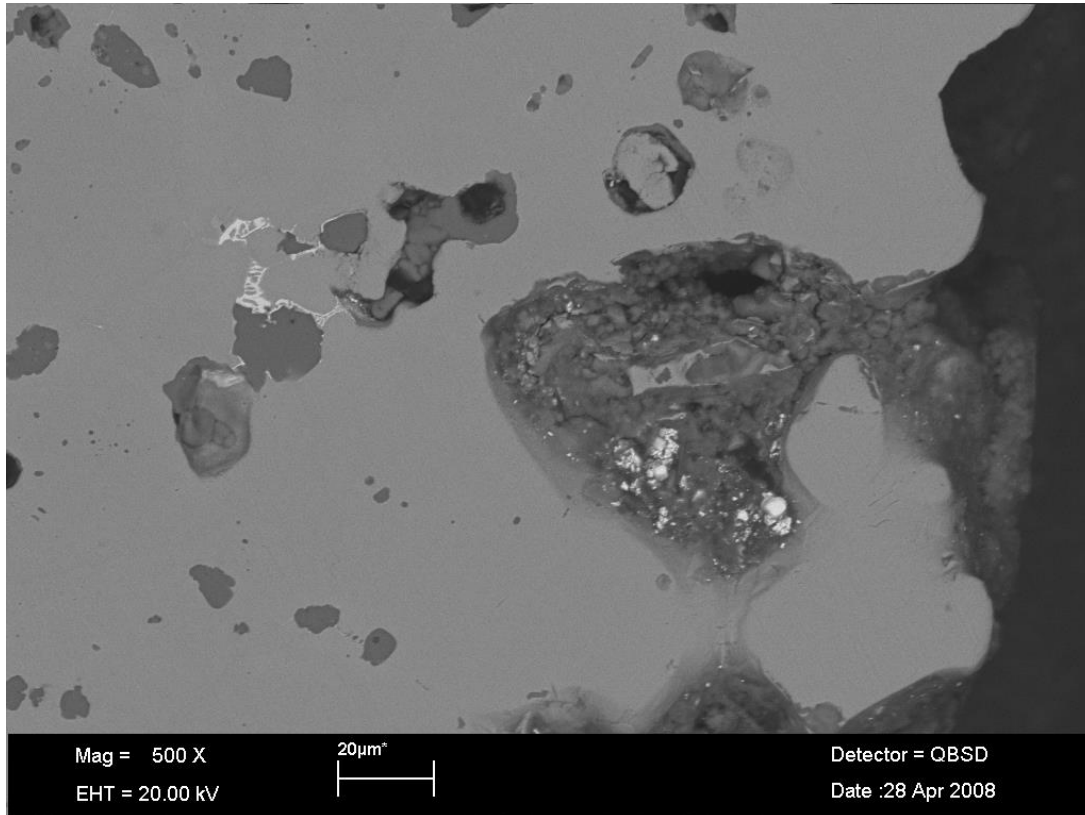
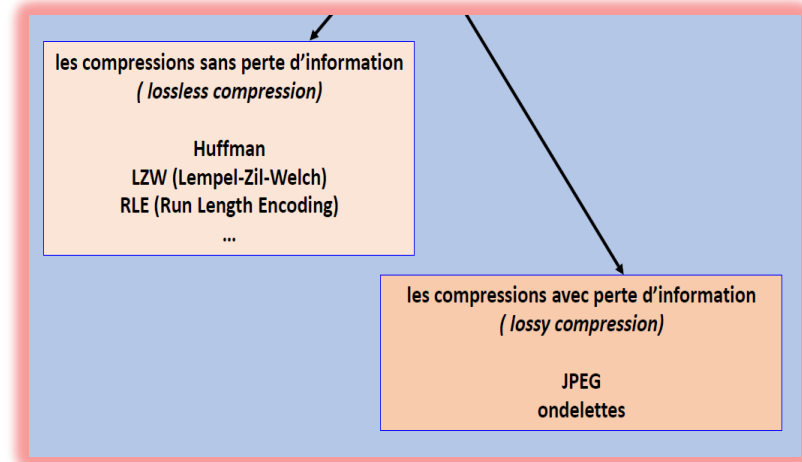


Image 1024 pixel mag 2500X
à la même taille de pixel que
Image 512 pixels mag 5000X
(mais champ X2 et surface X4)

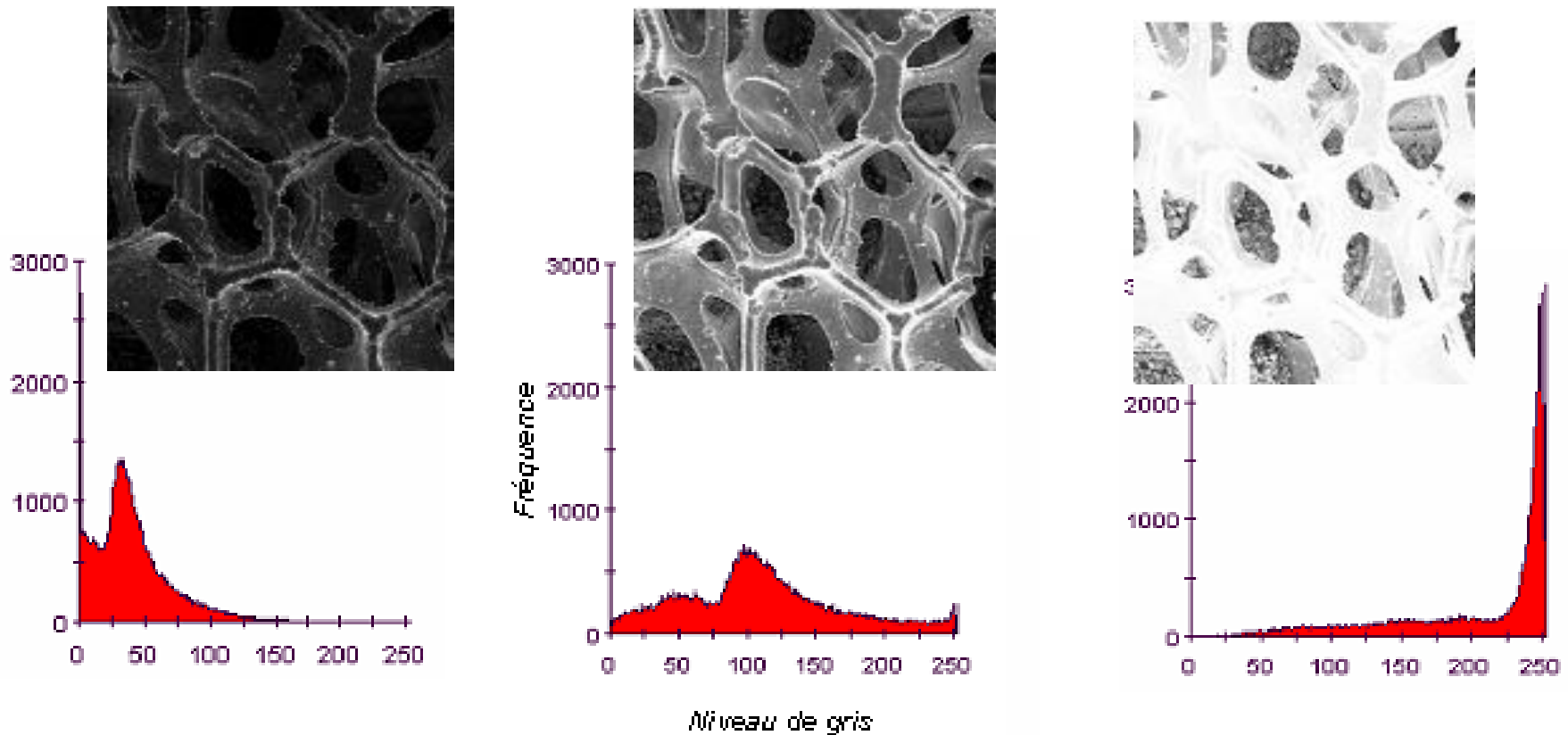
Fichiers d'images

- 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
 - ...



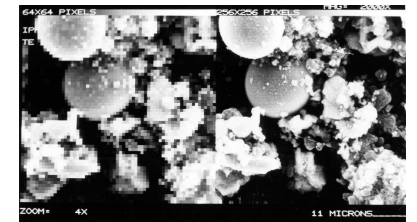
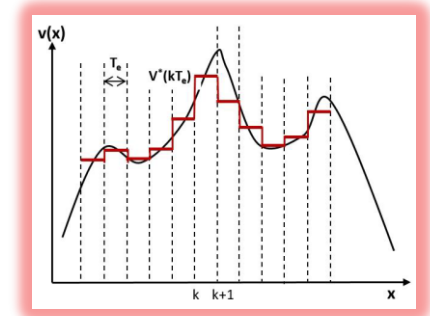
Histogramme

- Mesurer la dynamique de l'image
- Histogramme des intensités présentes dans l'image



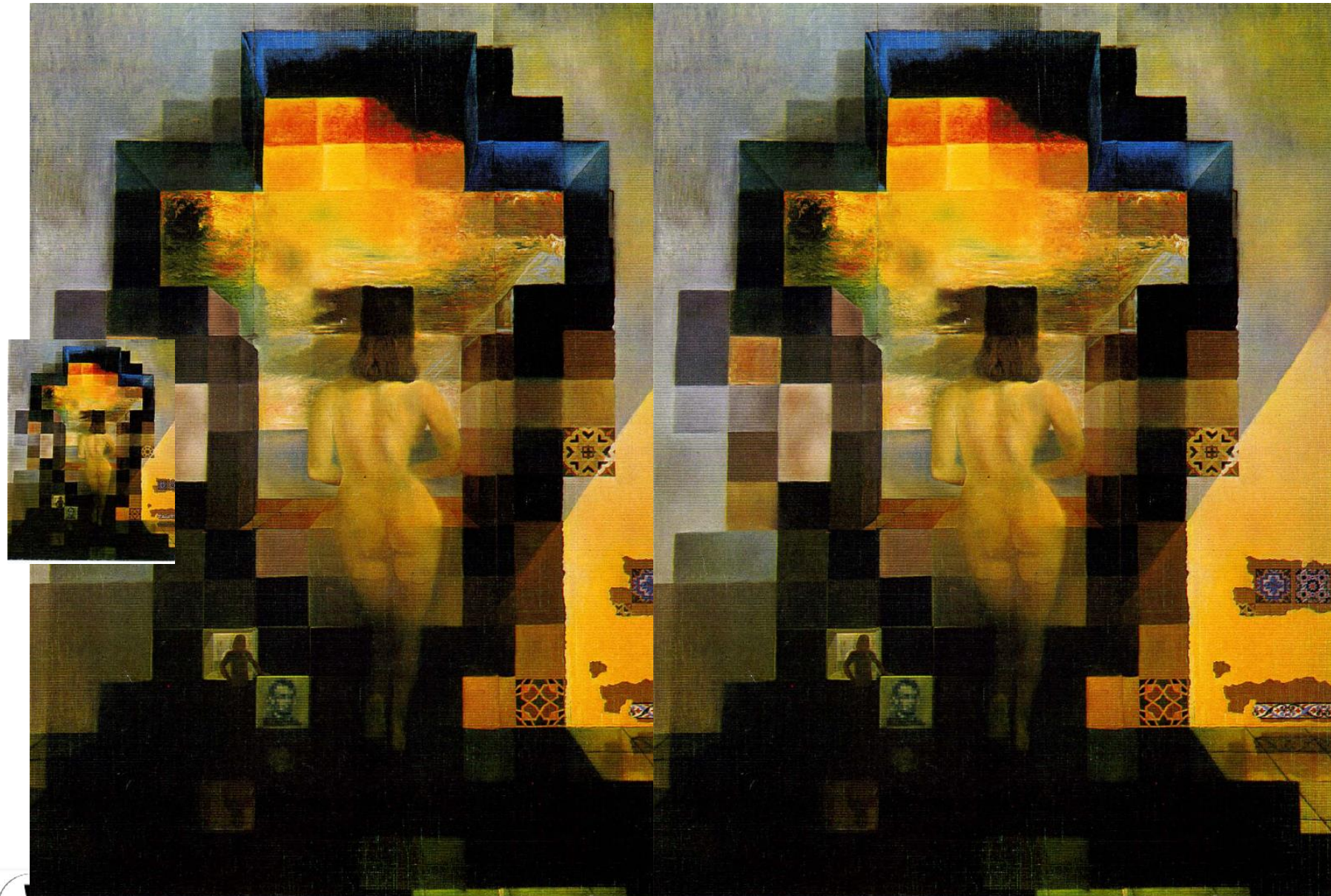
Acquisition d'images : quelle résolution ?

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



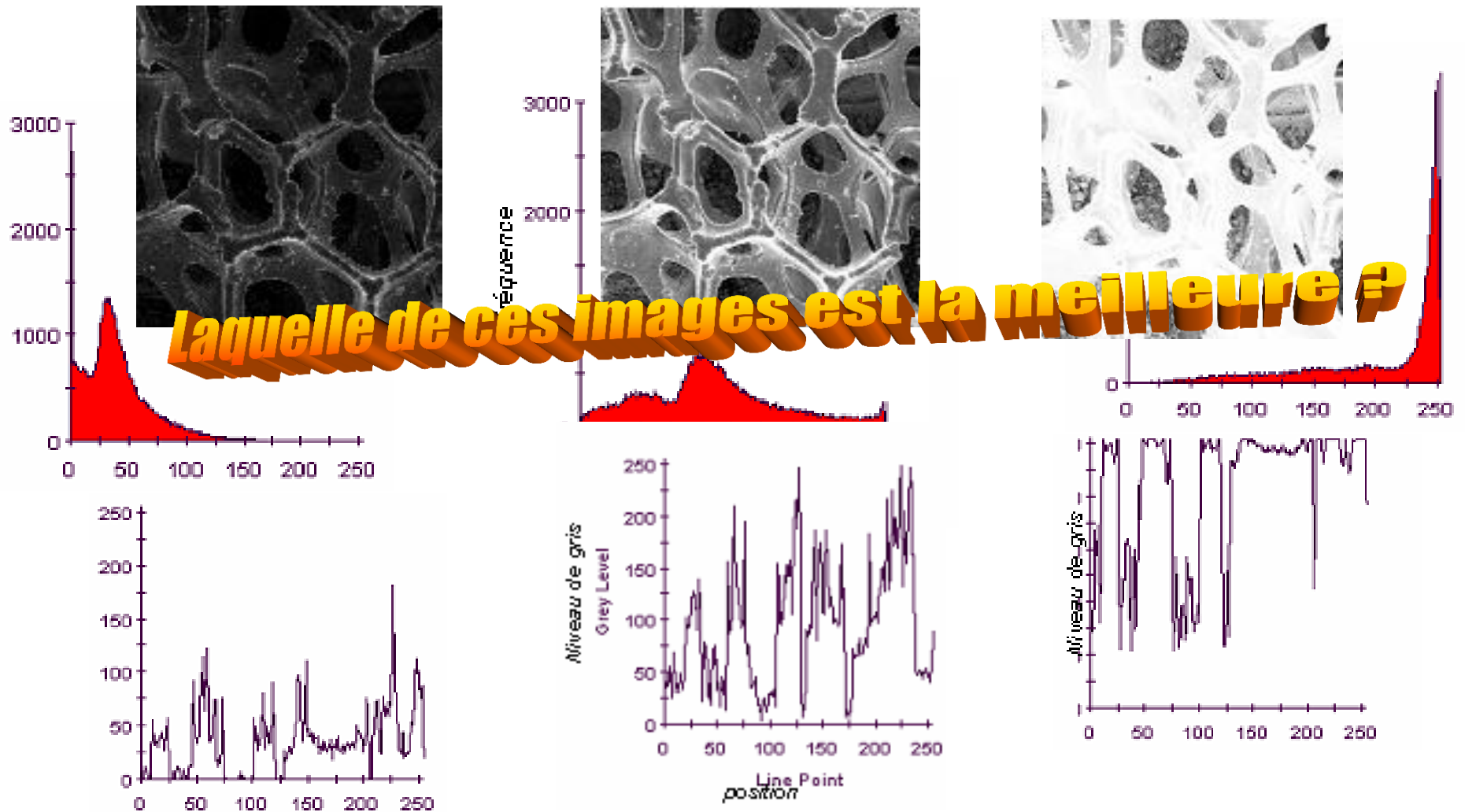
Laquelle de ces images est la meilleure ?

Résolution : Dali et les pixels...



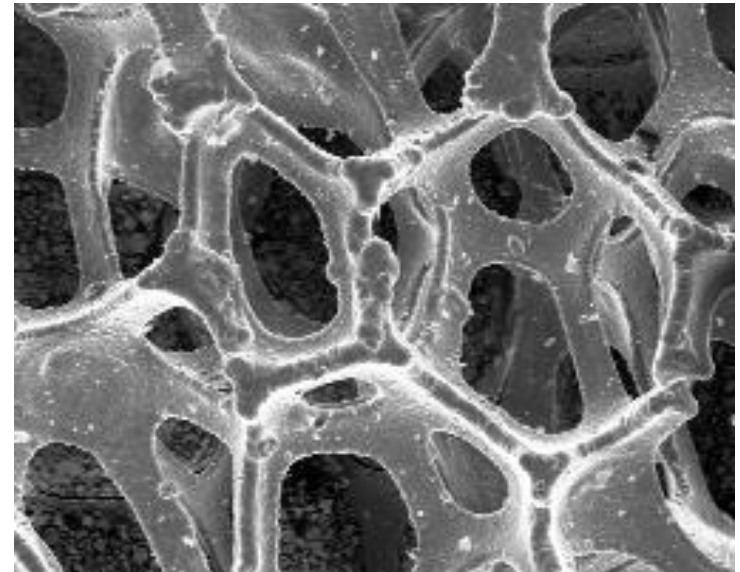
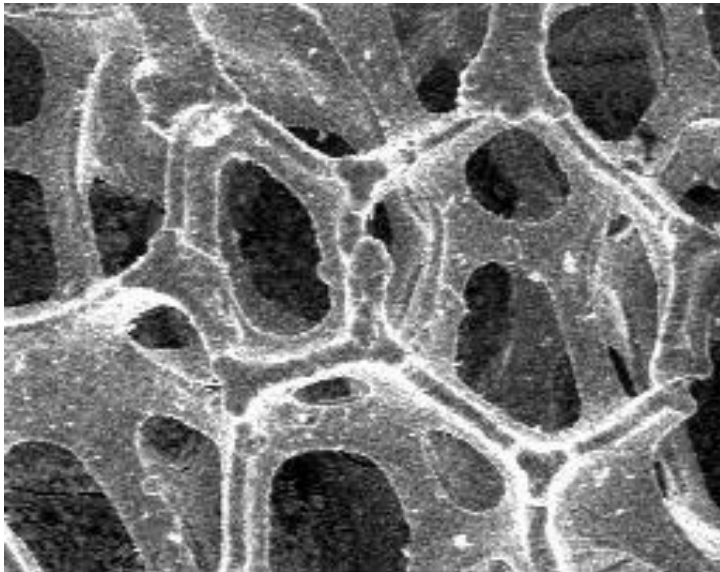
Acquisition d'images : quelle calibration des intensités?

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



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 !)



Transformation des images

Traitement d'image

Modifier les intensités

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

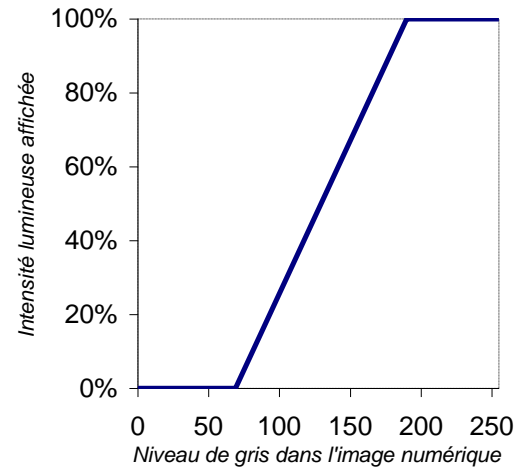
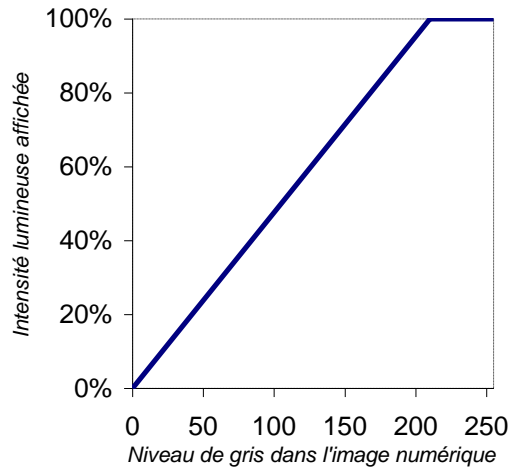
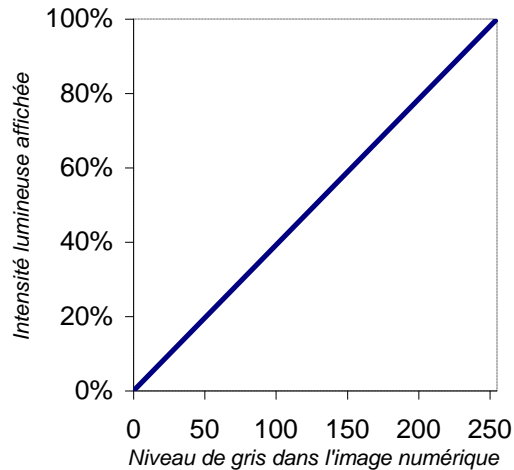
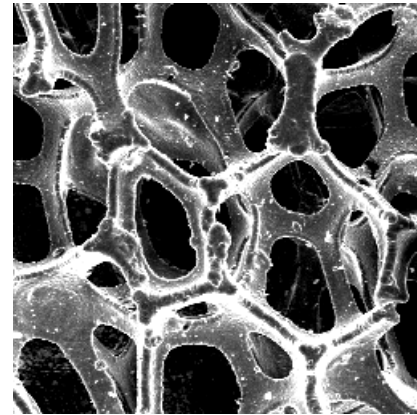
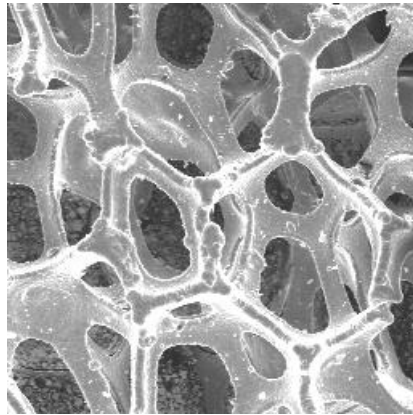
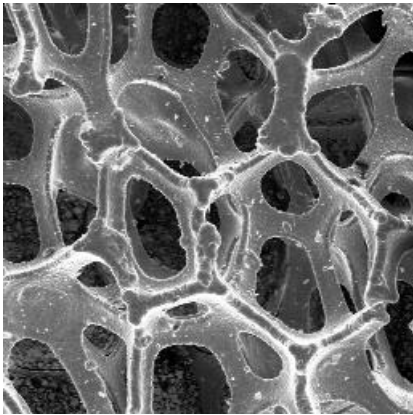
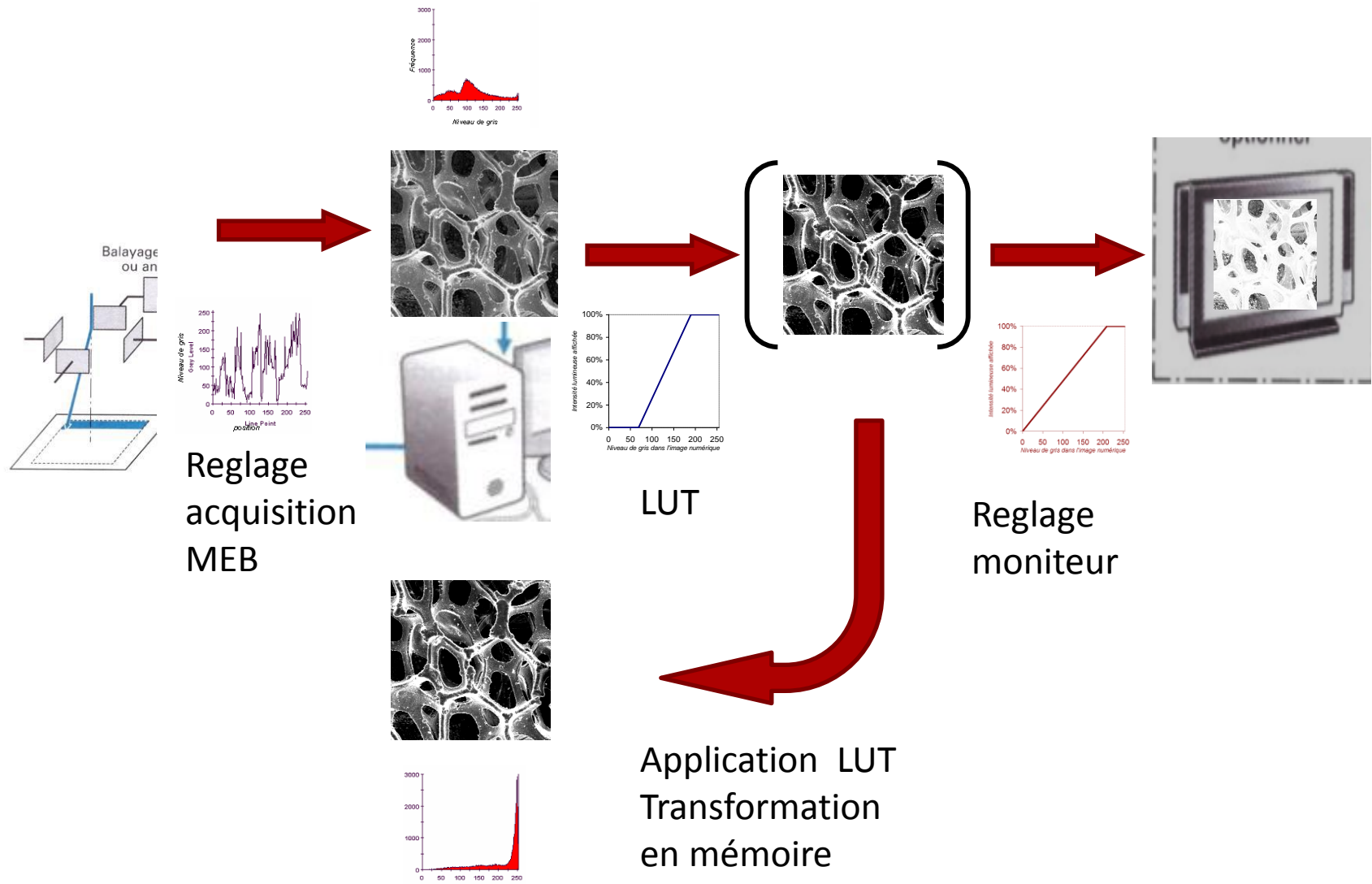
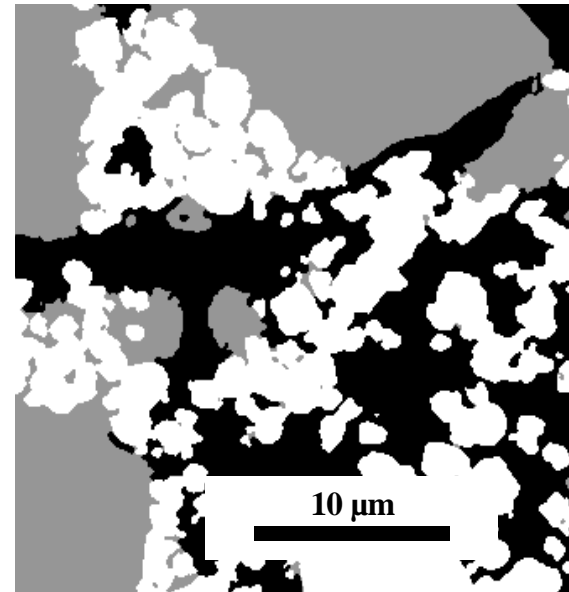
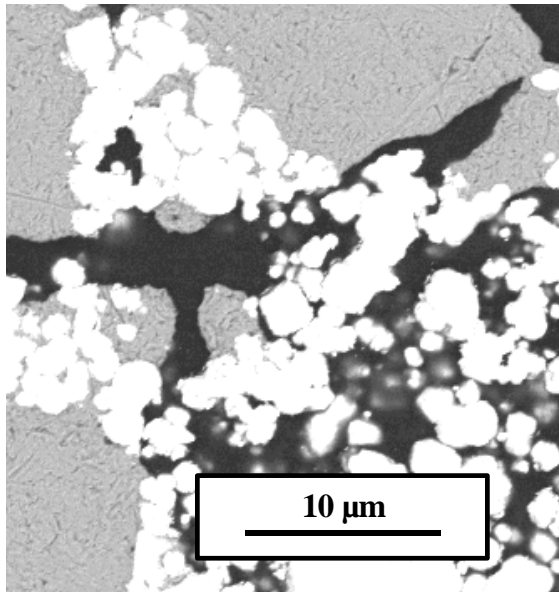


Image : entre le microscope, l'ordinateur et vous...



Segmentation

Extraction des objets ou phases pertinentes de l'image



Segmentation : seuillage

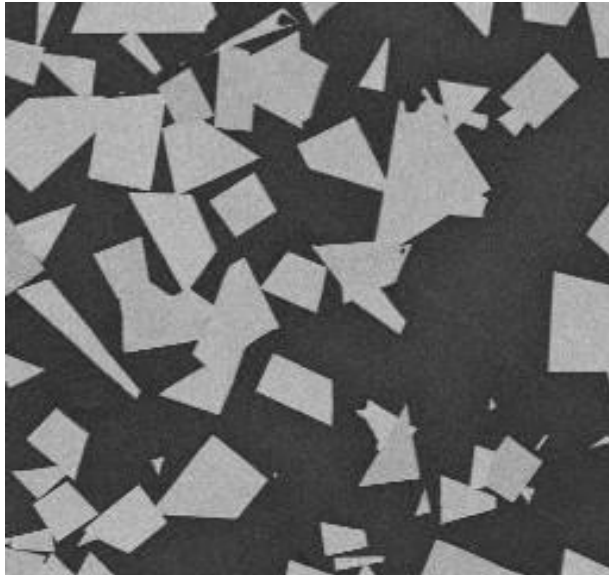


Image en niveaux de gris

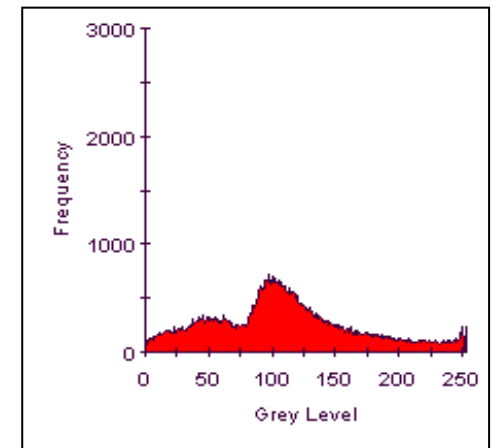


Image binaire (support usuel des mesures)

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

pixels dont le niveau est compris entre 2 seuils

(manuel ou automatique)



Opérations logiques (images binaires)

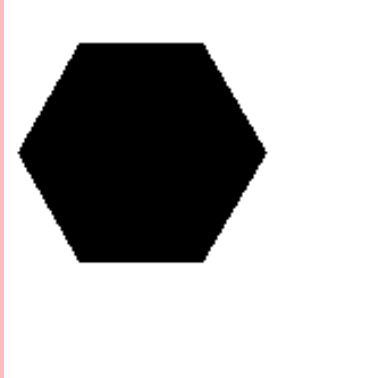
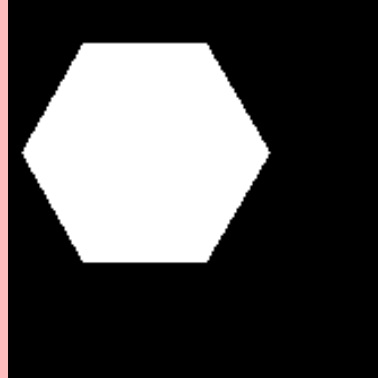


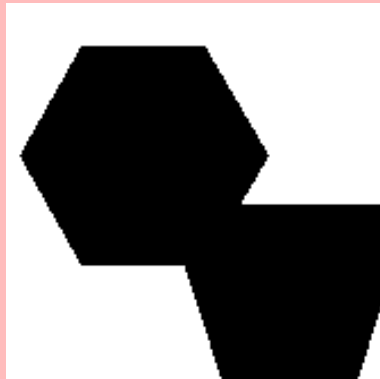
image H



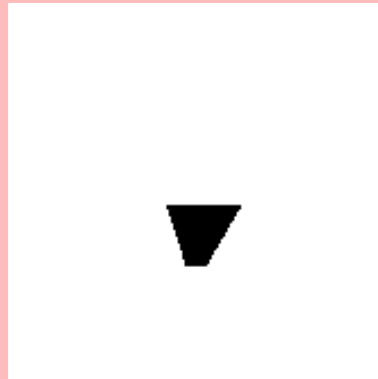
NOT(H) (complémentaire)



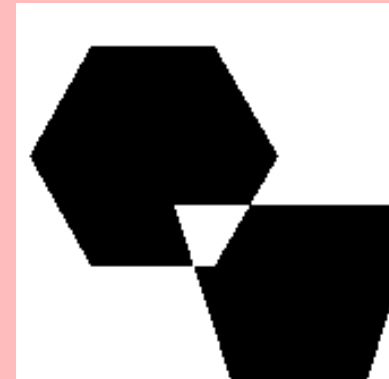
image T



$H \text{ OR } T$ $H \cup T$
(union, OU)

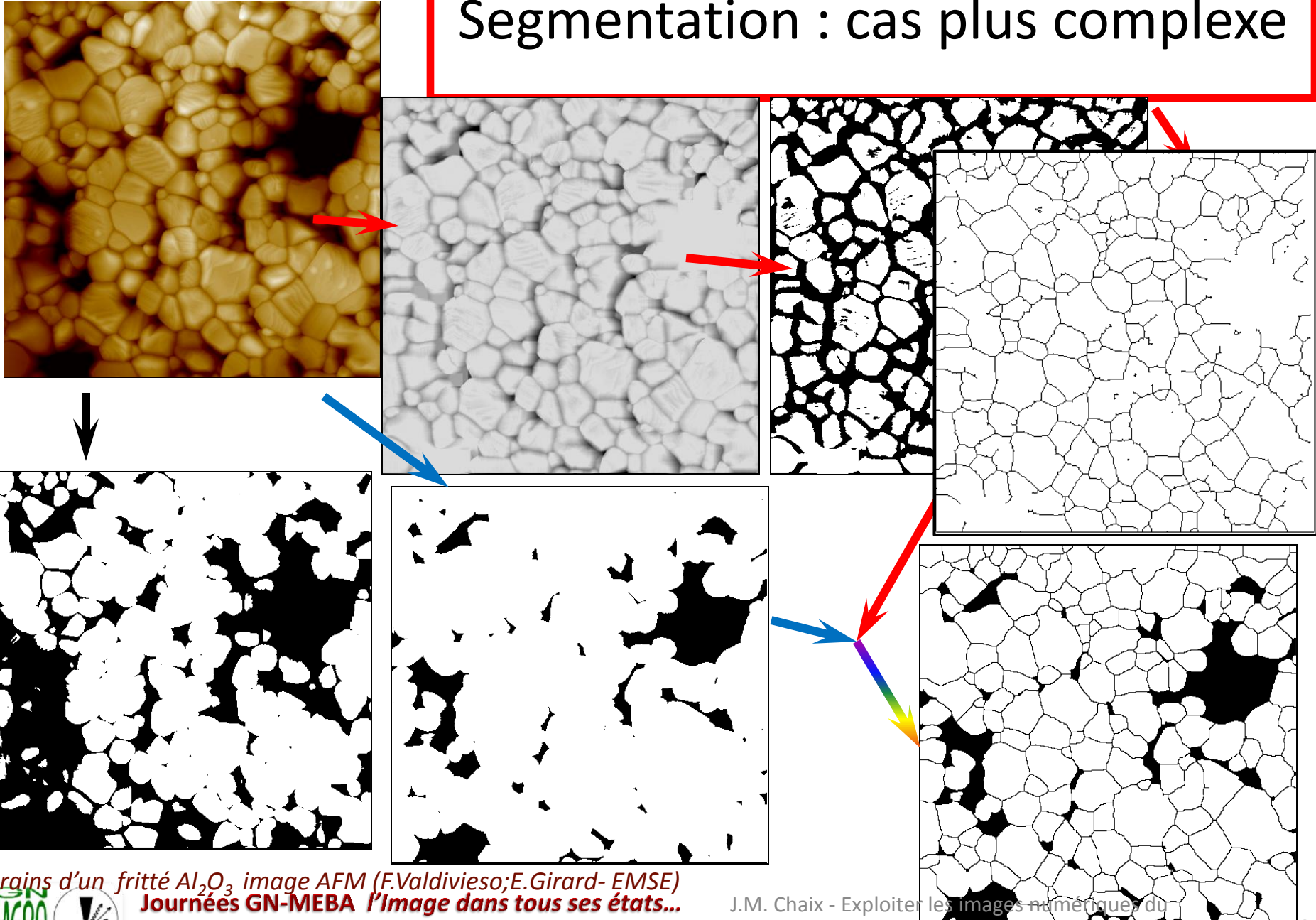


$H \text{ AND } T$ $H \cap T$
(intersection, ET)



$H \text{ XOR } T$ $H \Delta T$
(Différence symétrique,
OU exclusif)

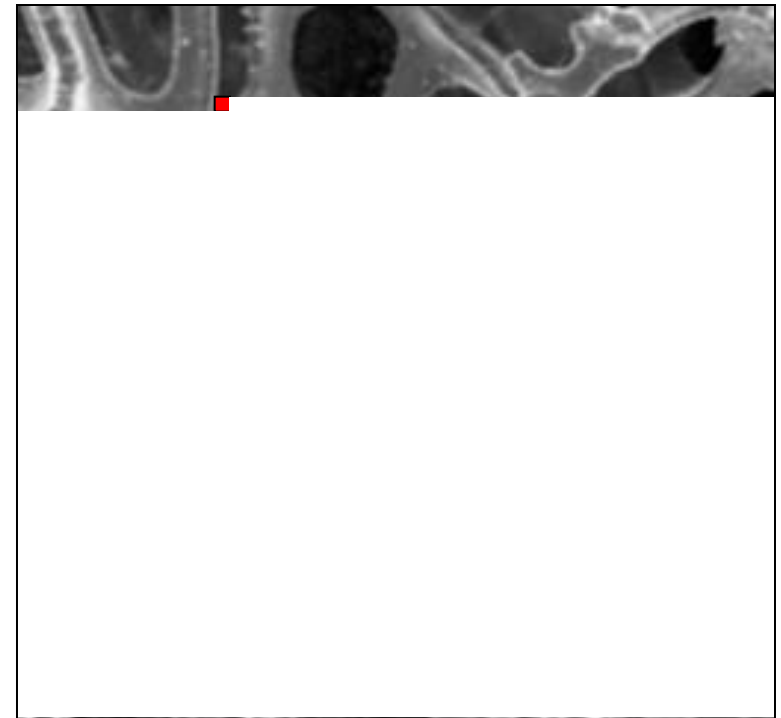
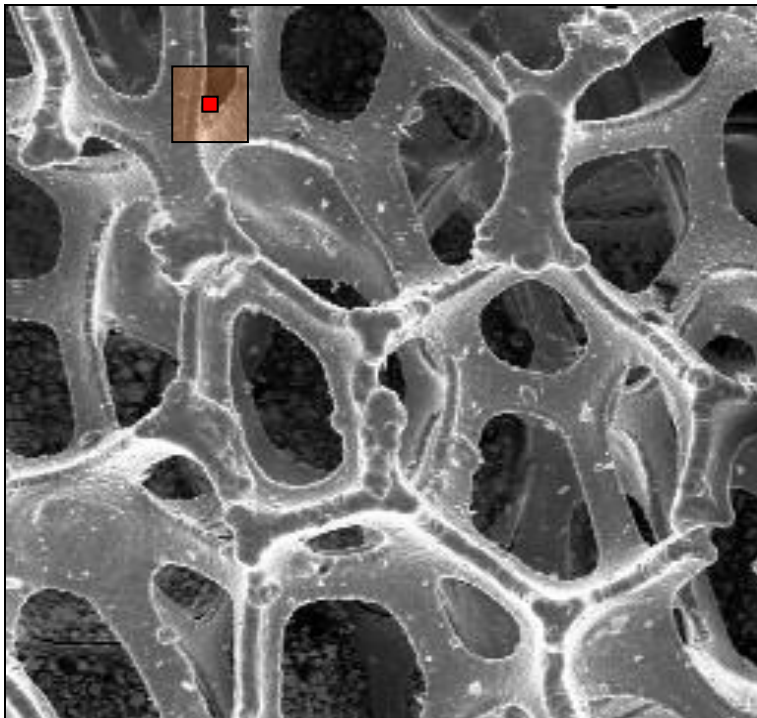
Segmentation : cas plus complexe



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)

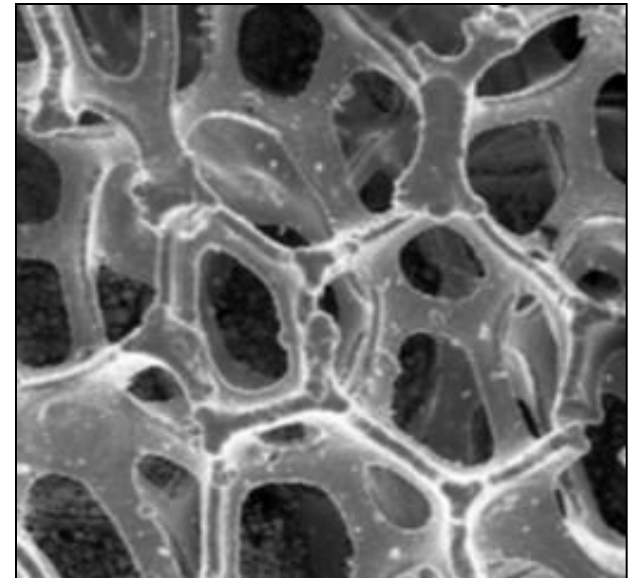
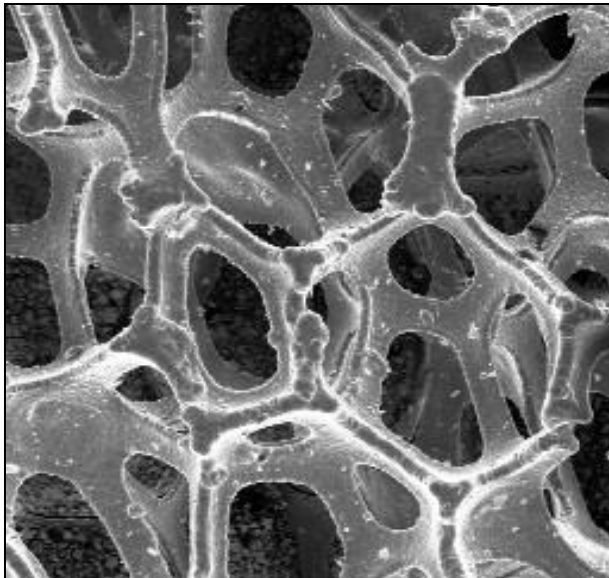
Passe-bas

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)

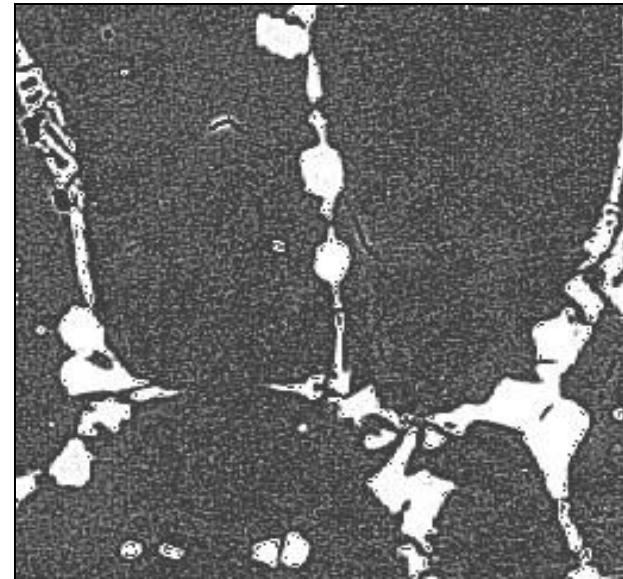
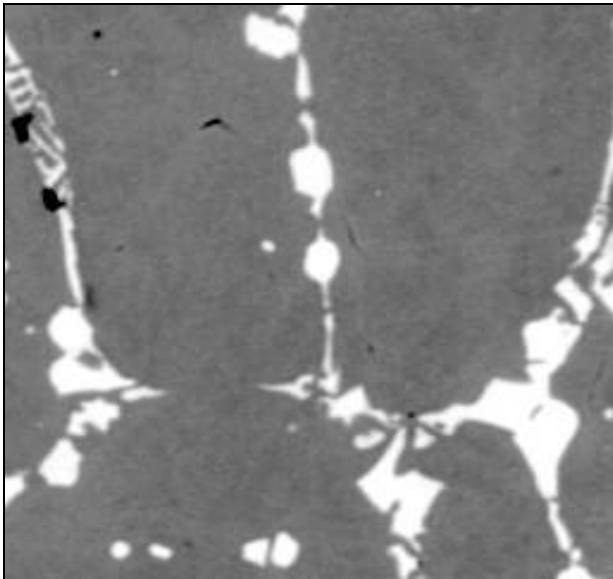
Passe-haut

-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)

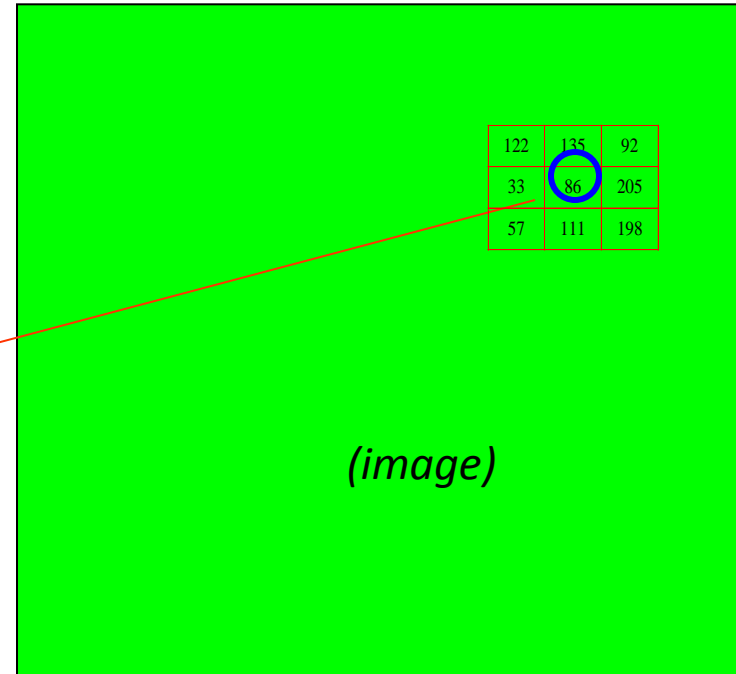


Filtrage numérique

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



122	135	92
33	86	205
57	111	198

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

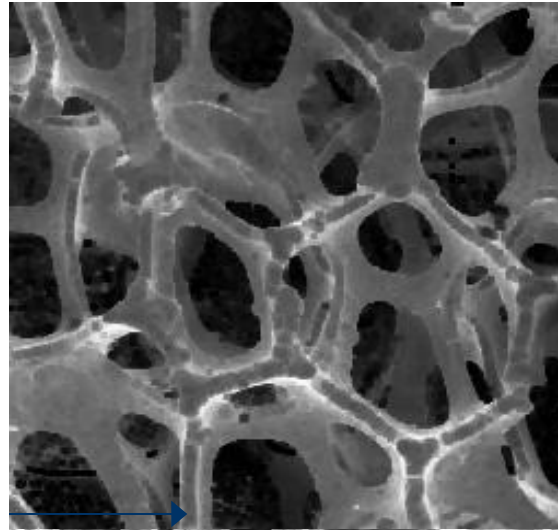
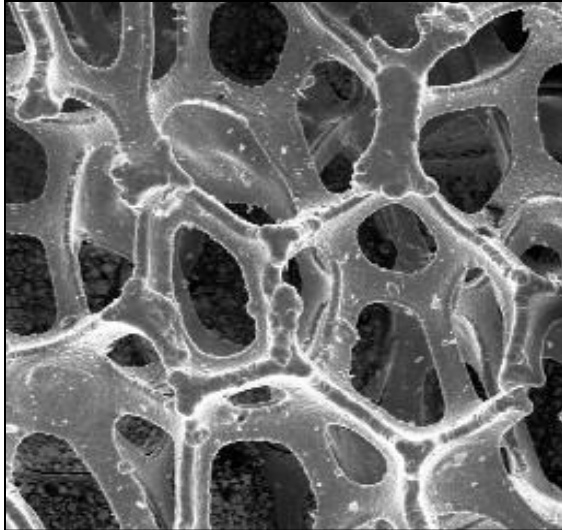
Min.
(erosion)

Médian

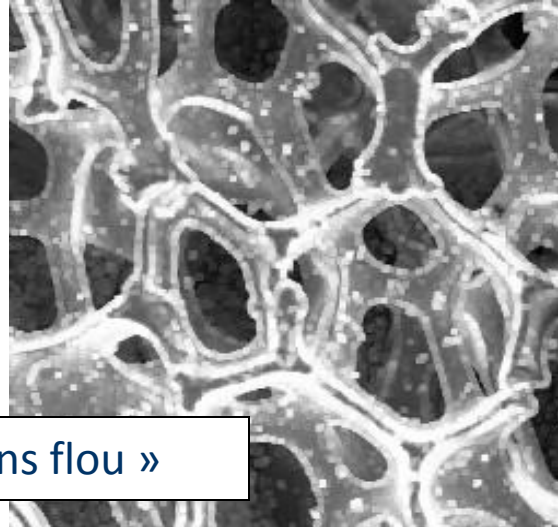
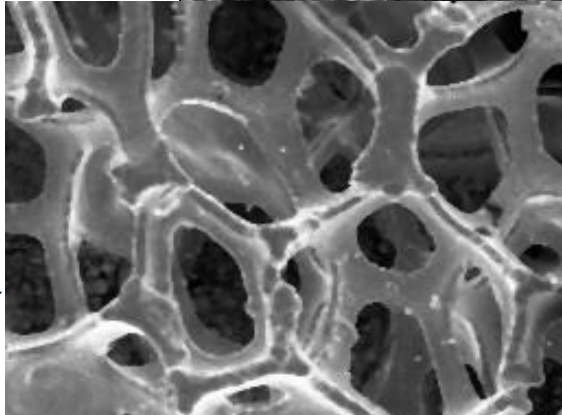
Max
(dilataction)

Filtrage numérique

Filtrage de rang



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



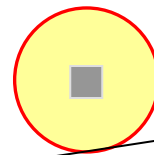
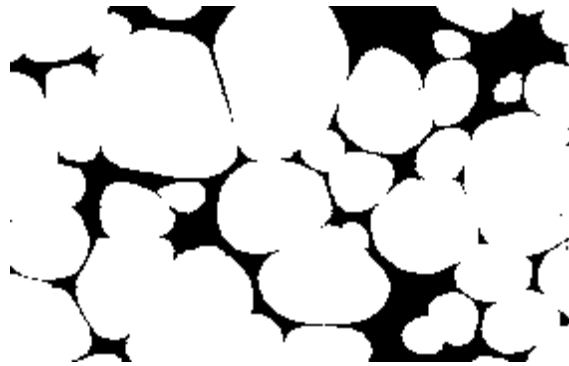
Dilatation → dilatation des parties claires (érosion des parties sombres)

Médian → élimination des détails « sans flou »

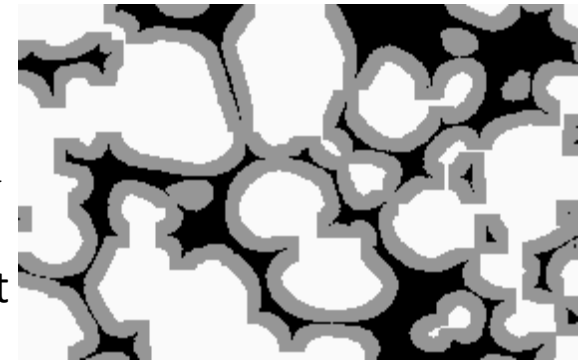
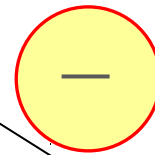
Morphologie mathématique binaire

Erosion, dilatation

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



Élément Structurant



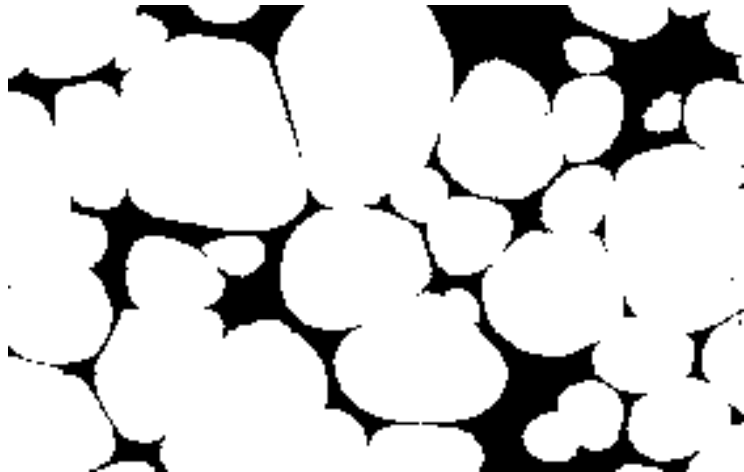
Dilatation : $D = \{x / B_x \cap Y \neq \emptyset\}$ → « feutre sur le contour »

Morphologie mathématique binaire

Ouverture, fermeture

ouverture= érosion puis dilatation
(même élément structurant)

supprime tout ce qui ne peut pas
contenir l'Élément Structurant.



fermeture= dilatation puis érosion
(même élément structurant)

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



carré 10



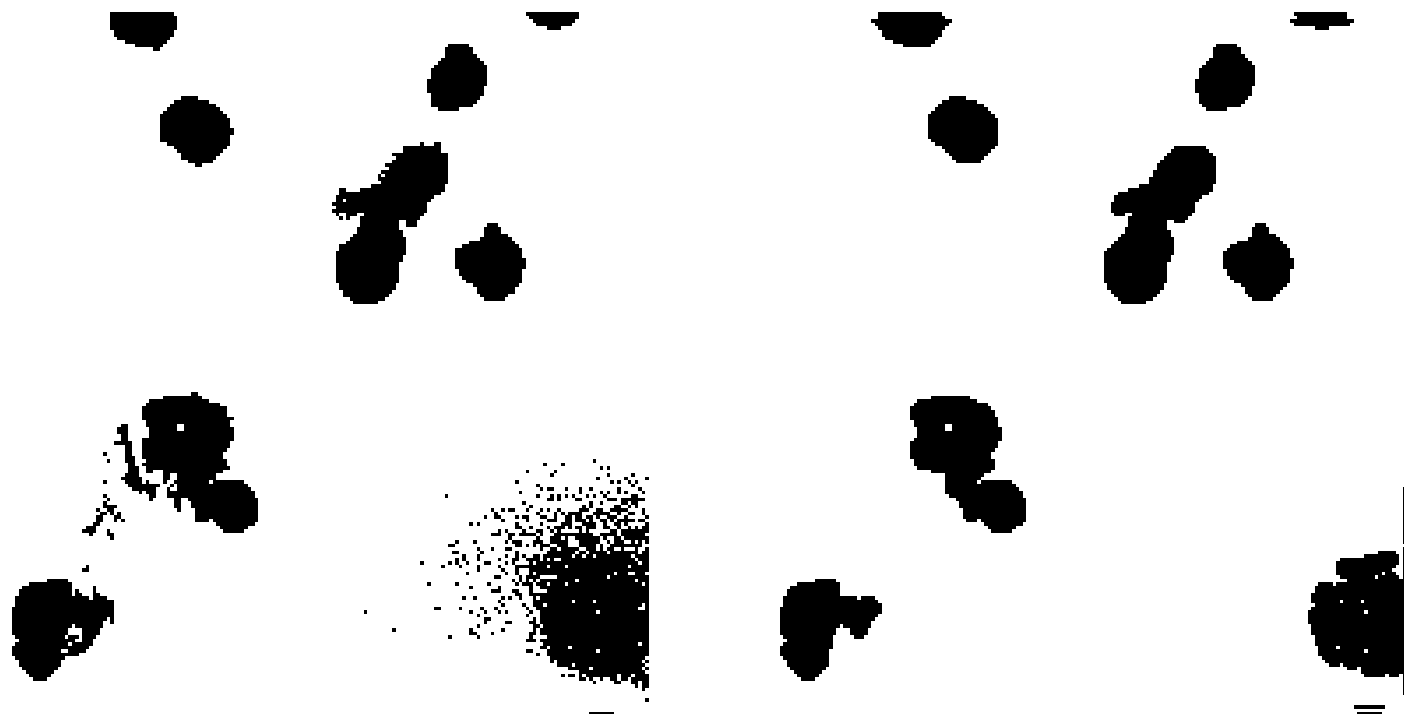
linéaire 16

Morphologie mathématique binaire

Ouverture, fermeture, « nettoyage » des détails

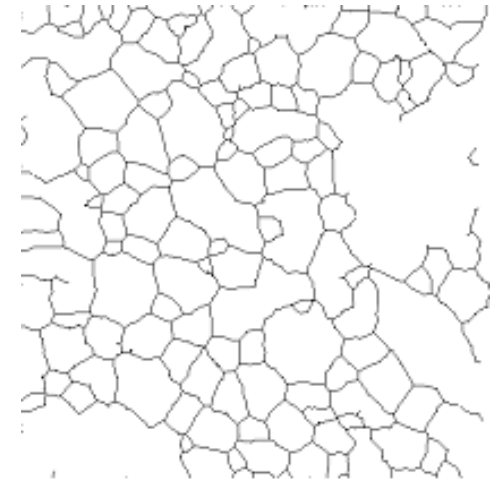
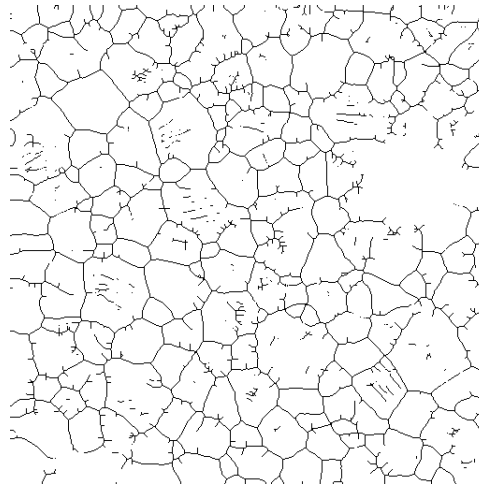
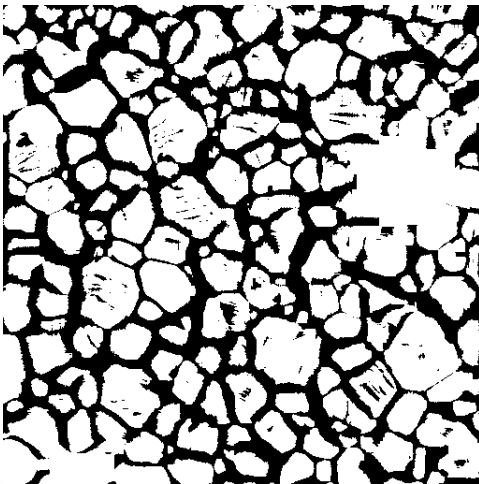
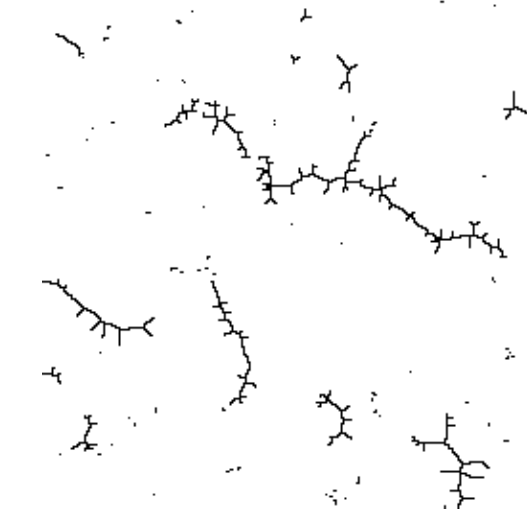
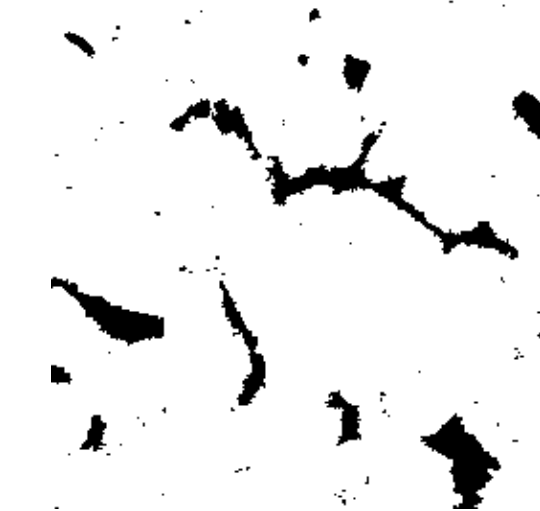
ouverture :

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

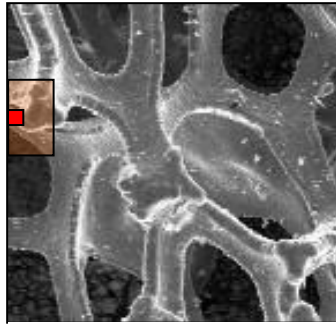
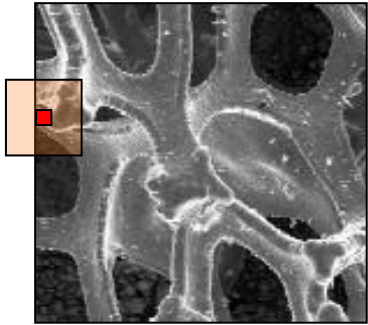


Morphologie mathématique binaire

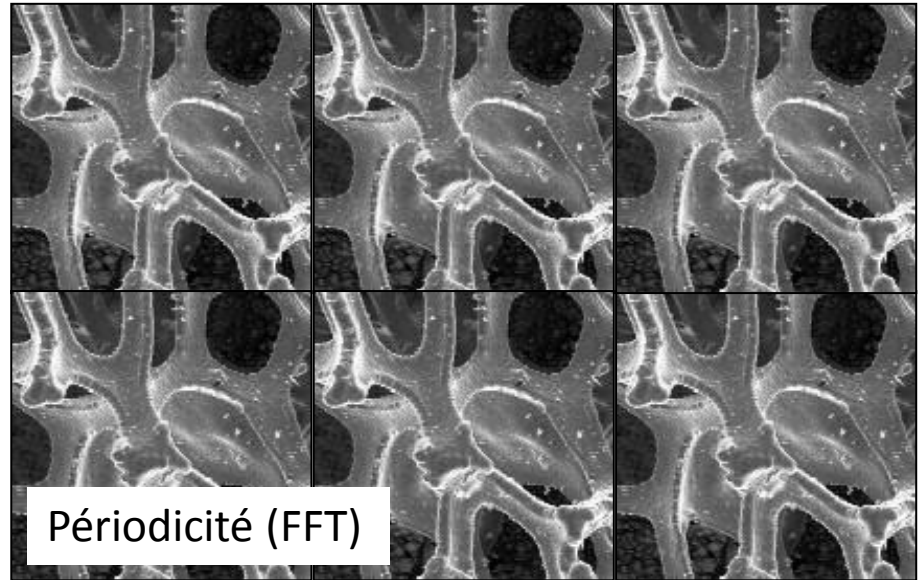
Amincissement, squelette, squelette par zones d'influence



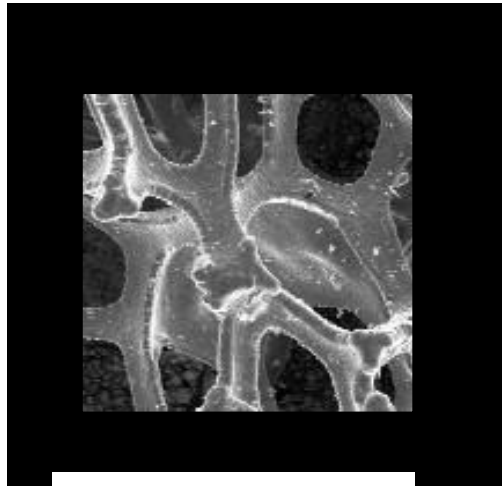
Et les bords de l'image?



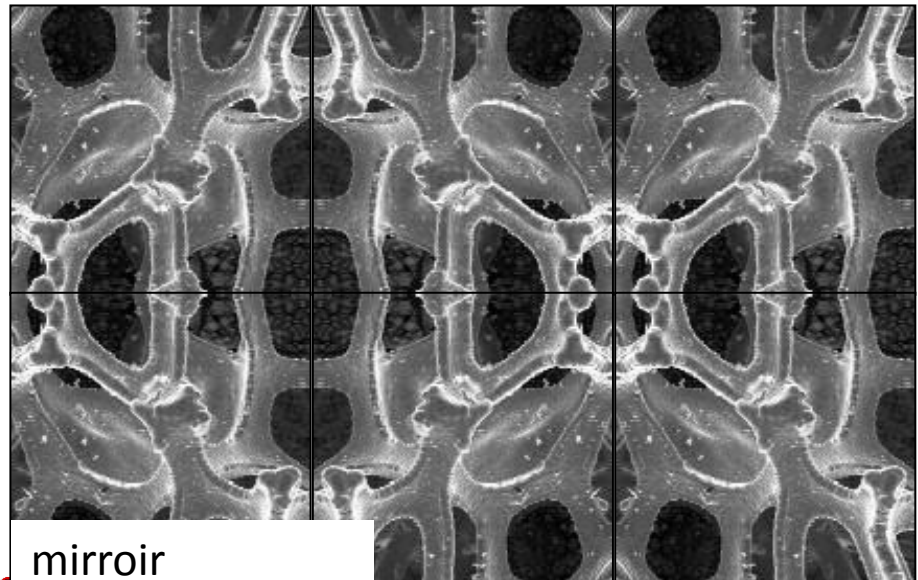
réduction du
filtre (pas
toujours possible)



Périodicité (FFT)



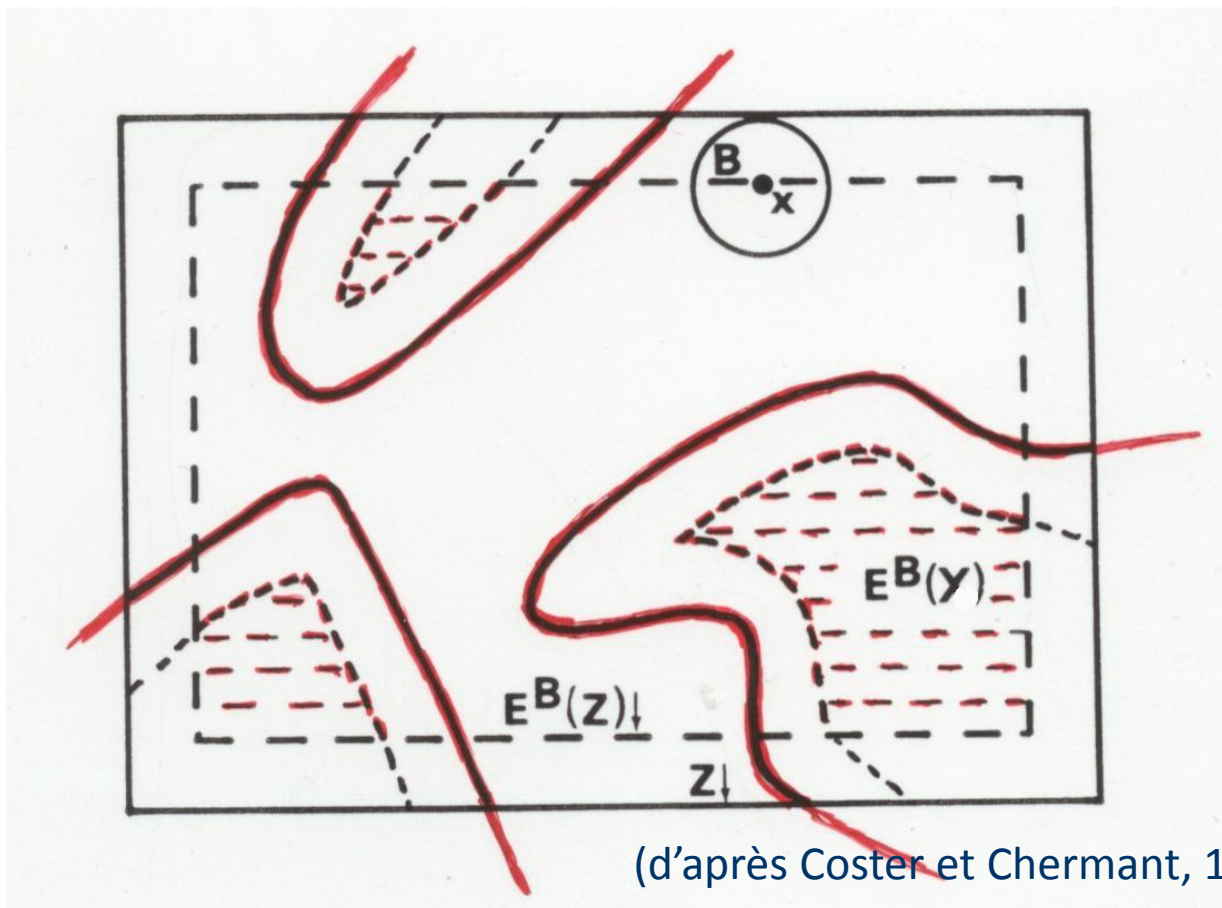
Noir autour



miroir

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 »



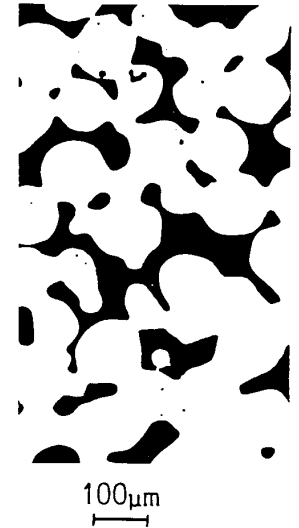
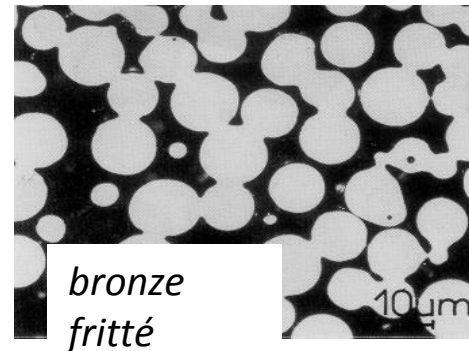
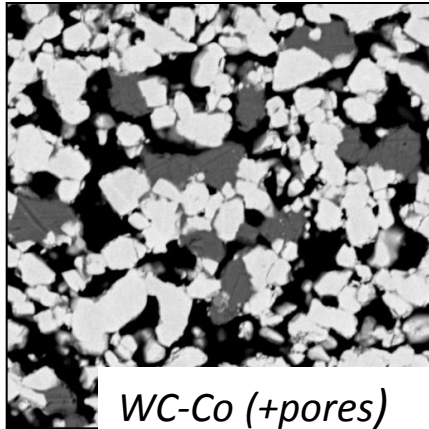
(d'après Coster et Chermant, 1989)

Mesures sur des images

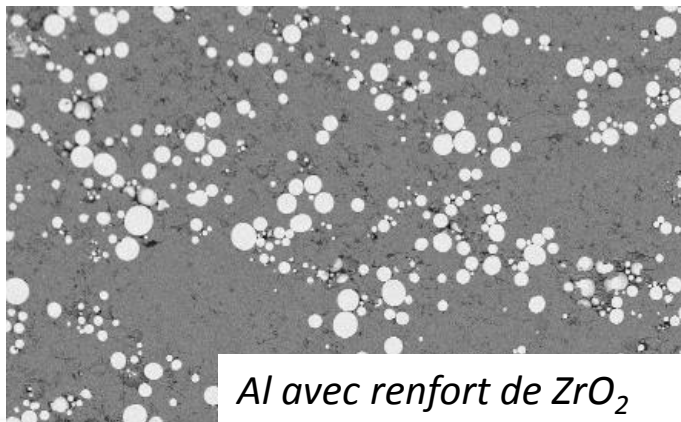
Analyse d'images

Analyse texturale

Quand on ne peut pas identifier des objets individuels



Quand on ne veut pas se limiter aux objets individuels



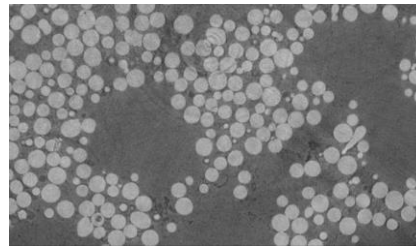
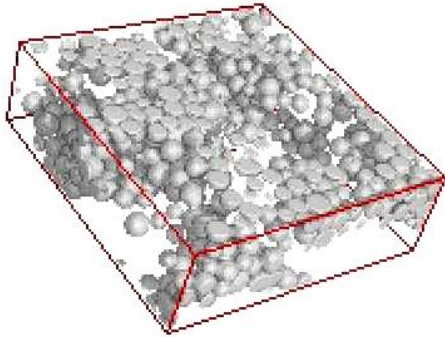
Quelles mesures pertinentes ?

- 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)

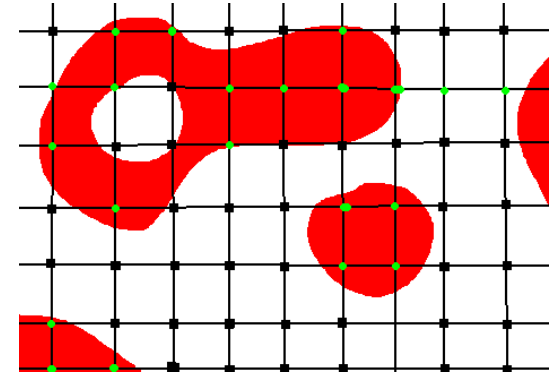
En 3 dimensions :	V_V	Fraction volumique
	S_V	Surface spécifique
	M_V	Intégrale de courbure moyenne/unité de volume
	N_V	Nombre de connexité par unité de volume (nombre d'objets si objets convexes)
En 2 dimensions :	A_A	Fraction surfacique
	L_A	Périmètre spécifique (/unité de surface)
	N_A	Nombre de 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	$N_P(\mathbf{X})$			

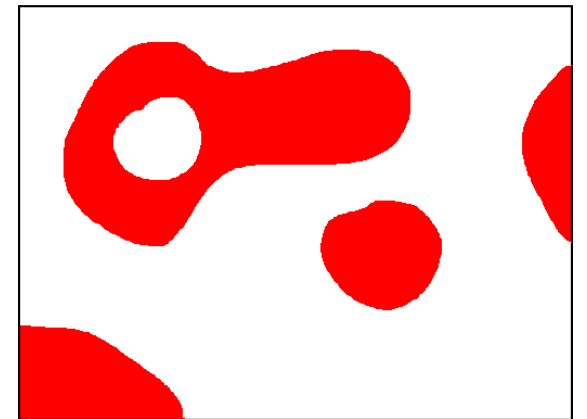
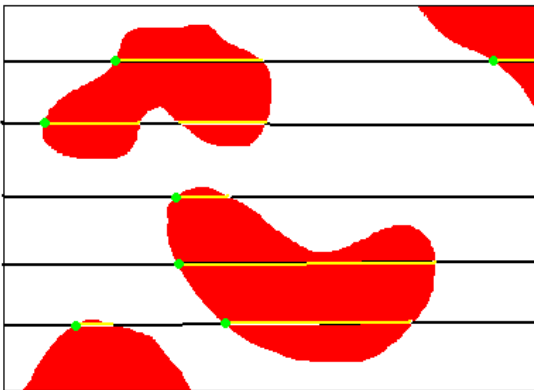
Structure isotrope

Mesures : de simples comptages

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



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

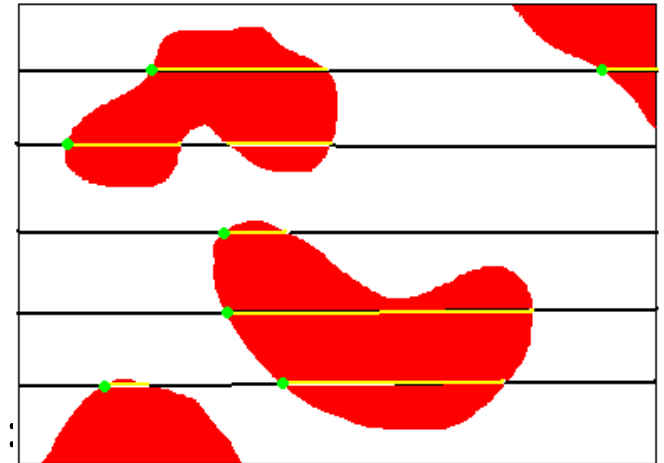


2D : Nombre d'objets et de trous: N_L , L_A , S_V
(en fait comptage de tangentes)

Paramètres secondaires

Corde moyenne (libre parcours moyen ou intercept moyen)
= longueur moyenne d'un segment de droite inclus

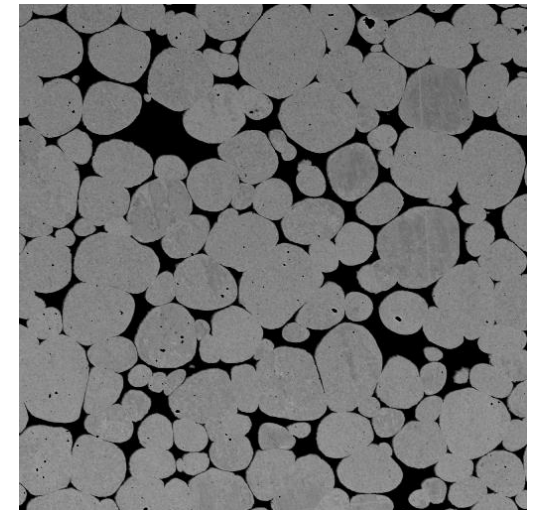
$$\bar{L}_1 = \frac{L_L}{N_L} = \frac{N_P}{N_L} = 4 \frac{V_V}{S_V} \dots = \frac{V_V}{N_L}$$



Corde moyenne dans deux phases complémentaires :

$$\frac{\bar{L}_1^2}{\bar{L}_1^1} = \frac{N_L^1 V_V^2}{N_L^2 V_V^1} \quad N_L^1 = N_L^2$$

$$\frac{\bar{L}_1^2}{\bar{L}_1^1} = \frac{V_V^2}{V_V^1} = \frac{1 - V_V^1}{V_V^1}$$



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)

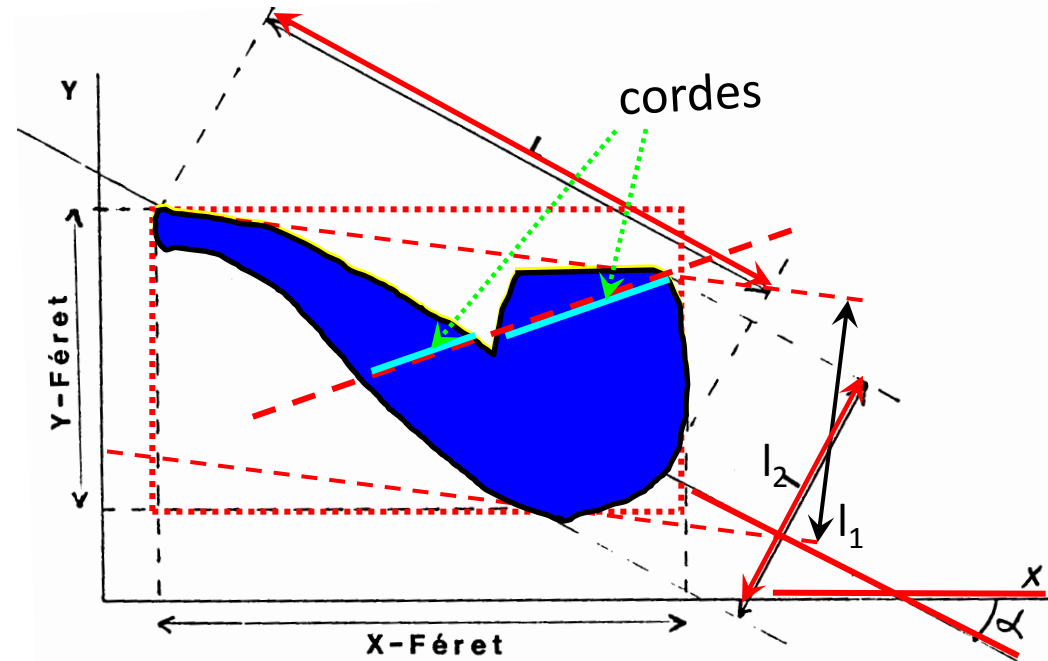
Diamètre équivalent (du cercle de même aire) :

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

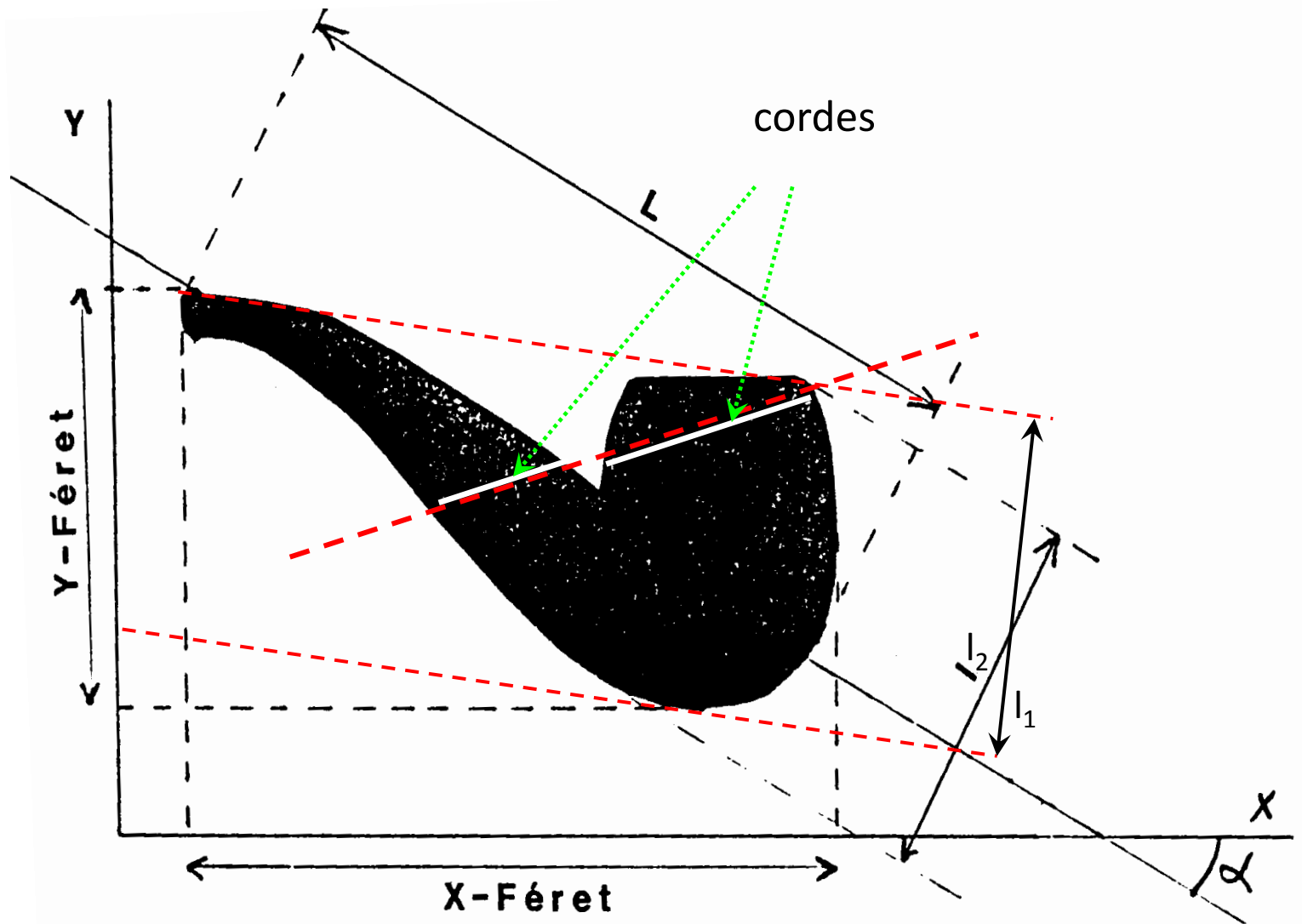


Ces paramètres sont exploités de façon statistique sur les différents objets: courbes de distribution, moyennes...

Journées GN-MEBA l'Image dans tous ses états...
Paris 7-8dec 2017

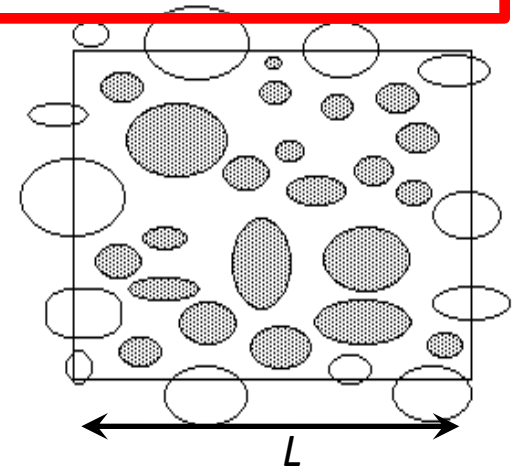
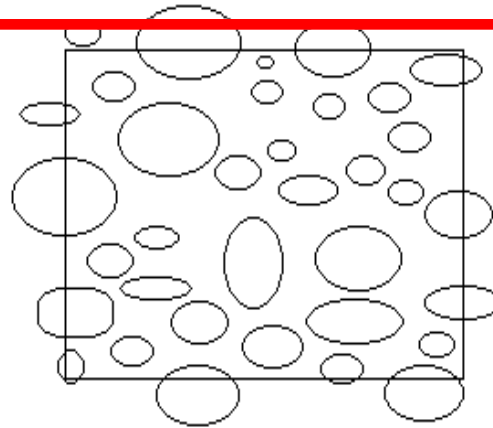


Analyse individuelle



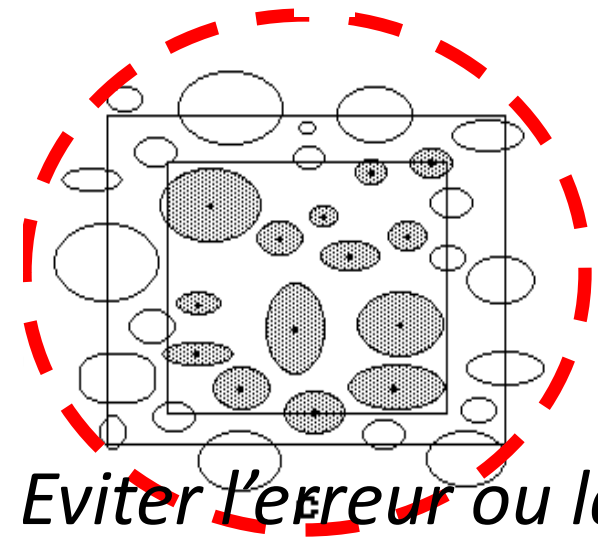
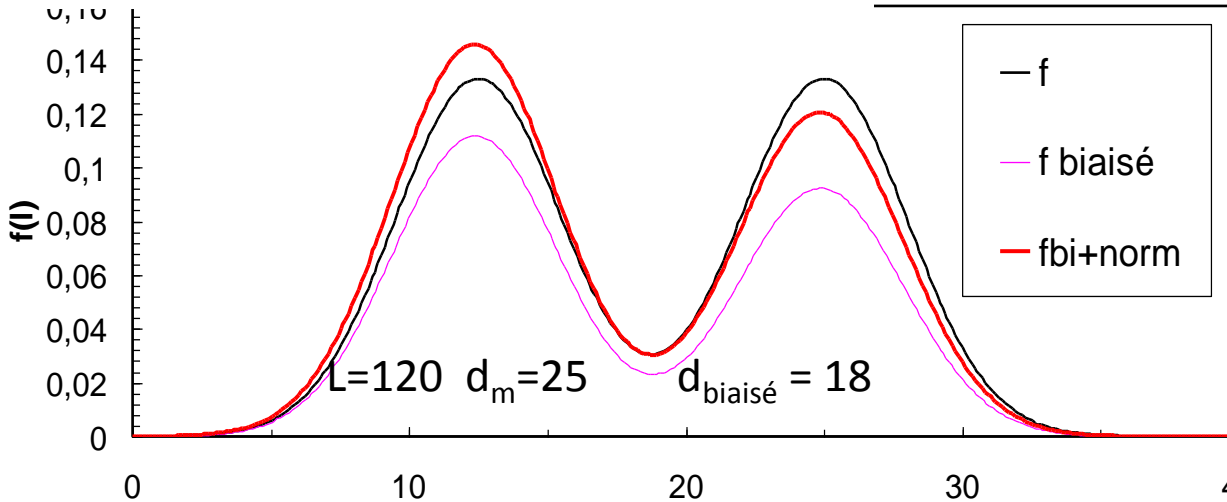
Bord d'image : bord de masque source d'erreur

Des particules touchent le bord : que faire ?



Les supprimer ? distributions biaisées...

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



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)

$$I_P = \sqrt{\frac{4\pi A}{L_2^2}}$$

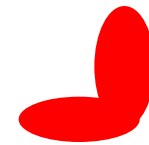
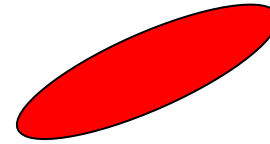


($L_2=P$ =périmètre)

- indice d'allongement :

(ne traduit réellement un allongement que pour des particules convexes)

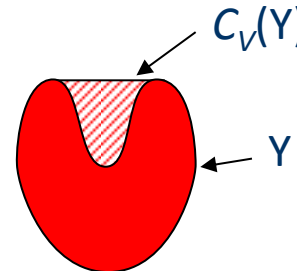
$$I_A = \frac{l}{L}$$



?

- 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

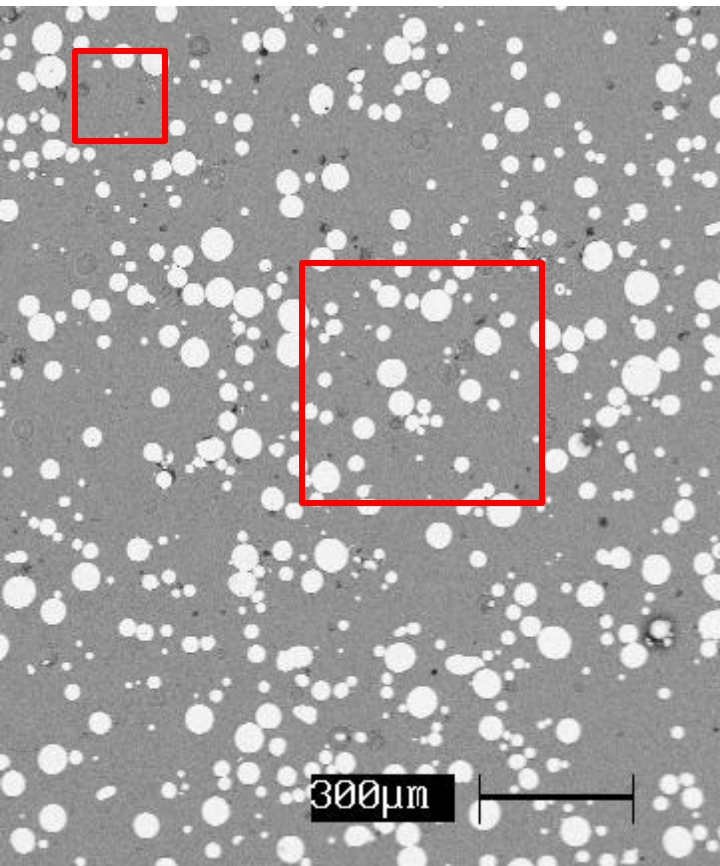


Catalyseur ou échangeur :
surface/volume

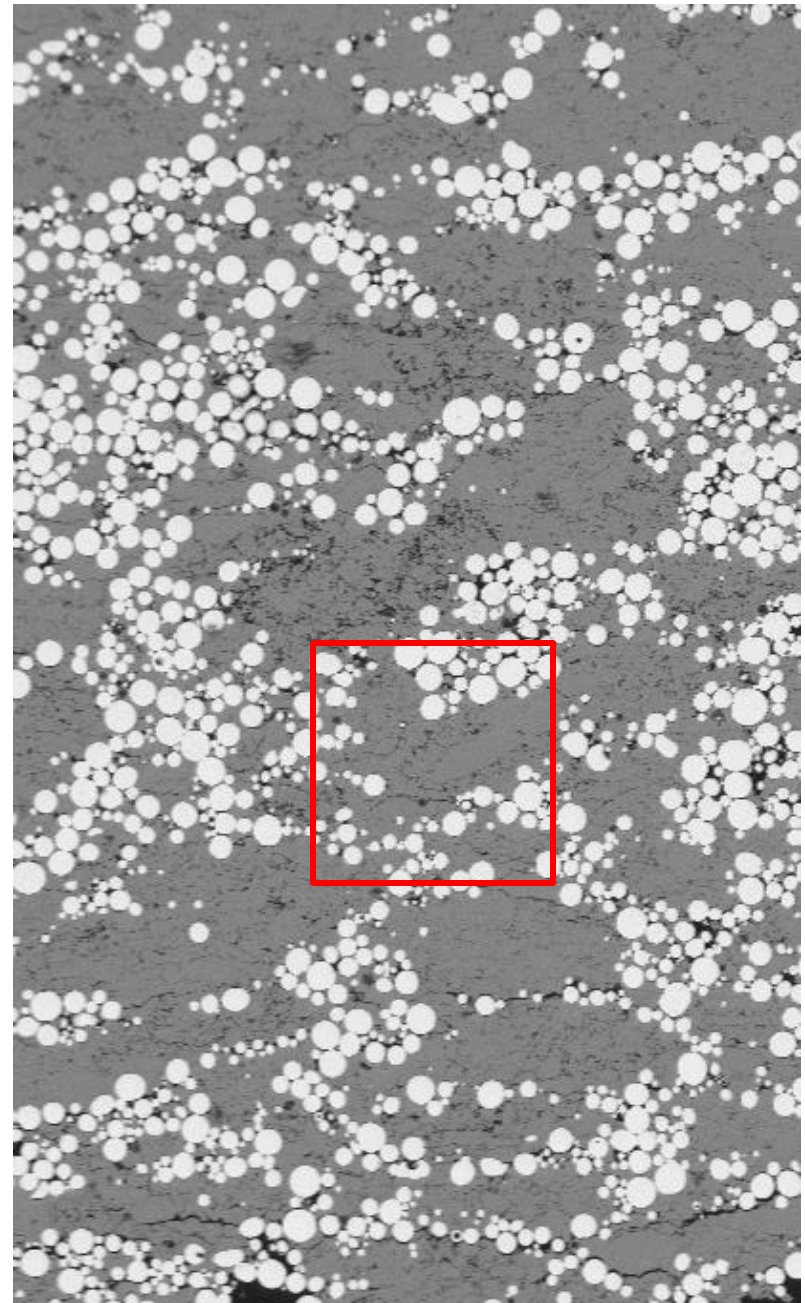
Défaut mécanique :
allongement,

Homogénéité

Dépend de l'échelle à laquelle on se place

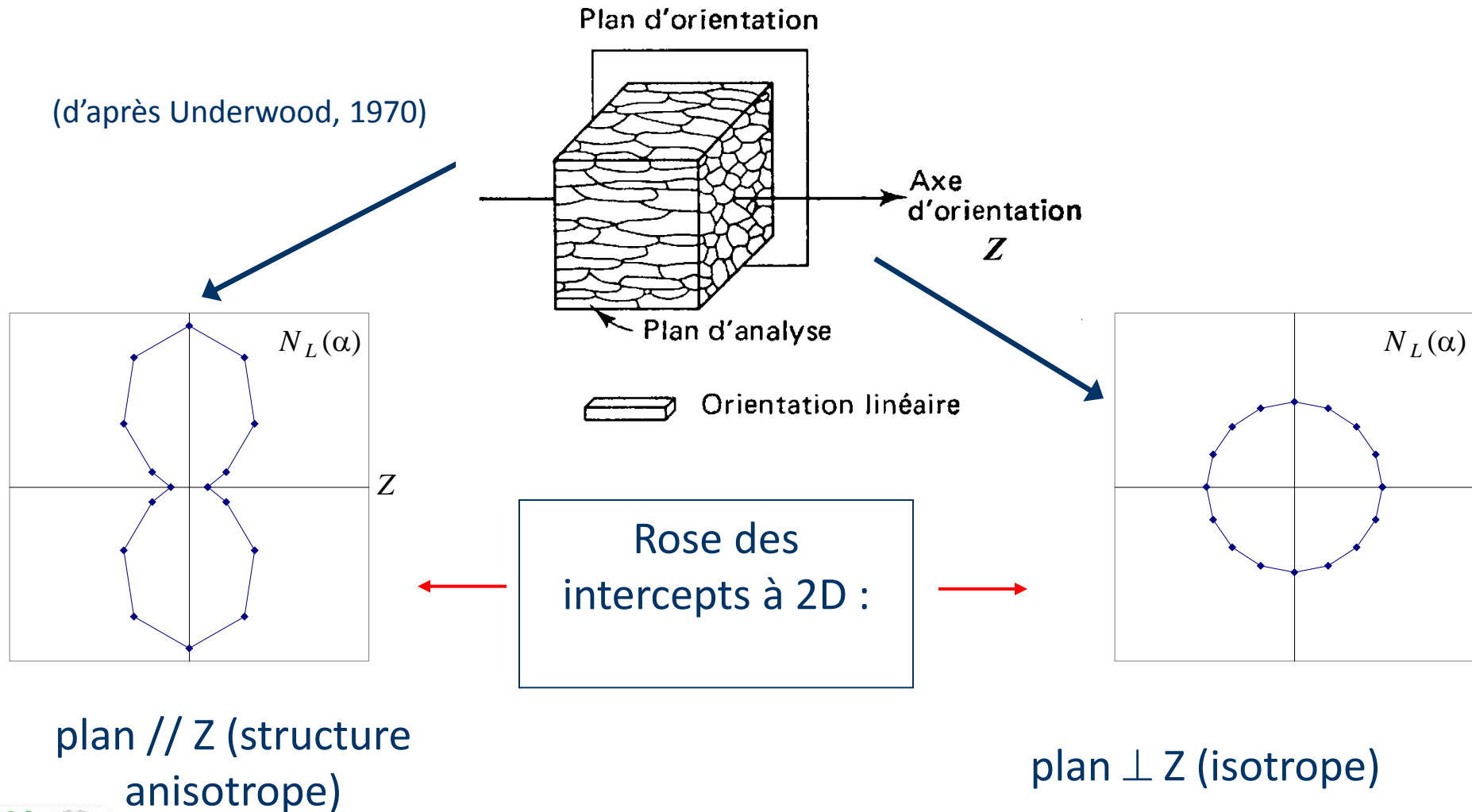


*Billes de zircone
(60 μ m) dans
une matrice Al*



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)