



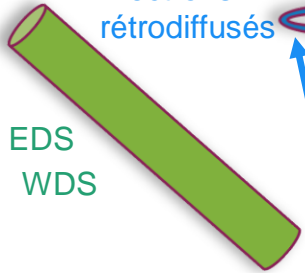
# De l'image à l'instrument en cartographie analytique

Christian Mathieu

[christian.mathieu@univ-artois.fr](mailto:christian.mathieu@univ-artois.fr)



Électrons  
rétrodiffusés



EDS  
WDS

Photons  
X

Faisceau  
d'électrons



Électrons  
secondaires



signal

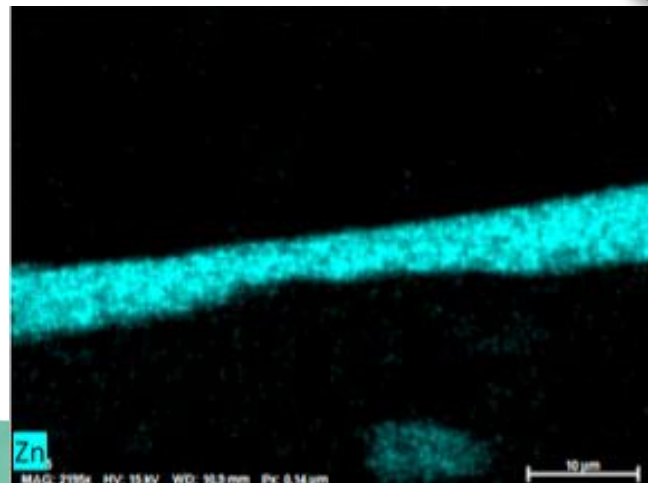
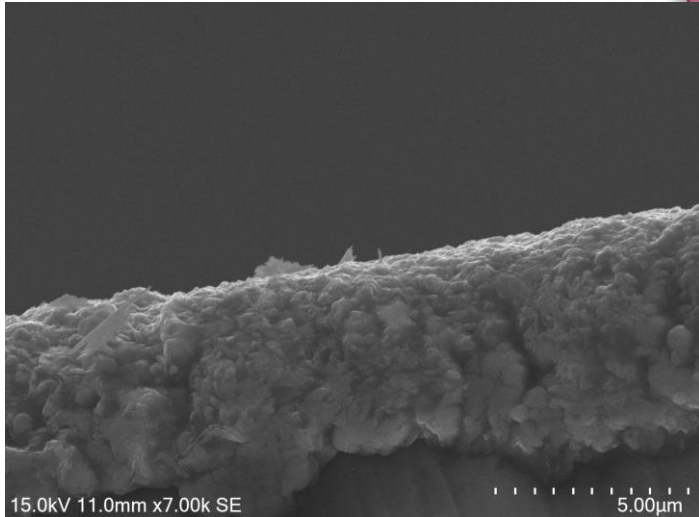
électrons, RX

MEB  
EDS  
WDS  
Microsonde

Image  
Cartographie



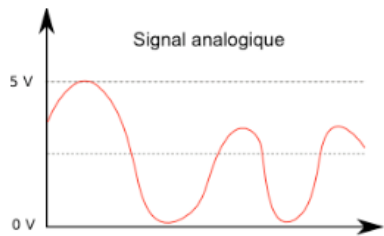
Image  
numérique





Signal  
analogique

Un signal  
**analogique** est  
un ensemble  
continu  
d'information



CAN



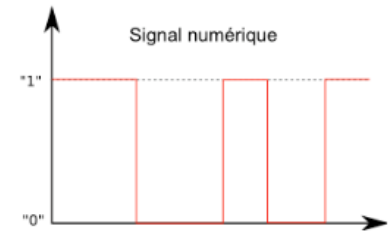
Signal 1D

Le passage de l'analogique au numérique se fait en  
deux étapes

- Échantillonnage
- Numérisation (codage)

Signal  
numérique

Un signal  
**numérique** est un  
ensemble  
discontinu  
d'informations.

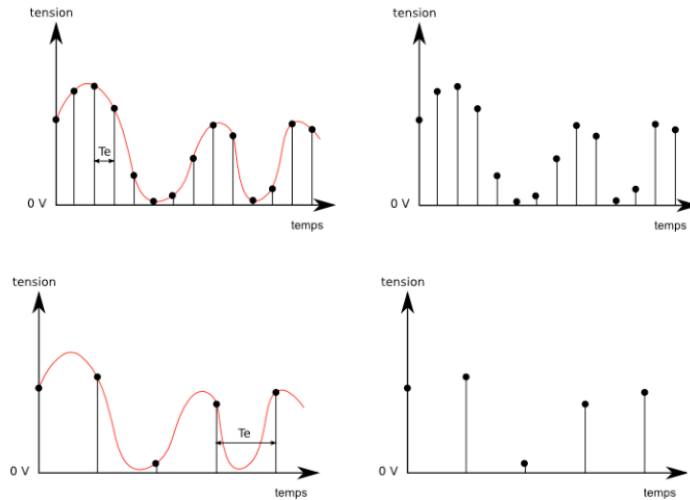


Ordinateur  
binaire (0 ou 1)



## échantillonnage

$$f_e = 1/T_e$$



Mauvais choix

Perte d'information

## Théorème de Shannon

Pour reconstruire un signal de sortie de manière fidèle au signal d'entrée, il faut choisir une fréquence d'échantillonnage au moins deux fois supérieure à la fréquence maximale contenue dans le signal analogique d'entrée.

$$f_e > 2f_{\max}$$



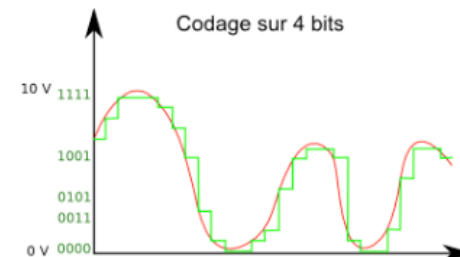
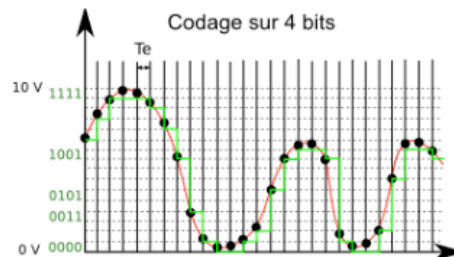
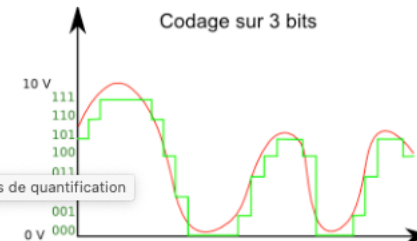
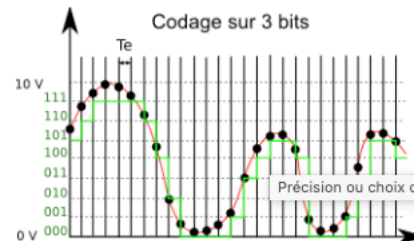
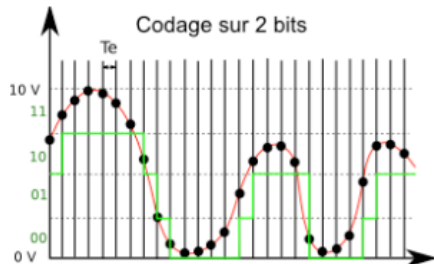
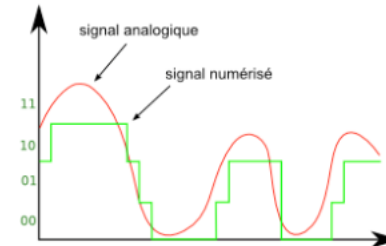
Codag

e

1 bit. 2 valeurs possibles à 0 ou 1  
 2 bits. 4 valeurs possibles. 00 01 10 11  $2^2$   
 3 bits. 8 valeurs possibles. 000 001.....111.  $2^3$   
 8 bits. 1 octet  $2^8 = 256$

Même fréquence  
 d'échantillonnage

Amplitude 10 volts



0 à 2,5 V, le code sera « 00 »  
 2,5 V à 5 V, le code sera « 01 »  
 5 V à 7,5 V, le code sera « 10 »  
 7,5 V à 10 V, le code sera « 11 »

Plus le nombre de bit est important, meilleure précision, espace occupé mémoire important

Stéréoscan MK1 Cambridge Instruments Company (1965). MEB Analogique

MEB Numérique

MEB Analogique

b) Champ imagé : 15  $\mu\text{m}$   
Courant :  $10^{-13}$  A  
Durée de l'enregistrement : 5 mn

Surface  
d'aluminium  
attaqué –  
16 kV

chondrite 310  
MAG: 320x HV: 15 kV WD: 11,5 mm Px: 0,33  $\mu\text{m}$

Image numérique  
en niveau de gris

Image numérique  
en couleur

6

Source Jacky Ruste  
Une petite Histoire de la  
microscopie (gnmeba)

Image signal bidimensionnel



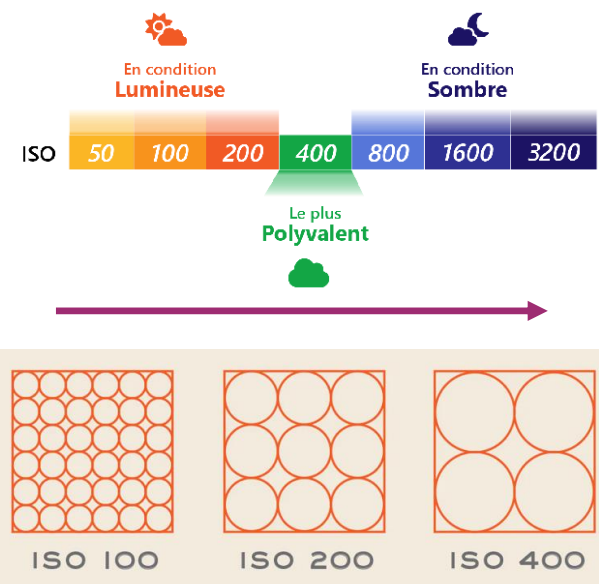
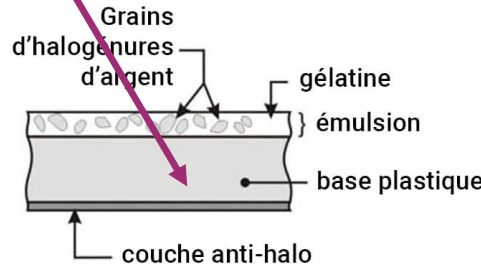
# Image analogique :



Le baiser de l'hôtel de ville  
Robert Doisneau (1950)

## Photo argentique

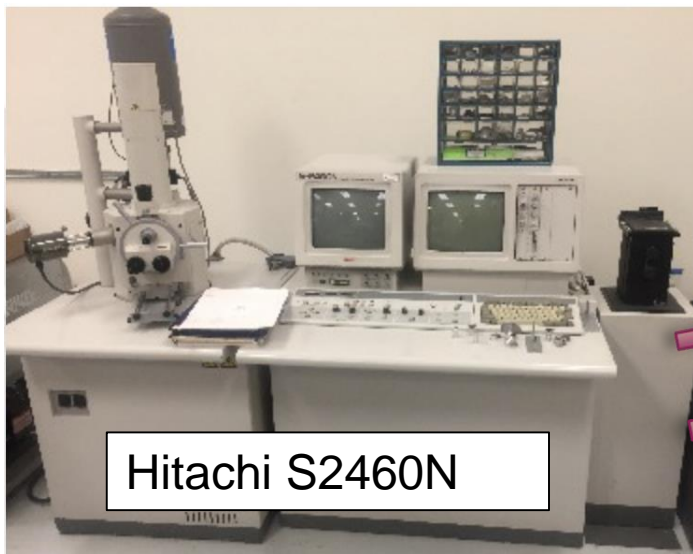
lumière



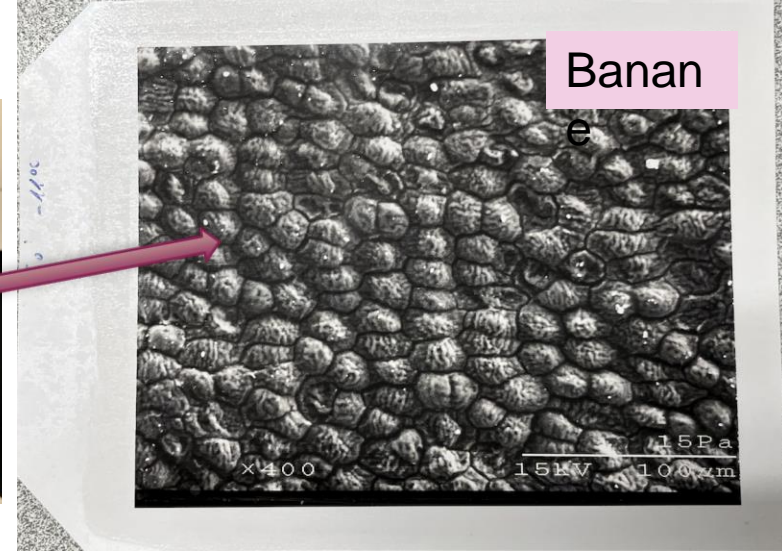
Le grain d'un film est constitué des cristaux d'argent visibles dans l'émulsion d'un négatif.  
**Ces halogénures d'argent photosensibles se transforment en argent métallique pur sous l'effet de la lumière, ce qui permet la capture d'une image sur la pellicule.**

Dans le cas d'une pellicule à grains fins, la taille moyenne d'un grain d'argent est d'environ 20  $\mu\text{m}$ . Il y en a donc environ 2000000 à la surface d'un négatif de 24 x 36 mm.

Un grain d'argent n'est pas l'équivalent d'un pixel puisqu'il ne peut **(à l'issue du développement)** être que réduit ou intact, alors qu'un pixel peut enregistrer l'intensité lumineuse reçue.



Hitachi S2460N



Banan

Développement instantané. Edwin Land (1934)  
1<sup>er</sup> appareil commercialisé 1948

Format polaroid (9\*11,7 cm)

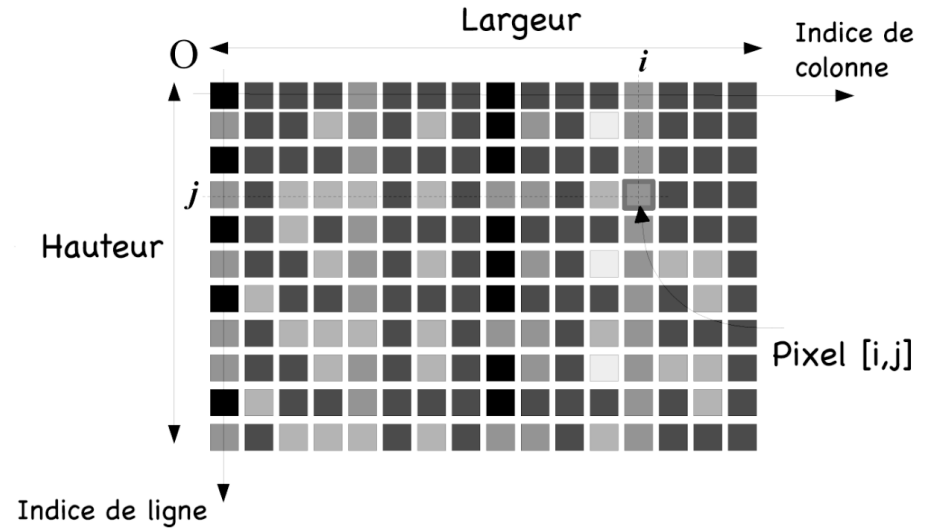
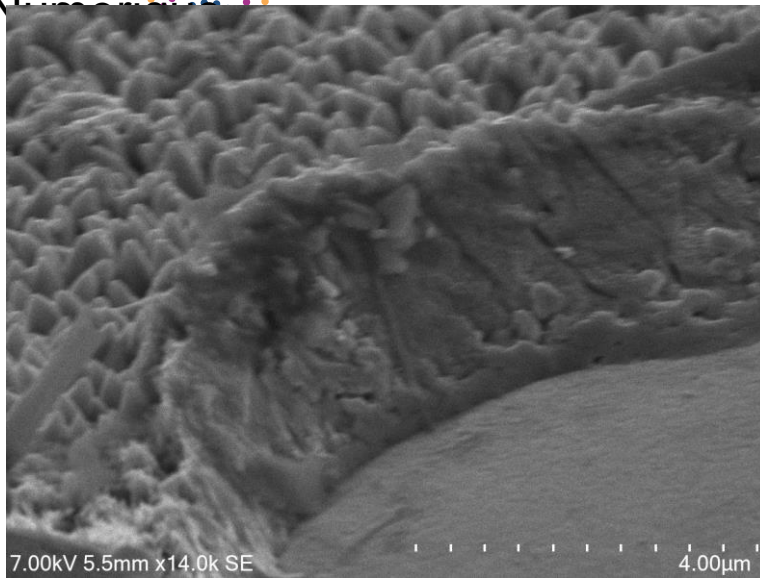
- Qualité des polaroids variable au sein d'une même boîte (reproductibilité des clichés)
- reproduction des clichés (photocopies)
- Coût

Qualité photographique (pas de pixellisation)

Imagerie numérique 1990



# Image



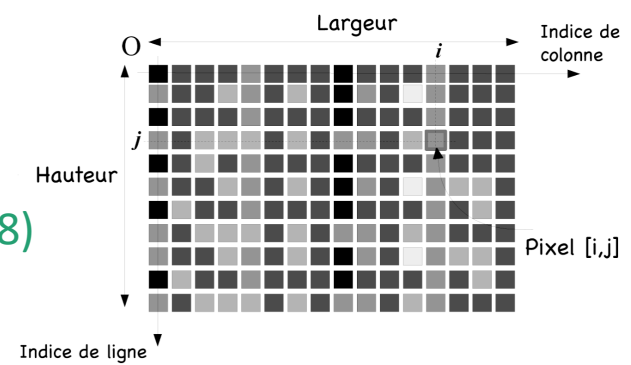
**Image numérique** : signal numérique composé d'unités élémentaires (pixels) qui représentent chacun une portion de l'image. Cette image est caractérisée par

- le nombre de **pixels** (largeur, hauteur)
- étendue des teintes de gris ou des couleurs que peut prendre chaque pixel → **dynamique de l'image**.

# Image

Numérique

Définition d'une image numérique.  $L \times H$ . (512x 512). (1024x768)



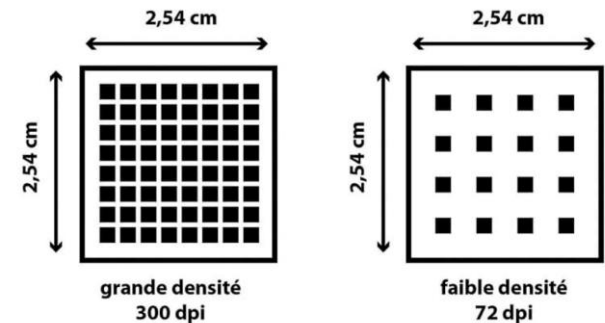
Résolution numérique d'une l'image. Nombre de pixel par unité de longueur, classiquement mesuré en ppp : points par pouce ppp ou ppi (pixels per inch) (dpi : dots per inch )

Taille du pixel

écran d'ordinateur : 72 à 96 dpi (21" → 1600x1200 en 96 dpi)  
impression sur support papier : 150 dpi  
impression photo : 300 dpi

150 dpi = 0,168 mm = 16,8  $\mu$ m

300 dpi = 0,084 mm = 8,4  $\mu$ m



Le choix de la définition d'une image va dépendre de la dimension du support final (écran, papier...)

Image de  
2400\*1600 pixels

15 cm



400 dpi

Image de  
600\*400 pixels

15 cm



100 dpi

Image de  
600\*400 pixels

3.75 cm



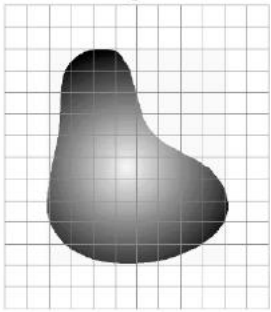
400 dpi

Source J Ruste  
GNMEBA 2017

# Image

Numérique

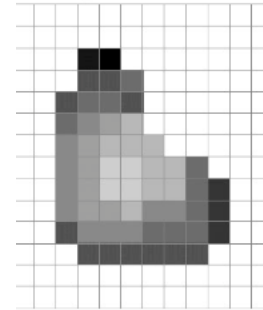
Image réelle



2 dimensions



Image numérisée



Signal  
analogique



Signal  
Numérique

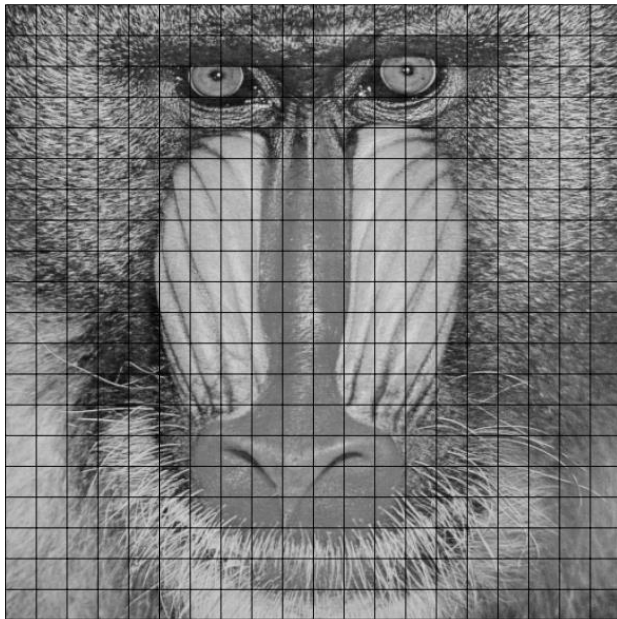
- échantillonnage
- numérisation (codage)

Image

Numérique

Echantillonnage

L'échantillonnage est une étape fondamentale qui doit prendre en compte le contenu de l'image à analyser



Pavage



512x512



256x256



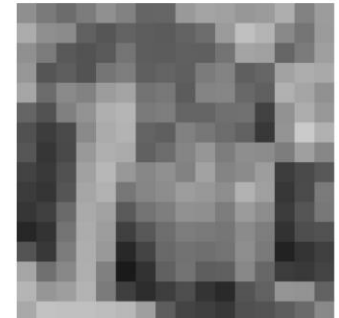
128x128



64x64



32x32



16x16

Résolution spatiale

# Quantification

En niveau de gris

Image  
Numérique  
MEB



8 bits



5 bits



4 bits



3 bits



2 bits



1 bit

Image  
binaire

Résolution tonale

Échelle  
de gris

Image en niveau de  
gris

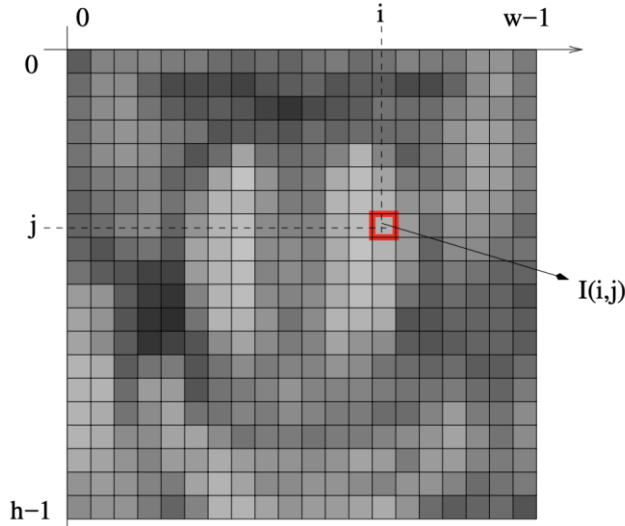
0=noir,  
255=blanc

chaque pixel est codé  
sur 8 bits (1 octet)

Le dynamique de  
l'image est donnée par  
 $\text{Log}_2 (N_{\text{max}} - N_{\text{min}})$

$2^8 = 256$  niveaux de  
gris



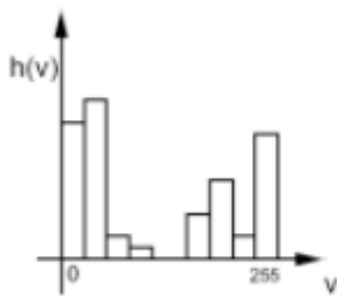


$I(i,j) = n$  est la valeur du niveau de gris  
 $n$  est compris entre  $Nmin$  et  $Nmax$



0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	67	28	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99	114	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	93	182	72	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	95	183	172	34	0	0	0	0
0	5	10	15	20	25	40	55	70	85	100	113	144	174	200	147	0	0	0	0	0
0	5	10	15	20	29	47	67	85	104	122	140	156	173	193	215	99	0	0	0	0
0	5	10	15	20	29	47	66	83	102	120	137	154	174	192	213	211	52	0	0	0
0	5	10	15	20	29	47	66	83	102	120	137	154	174	192	209	233	186	16	0	0
0	5	10	15	20	29	47	66	83	102	120	137	154	174	192	210	226	255	139	0	0
0	5	10	15	20	29	47	66	83	102	120	137	154	174	192	209	233	194	21	0	0
0	5	10	15	20	29	47	66	83	102	120	137	154	174	192	213	217	57	0	0	0
0	5	10	15	20	29	47	67	85	104	122	140	156	173	193	216	106	0	0	0	0
0	5	10	15	20	25	40	55	70	85	100	113	144	175	199	153	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	95	183	176	40	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	93	183	76	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99	119	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70	31	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Histogramme de l'image

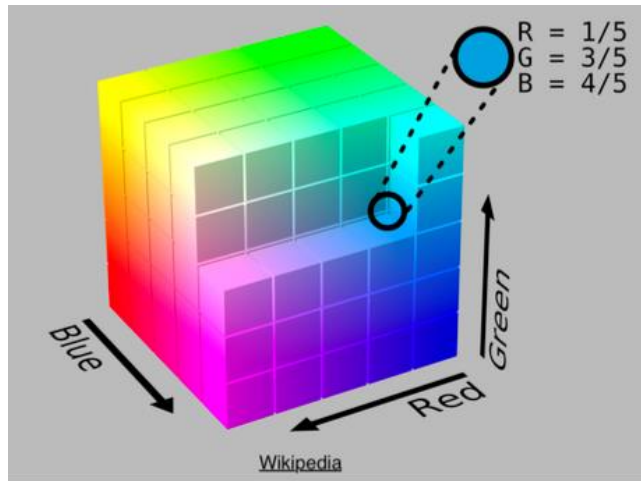


$\forall v \in \{0, \dots, 255\}$

$h_u(v) = \text{Nb de pixels d'intensité } v$

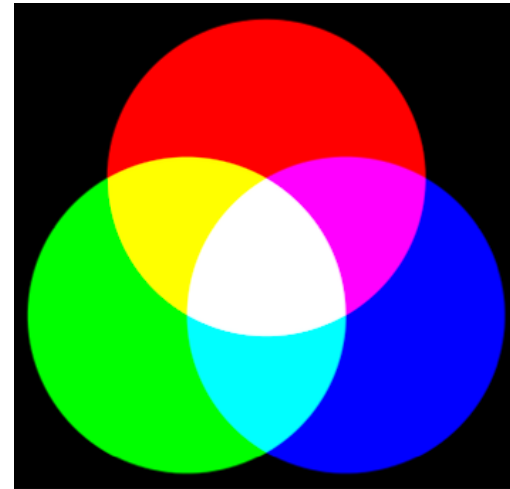


pixel



Espace couleur est basé sur la synthèse additive de 3 couleurs (rouge, vert, bleu) (RVB, RGB)

Chaque couleur est codée sur 8 bits (0 à 255)



Noir (0,0,0) Blanc (255,255,255)



$$\longleftrightarrow \begin{bmatrix} (0, 0, 0) & (128, 0, 0) & (255, 0, 0) \\ (0, 128, 0) & (128, 128, 128) & (255, 128, 0) \\ (0, 255, 0) & (128, 255, 0) & (255, 255, 255) \end{bmatrix}$$

Image

Numérique

R	V	B	Couleur
0	0	0	noir
0	0	1	nuance de noir
255	0	0	rouge
0	255	0	vert
0	0	255	bleu
128	128	128	gris
255	255	255	blanc

Ou  
encore

$$\left( \begin{bmatrix} 0 & 128 & 255 \\ 0 & 128 & 255 \\ 0 & 128 & 255 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 128 & 128 & 128 \\ 255 & 255 & 255 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 128 & 0 \\ 0 & 0 & 255 \end{bmatrix} \right)$$

R

G

B

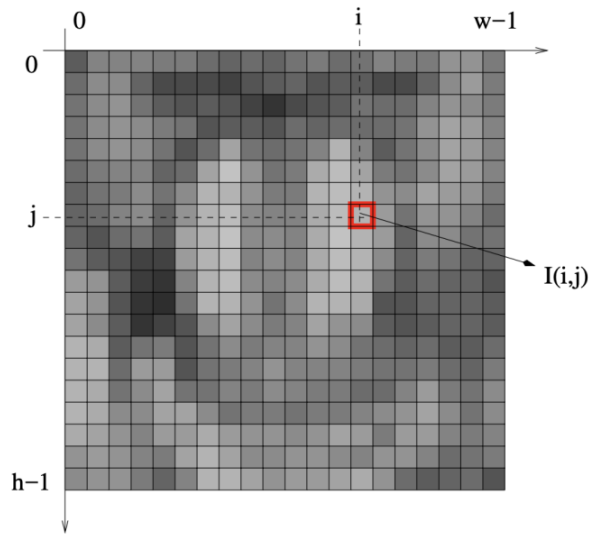
Soit  $256 \times 256 \times 256 = 16777216$  couleurs possibles pour un pixel



Image numérique



Image  
matricielle



137	139	137	128	119	126	130	129
129	124	118	115	120	147	181	182
117	93	87	117	141	160	185	203
115	84	79	111	142	166	178	191
119	87	73	97	135	155	176	187
116	91	77	84	118	150	173	188
117	97	84	78	101	131	160	177
111	104	90	78	78	105	142	170

$I(i, j)$ . Si on applique une fonction  $F$ .

$$I'(i, j) = F(i, j)$$

Traitement d'image

J. Marc Chaix, Jean Michel  
Missian ouvrage GNMEBA

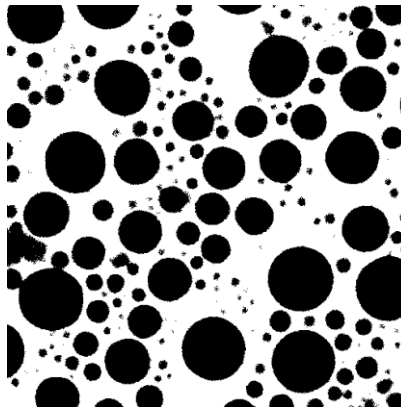
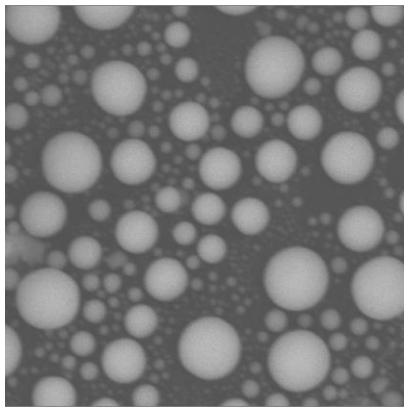
Image  
MEB

Cartographie analytique

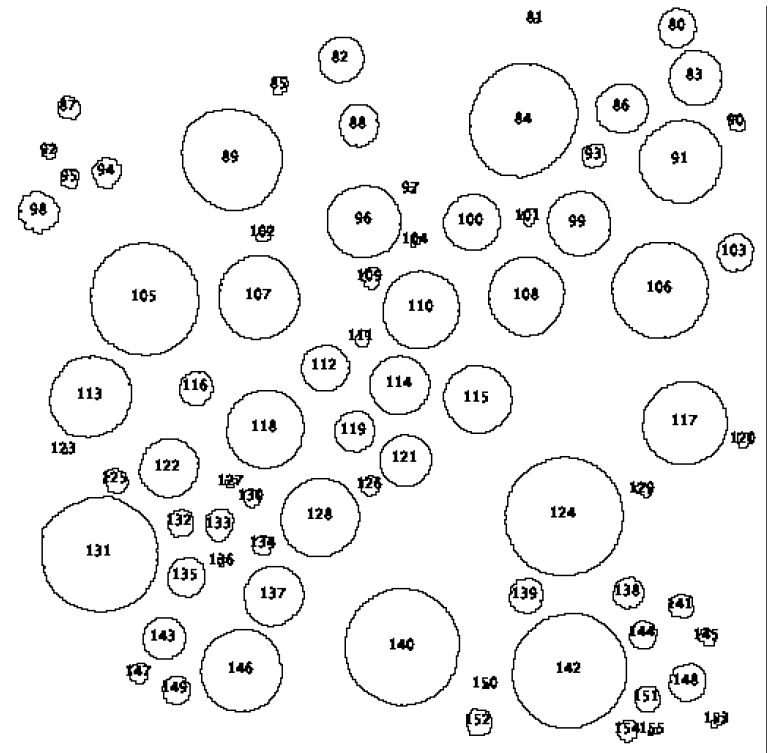


Mesure de taille de particules

Distribution de taille



Seuillage/ Binarisation



Distribution de taille



Analyse de particules

Image J



## Œil élément final de la chaîne d'observation

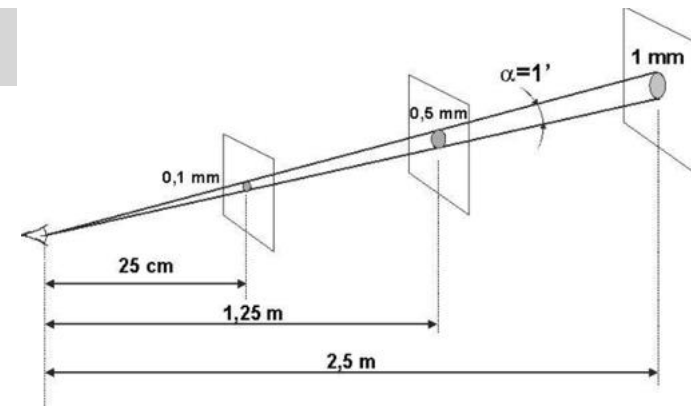


Observateur



Œil résolution angulaire

1 minute d'arc



Résolution  $0.1\text{ mm} = 100\text{ }\mu\text{m}$

Distance nette entre 2 détails

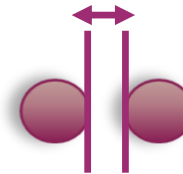


Image en 256 niveau de gris



œil sensibilité inférieure à 250 niveaux de gris

Image en couleur

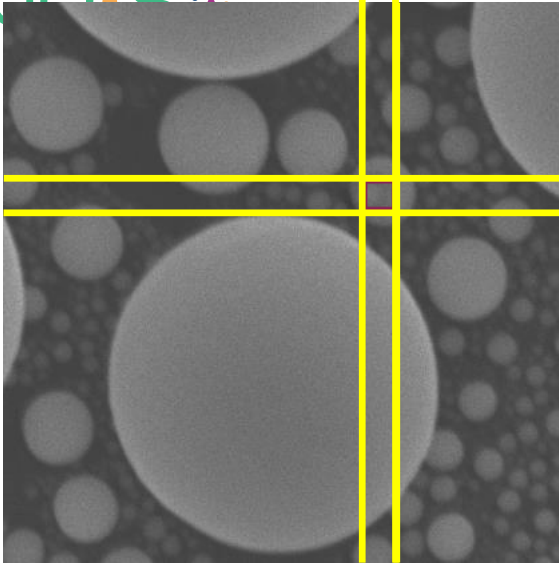


œil sensibilité à la couleur

Acuité visuelle fine 200 nuances par couleurs

Théorique  $200 \times 200 \times 200 = 8$  millions de couleur perçues

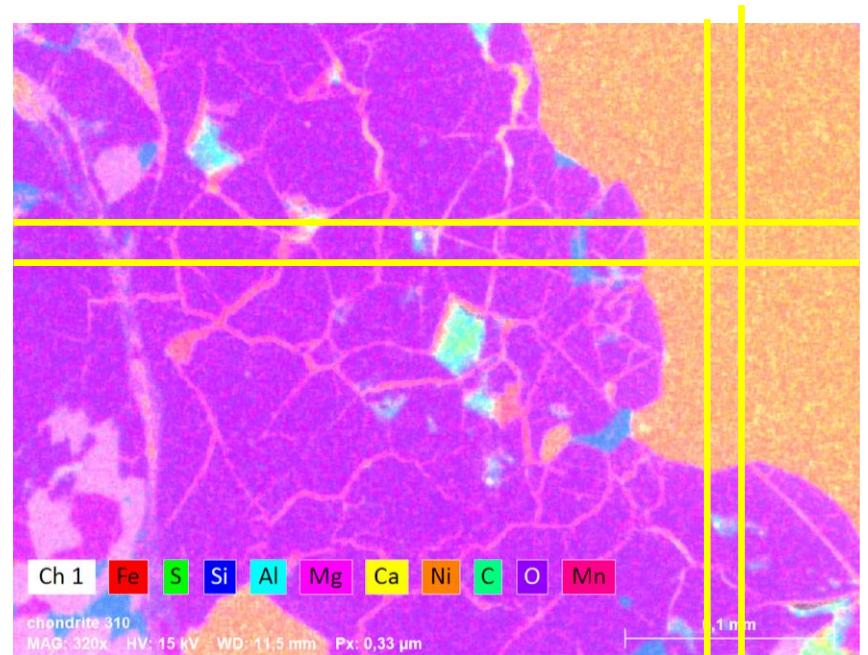
En réalité entre 300 000 et 1 million de couleur



Imagerie

Quel Signal provient du pixel

?



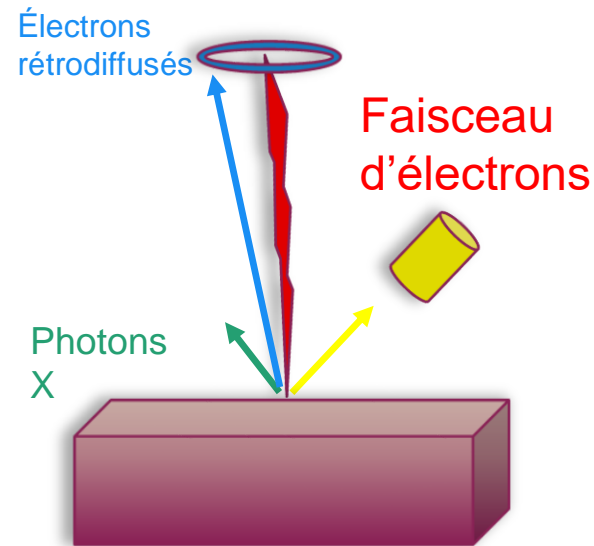
Cartographie

MEB

UCCS

Faisceau électronique qui balaie l'échantillon

Image  
séquentielle



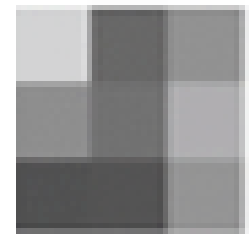
Pendant  $\Delta T$  (temps d'intégration)    Pendant  $9 \Delta T$  = temps de balayage

signa I	X1	X2	X3
Y1	900		
Y2			
Y3			

Dwell time (temps par pixel)

signa I	X1	X2	X3
Y1	900	500	650
Y2	650	600	750
Y3	400	400	650

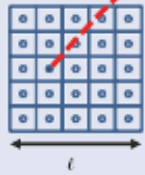
Vitesse de balayage



Dépendance  
avec le temps

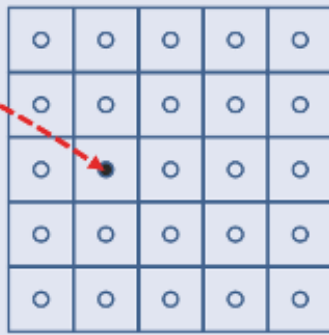
# Cartographie analytique

## Mesure dimensionnelle



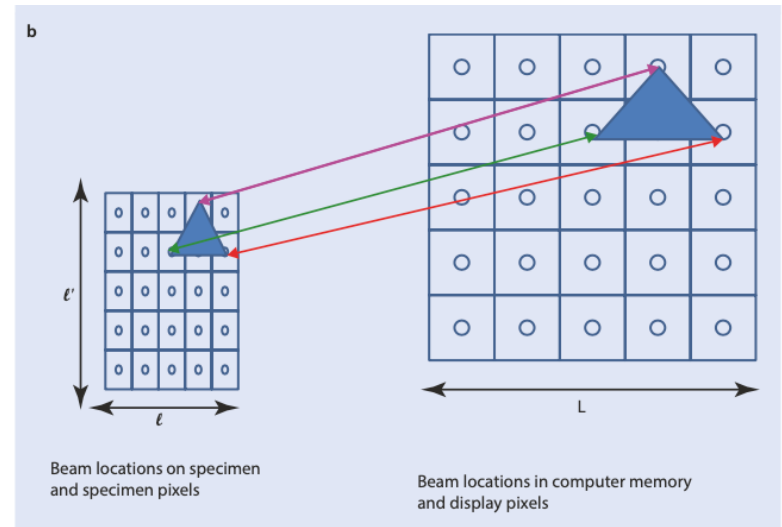
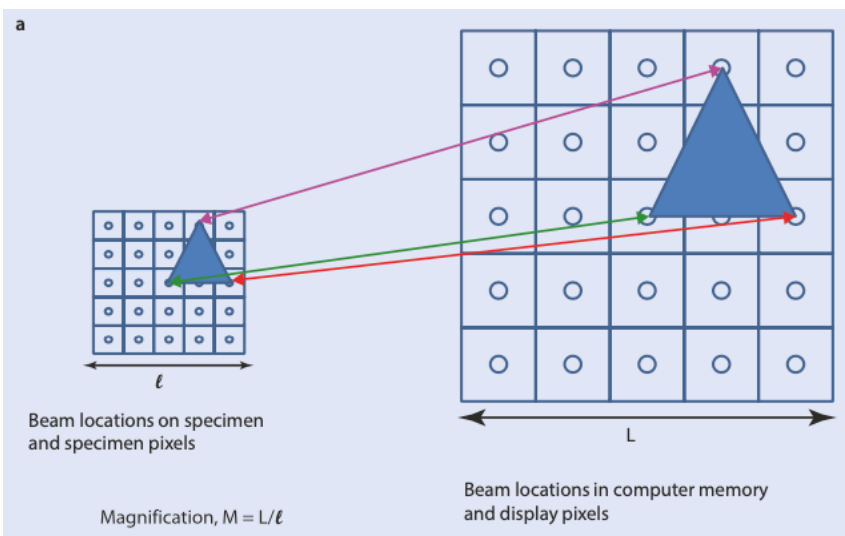
Beam locations on specimen  
and specimen pixels

Magnification,  $M = L/\ell$



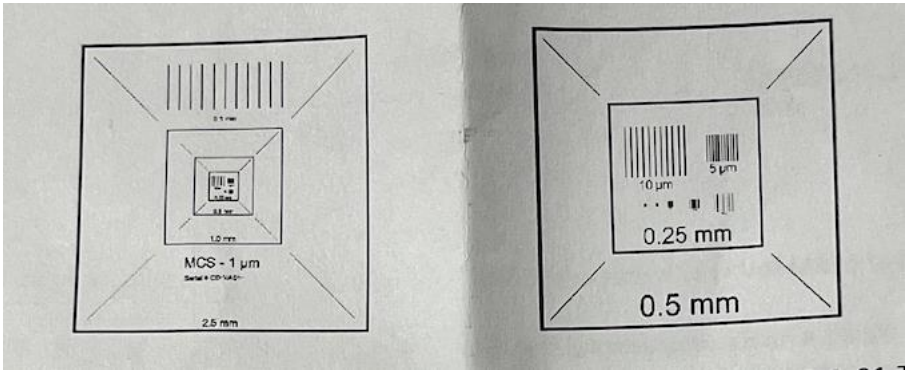
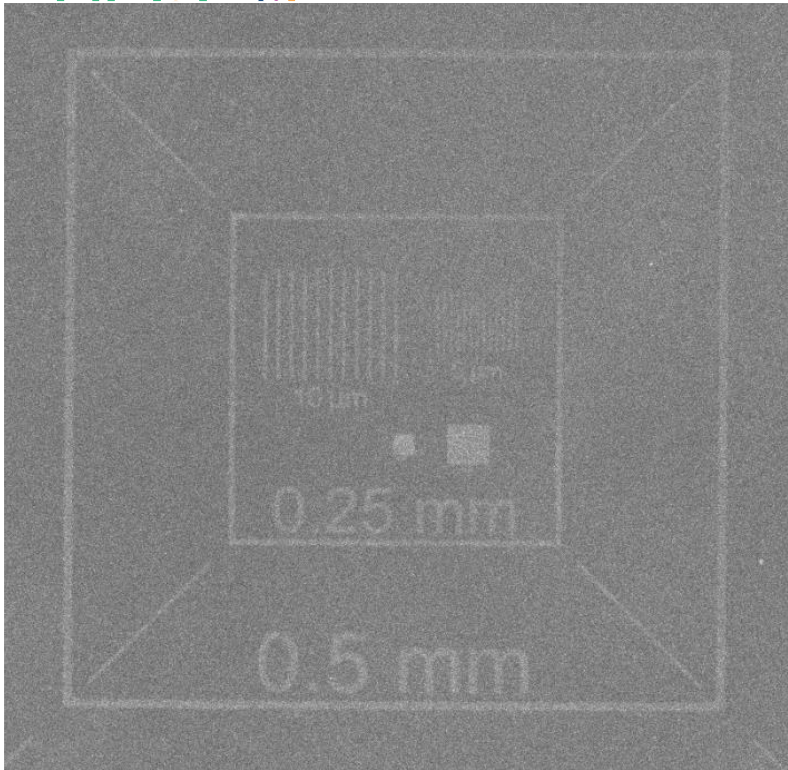
Beam locations in computer memory  
and display pixels

$L$

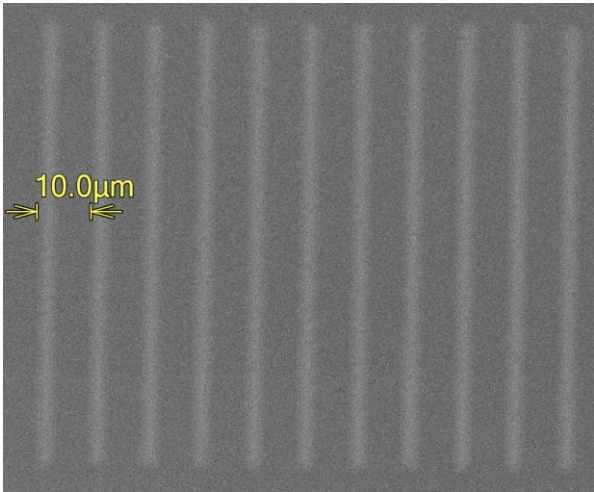


Contrôle du  
grandissement

# Contrôle du grandissement



Line	Average pitch of wafer	Average pitch uniformity (1σ uncertainty)	Total expanded uncertainty (3σ) average pitch for wafer*
2.5 mm	2.50 mm	± 2.5 µm (±0.10%)	± 8.75 µm (±0.35%)
1.0 mm	1.00 mm	± 1 µm (±0.10%)	± 3.5 µm (±0.35%)
0.5 mm	0.500 mm	± 0.5 µm (±0.10%)	± 1.75 µm (±0.35%)
0.25mm	0.250 mm	± 0.25 µm (±0.10%)	± 0.9 µm (±0.35%)
0.1 mm	0.100 mm	± 0.10 µm (±0.10%)	± 0.35 µm (±0.35%)
10 µm	10.00 µm	± 0.01 µm (±0.10%)	± 0.035 µm (±0.35%)
5 µm	5.00 µm	± 0.01 µm (±0.20%)	± 0.035 µm (±0.70%)
2.5 µm	2.50 µm	± 0.005 µm (±0.20%)	± 0.0175 µm (±0.70%)
1 µm	1.00 µm	± 0.002 µm (±0.20%)	± 0.007 µm (±0.70%)







## Relation grandissement taille de pixel

$$M = L/I$$

Format polaroid image (10\*10)

MEB SU  
3800

Nominal magnification (10 × 10-cm display)	Edge of scanned area (μm)	Pixel pitch (1000 x 1000-pixel scan)
40×	2500	2.5 μm
100×	1000	1 μm
200×	500	500 nm
400×	250	250 nm
1000×	100	100 nm
2000×	50	50 nm
4000×	25	25 nm
10,000×	10	10 nm
20,000×	5	5 nm
40,000×	2.5	2.5 nm
100,000×	1	1 nm
200,000×	0.5	500 pm
400,000×	0.25	250 pm
1,000,000×	0.1	100 pm

```
Format=tif
ImageName=Bille190525_0017_raw.tif
Directory=C:\Users\Public\Pictures\SemImage\
Date=05/19/2025
Time=11:14:28
Media=HD[Windows ]
DataSize=1280x960
PixelSize=9.919891
SignalName=BSE-COMP
DisplaySignalName=BSE-COMP
SEDetSetting=
AcceleratingVoltage=15000 Volt
DecelerationVoltage=0 Volt
DecelerationMode=
Magnification=10002
WorkingDistance=5153.06 um
EmissionCurrent=61000 nA
PhotoSize=1000
MagnificationDisplay=0
Vacuum=6
MicronMarker=5000
SubMagnification=0
SubSignalName=
SpecimenBias=0 V
Condenser1=30000
ScanSpeed=Capture_Slow(20)
CaptureSpeed_Integration=
CalibrationScanSpeed=24
ImgEnhance=0
ColorMode=Grayscale
```

Set Scale

Image J

## En Imagerie

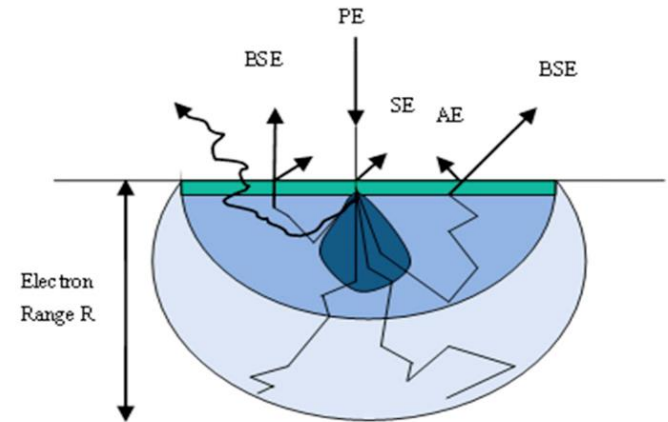
### Origine du

### Pénétration électronique

### Relation de Kanaya-Okayama

$$R_{K-O} \text{ (nm)} = 27.6 \left( A / Z^{0.89} \rho \right) E_0^{1.67}$$

$E_0$  (keV),  $A$  (g/mol),  $\rho$  (g/cm<sup>3</sup>)



	5 keV (nm)	10 keV	20 keV	30 keV (μm)
C	450 nm	1.4 μm	4.5 μm	8.9 μm
Al	413 nm	1.3 μm	4.2 μm	8.2 μm
Fe	159 nm	505 nm	1.6 μm	3.2 μm
Ag	135 nm	431 nm	1.4 μm	2.7 μm
Au	85 nm	270 nm	860 nm	1.7 μm

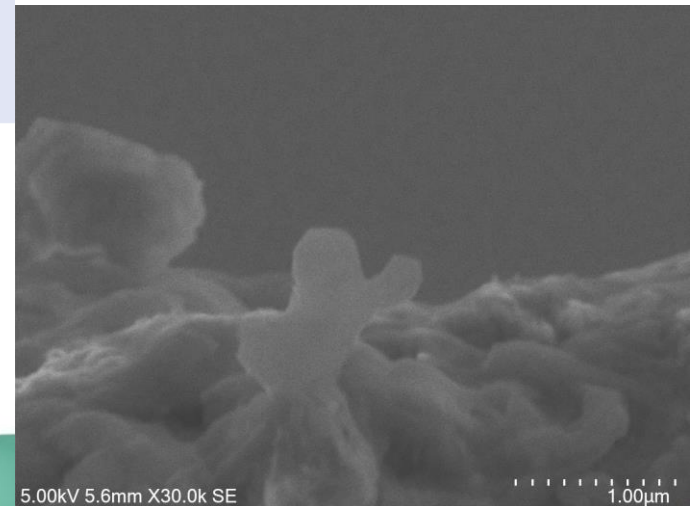
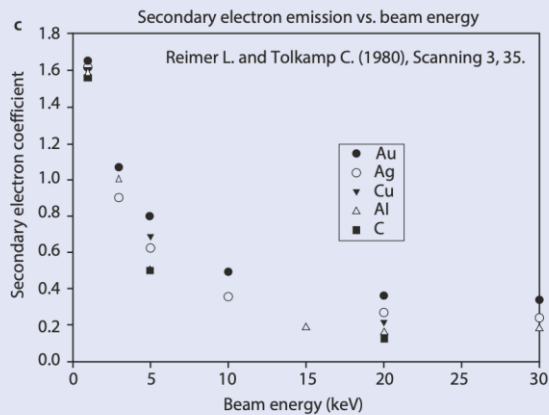
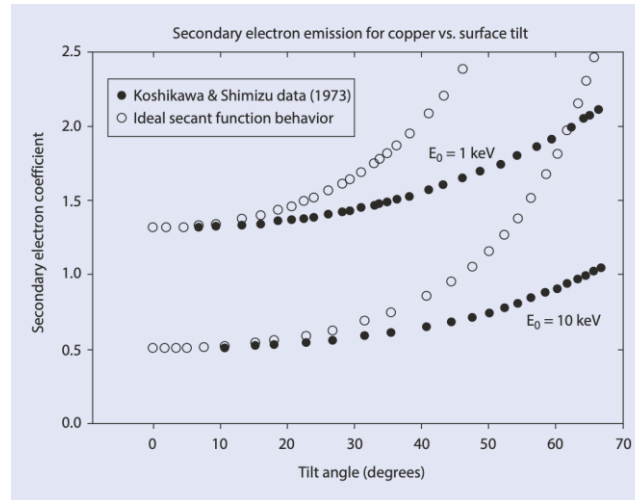
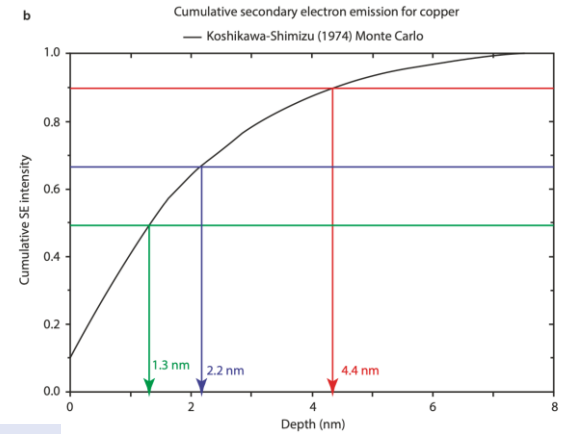
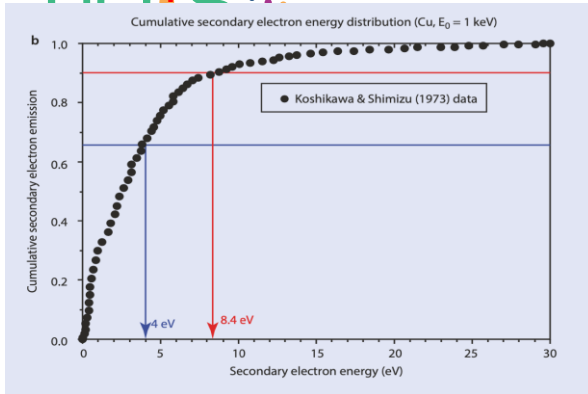
Kanaya K, Okayama S (1972) Penetration and energy-loss theory of electrons in solid targets. J Phys D Appl Phys 5:43

# Quel Signal provient du pixel

## Électrons

## Imagerie

### Contraste topographique

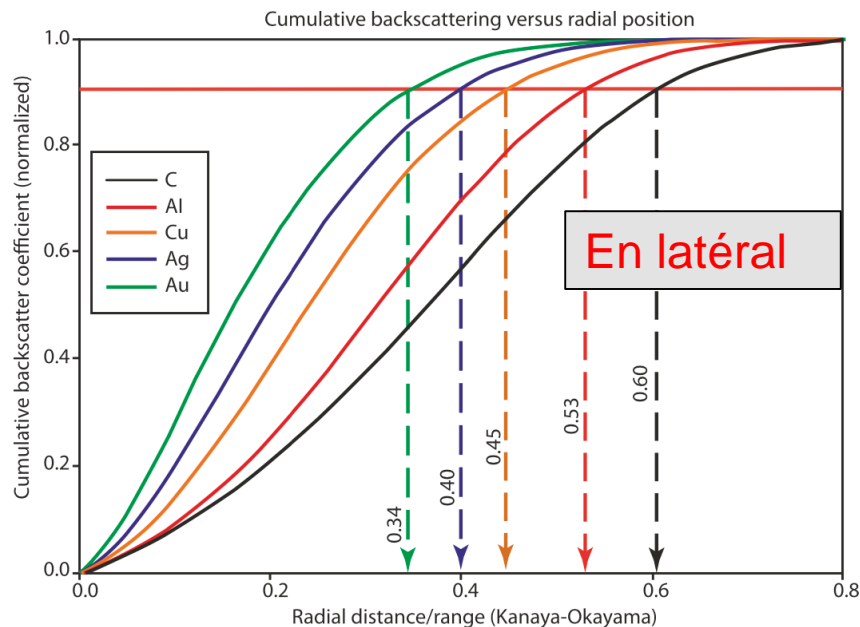


# Quel Signal provient du pixel ?

LICCS

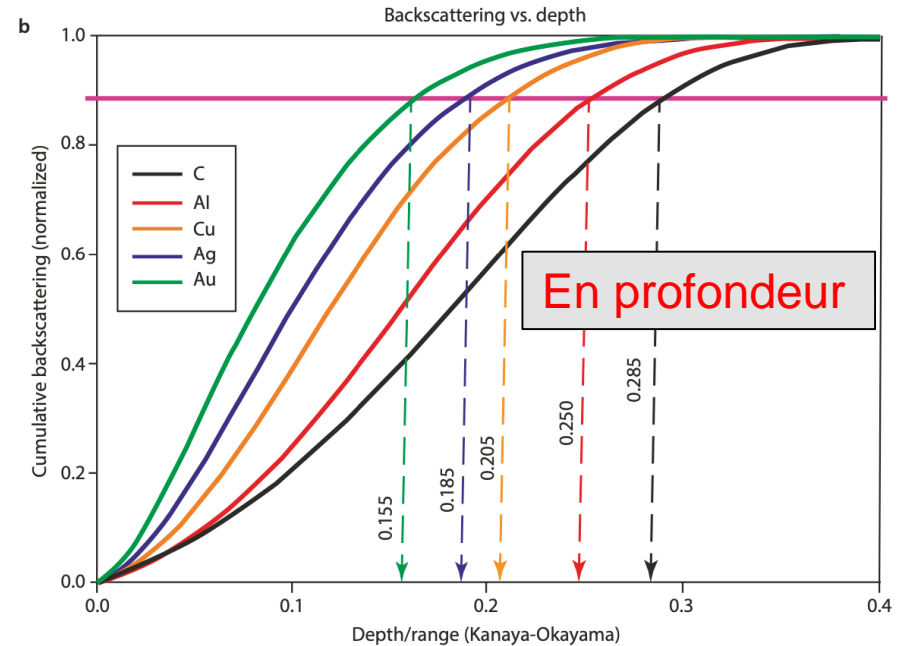
	5 keV (nm)	10 keV	20 keV	30 keV (μm)
C	450 nm	1.4 μm	4.5 μm	8.9 μm
Al	413 nm	1.3 μm	4.2 μm	8.2 μm
Fe	159 nm	505 nm	1.6 μm	3.2 μm
Ag	135 nm	431 nm	1.4 μm	2.7 μm
Au	85 nm	270 nm	860 nm	1.7 μm

Casino 20keV tilt 0°



## Électrons

## Imagerie



$$\eta = -0.0254 + 0.016Z - 1.86 \times 10^{-4} Z^2 + 8.3 \times 10^{-7} Z^3$$

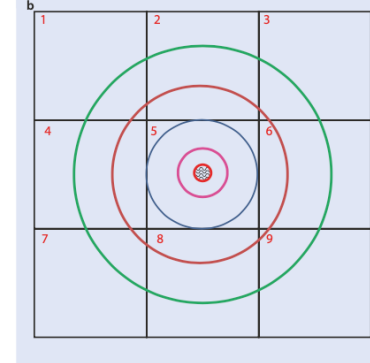
Contraste de numéro  
atomique

Reuter W (1972) Electron backscattering as a function of atomic number. In: Shinoda G, Kohra K, Ichinokawa T (eds) Proceeding 6th International Cong x-ray optics and microanalysis. University of Tokyo Press, Tokyo, p 121

# Quel Signal provient du pixel ?

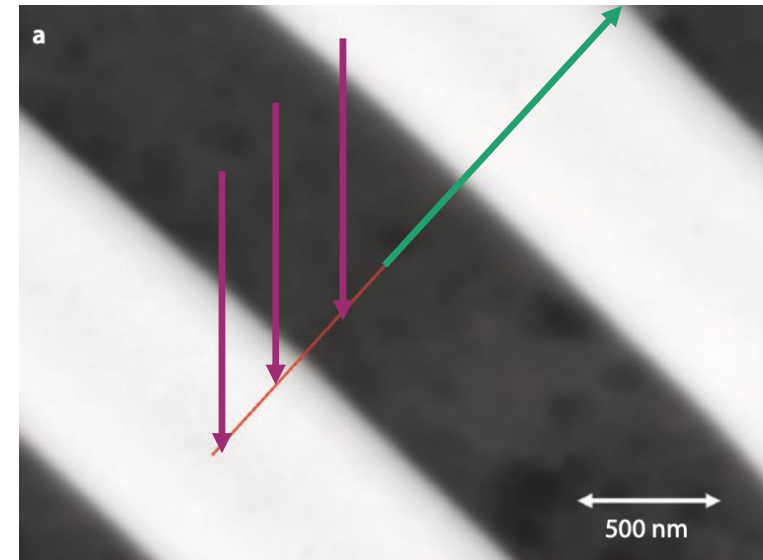
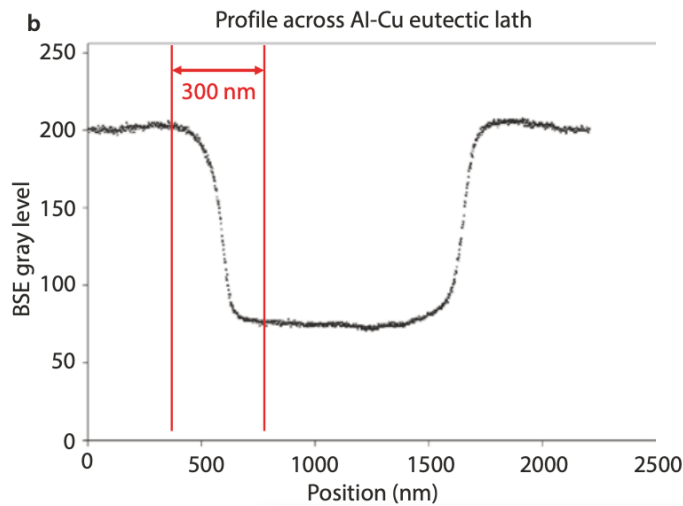
**Table 2.3** Fraction of the BSE radial distribution ( $r/R_{kO}$ ) to capture 90 % of backscattering

C	0.60
Al	0.53
Cu	0.45
Ag	0.40
Au	0.34



En Imagerie

Interface perpendiculaire  
à la surface sonde 10 nm



Élargissement latéral



Mesure  
dimensionnelle





MEB



Contraste topographique

Contraste de Numéro Atomique

Contraste

$$C_{\text{tr}} = (S_{\text{max}} - S_{\text{min}}) / S_{\text{max}}$$

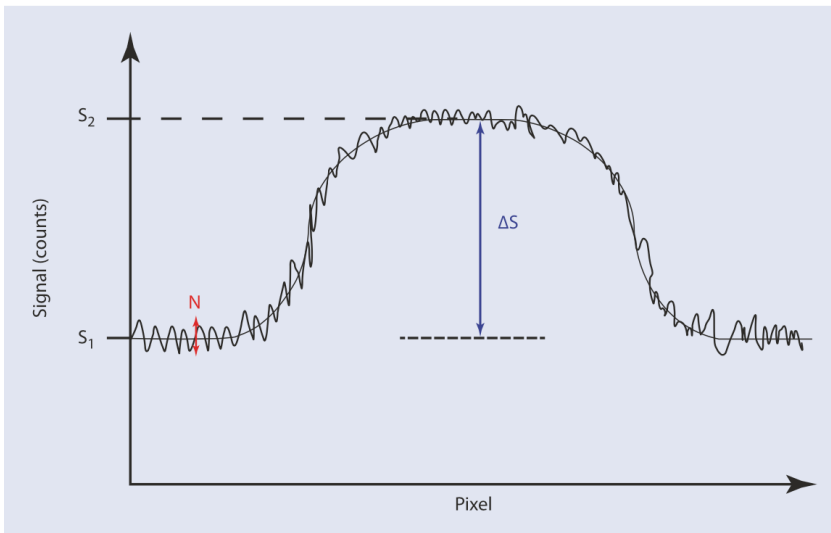
$$0 \leq C_{\text{tr}} \leq 1.$$

En électrons rétrodiffusés

$$C_{\text{tr}} = (S_{\text{max}} - S_{\text{min}}) / S_{\text{max}} = (\eta_{\text{max}} - \eta_{\text{min}}) / \eta_{\text{max}}$$



Visibilité des détails dans une image  
?



Emission, génération des différents signaux

Phénomène stochastique bruit

Rapport signal sur Bruit

$$\frac{S}{N} = \bar{n} / \bar{n}^{1/2} = \bar{n}^{1/2}$$

$$\bar{n} > \left( \frac{5}{C} \right)^2$$

Rose (1948) a introduit un critère de

$$\Delta S > 5 N \quad \frac{\Delta S}{S} = C > \frac{5 \bar{n}^{1/2}}{S} = \frac{5 \bar{n}^{1/2}}{\bar{n}}$$

Le signal électronique collecté par pixel

$$i_s = \frac{\bar{n} e}{\tau} \quad i_s > \frac{25 e}{C^2 \tau}$$



$$i_s = i_B (\eta, \delta) \text{DQE}$$

$i_B$  intensité faisceau primaire

$i_s$  intensité du faisceau collecté

DQE. Performance du détecteur

Rose A (1948) Television pickup tubes and the problem of vision. In: Marton L (ed) Advances in electronics and electron physics, vol 1. Academic Press, New York, p 131

$$i_B > \frac{25(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})}{(\eta, \delta) \text{DQE } C^2 \tau}$$



$$\tau = \frac{t_F}{N_{\text{PE}}}$$

## Paramètres

- NPE nombre de pixel total (image)
- Tf temps de balayage
- $I_B$  intensité faisceau primaire

Pour voir un contraste, le courant minimal de sonde à fournir

$$i_B > \frac{(4 \times 10^{-18}) N_{\text{PE}}}{(\eta, \delta) \text{DQE } C^2 t_F}$$

## Courant seuil

Oatley CW (1972) The scanning electron microscope: Part 1 the instrument. Cambridge University Press, Cambridge  
 Oatley CW, Nixon WC, Pease RFW (1965) Scanning electron microscopy. In: Advances in electronics and electron physics. Academic Press, New York, p 181

## DQE. Performance du détecteur

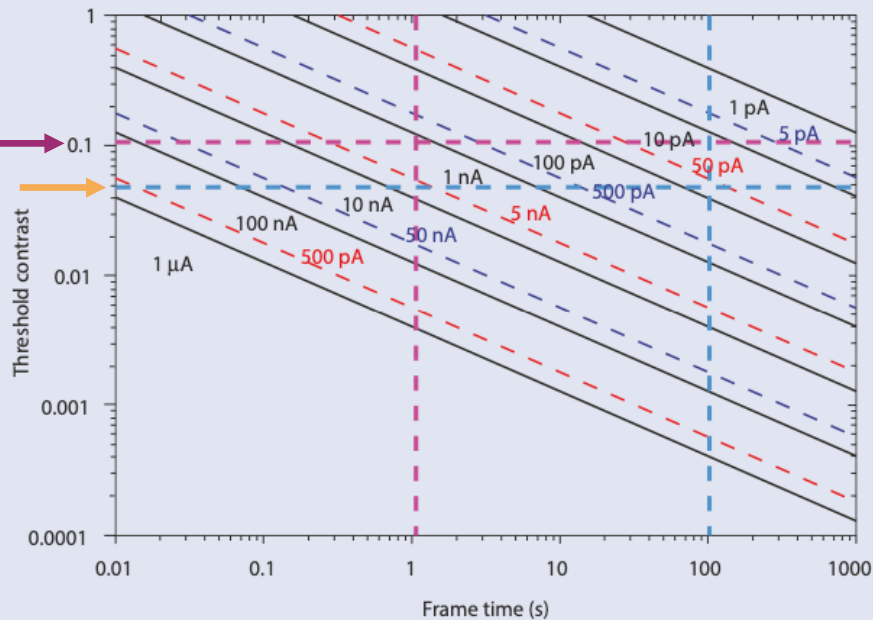
Joy DC, Bunn RD (1996) Measuring the performance of scanning electron microscope detectors. Scanning 18:533

Estimation à partir d'une image numérique

**Table 5.1** DQE of electron detectors from different manufacturers (Joy et al. 1996)

SE detector	DQE
Everhart-Thornley	0.56
Everhart-Thornley	0.17
Everhart-Thornley	0.12
Everhart-Thornley	0.017
Everhart-Thornley	0.0008
High performance SEM:	
Everhart-Thornley (lower)	0.18
Everhart-Thornley (TTL)	0.76
Microchannel plate	0.029
BSE detector	
Scintillator BSE	0.043
Scintillator BSE	0.005
E-T BSE mode (negative bias)	0.001
E-T BSE mode (negative bias)	0.004
Microchannel plate BSE	0.058
Microchannel plate BSE	0.026

Threshold contrast vs. frame time



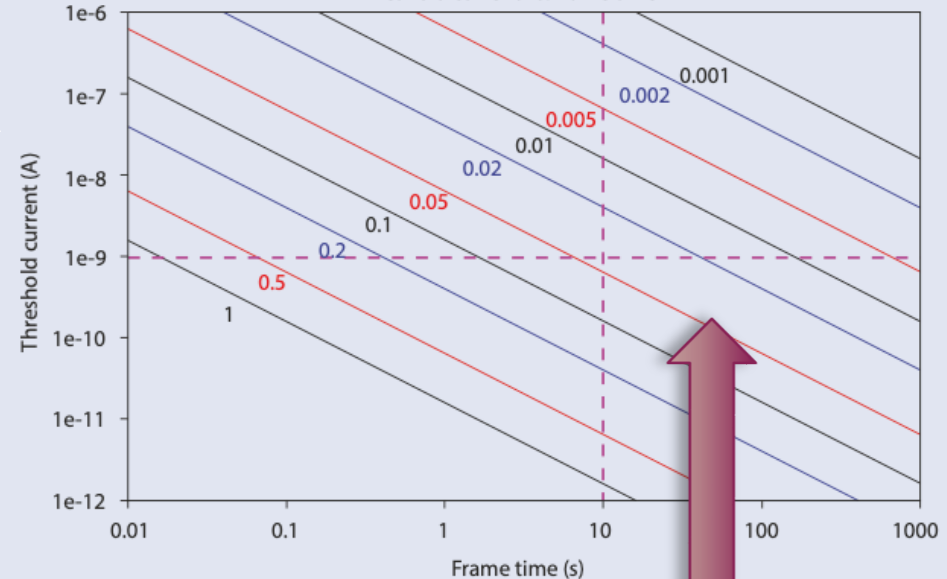
$$i_B > \frac{(4 \times 10^{-18}) N_{PE}}{(\eta, \delta) DQE C^2 t_F}$$

$$(\eta, \delta) DQE = 0,25$$

1024\*1024 pixels

$C = 10\%$      $\tau = 1 \mu s$      $\tau = 100 \mu s$   
                   1 nA                   10 pA  
 $C = 5\%$      5 nA

Threshold current vs. frame time

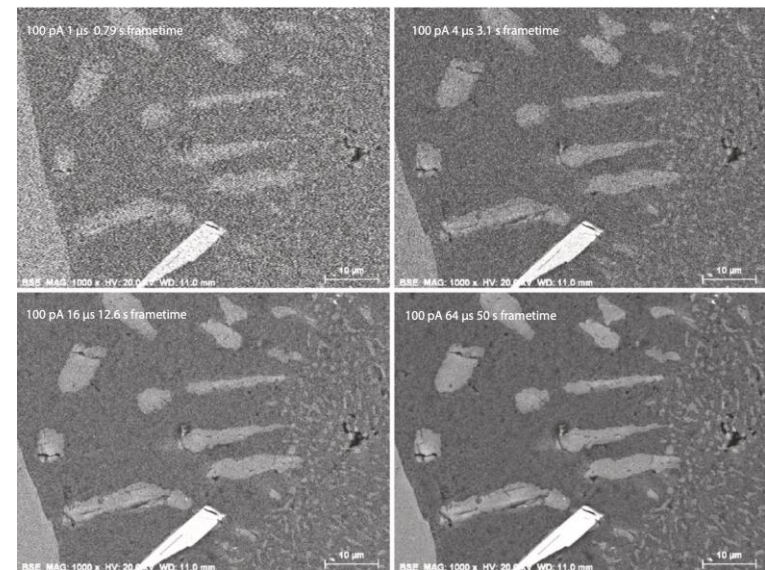
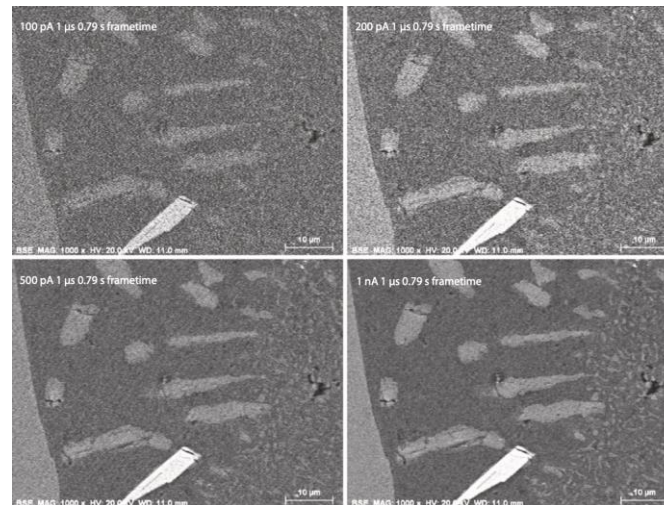
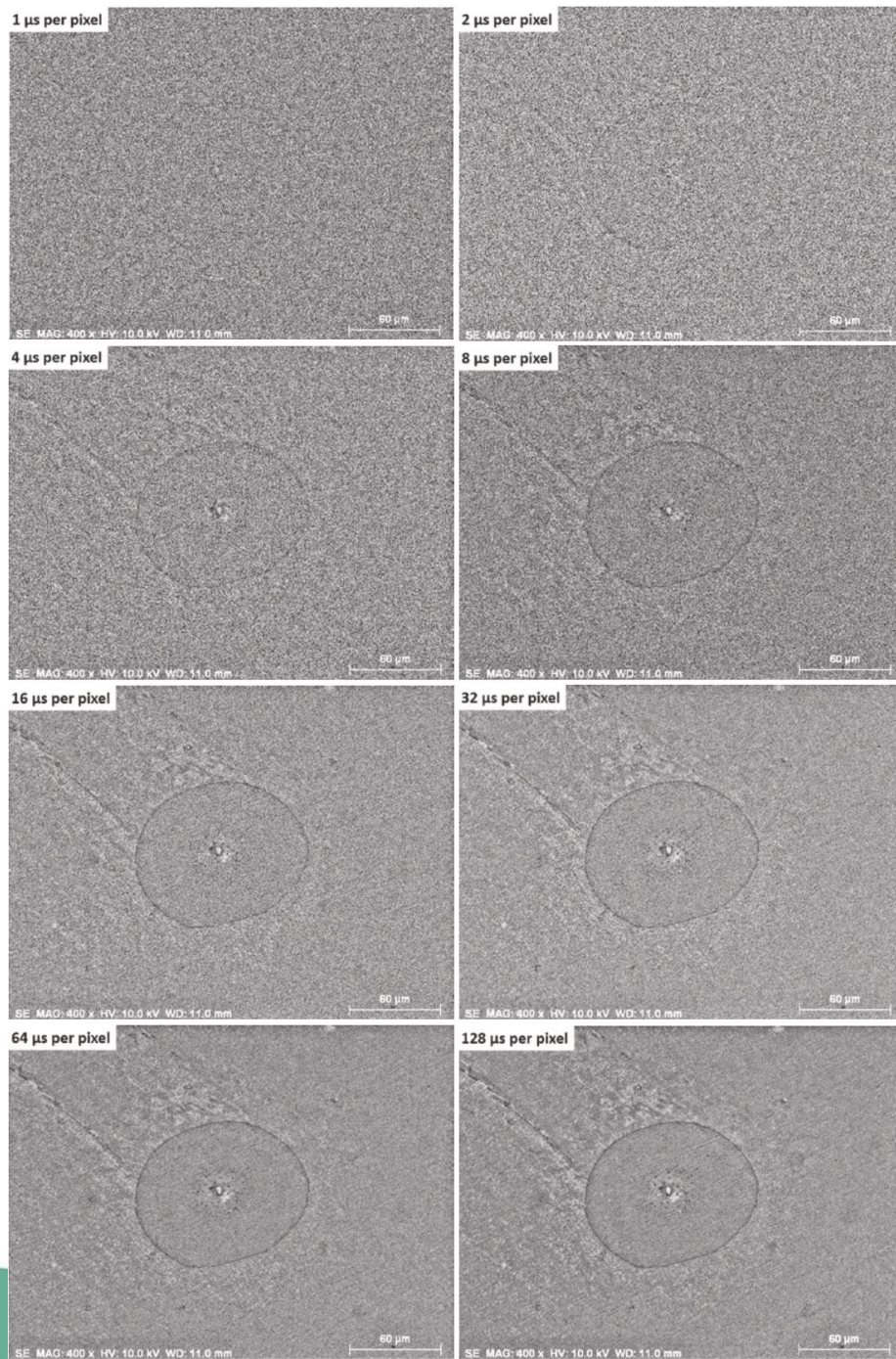


Détails non visibles

• The Visibility of Features in SEM Images p 123-131  
 Goldstein et al  
 Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis 4  
 edition springer 2018

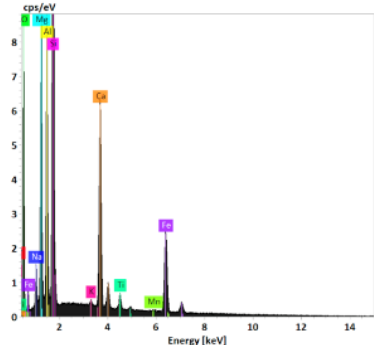


Threshold imaging visibility; image sequence with increasing pixel dwell time at constant beam current. Inkjet deposited droplet on carbon planchet;  $E_0 = 10\text{ keV}$ ; Everhart–Thornley (positive bias) detector.



Quel Signal provient du pixel

?



Provenance du signal

$$R_{K-O}(\text{nm}) = 27.6 \left( A / Z^{0.89} \rho \right) \left[ E_0^{1.67} - E_c^{1.67} \right]$$

Origine du signal

Excitation sous bombardement électronique

Transition radiative

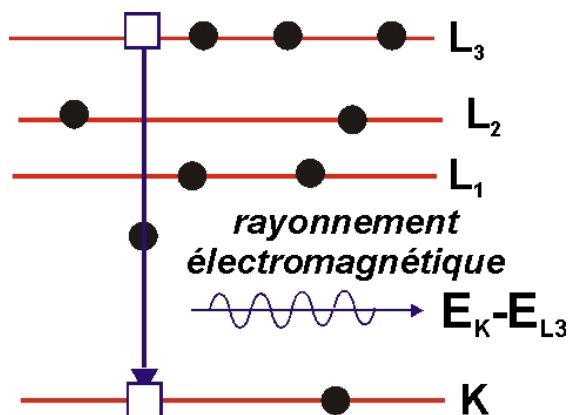
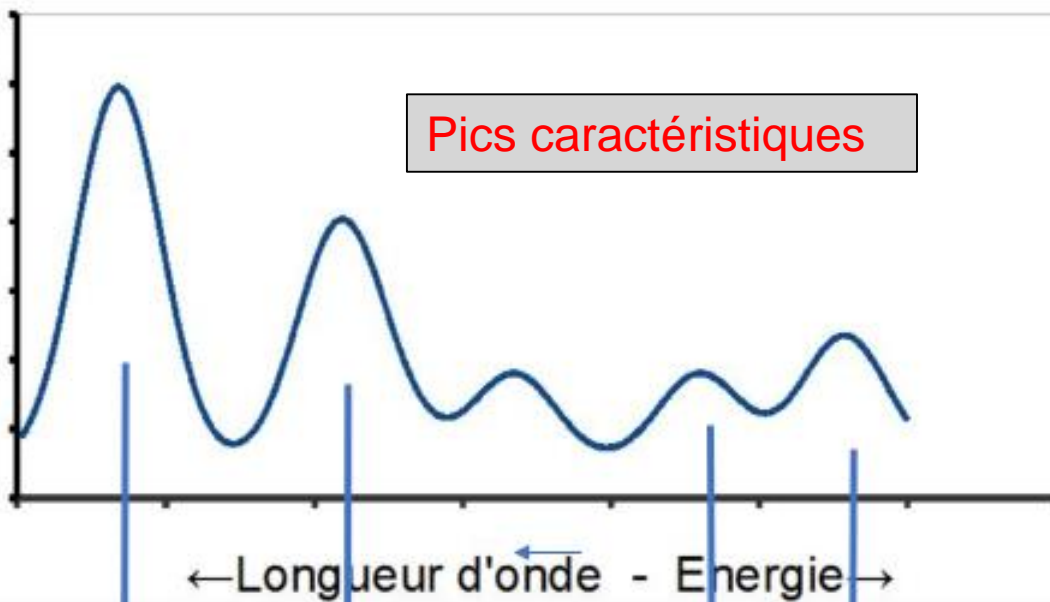


Table 4.2 Range of Cu K-shell ( $E_c = 8.98$  keV) X-ray generation in various matrices

Matrix	25 keV	20 keV	15 keV	10 keV
C	6.3 $\mu\text{m}$	3.9 $\mu\text{m}$	1.9 $\mu\text{m}$	270 nm
Si	5.7 $\mu\text{m}$	3.5 $\mu\text{m}$	1.7 $\mu\text{m}$	250 nm
Fe	1.9 $\mu\text{m}$	1.2 $\mu\text{m}$	570 nm	83 nm
Au	1.0 $\mu\text{m}$	630 nm	310 nm	44 nm

Analyse qualitative  
Analyse quantitative





E1

E2

E3

E4

$$E = h \nu$$

Z1

Z2

Z3

Z4

$$\sqrt{E/h} = A Z + B$$

Position des raies

Analyse qualitative

Nature des atomes



(1887-1915)

Loi de Moseley

$$\sqrt{\nu} = A Z + B$$

# Intensité de la raie caractéristique détectée :

$$I_{\theta} = n_e \frac{N}{A} Q_j^A(E_0) \omega_j a^A \frac{d\Omega}{4\pi} D C_A \left( 1 + f \right) \int_0^{\infty} \varphi(\rho z) \exp(-\chi \rho z) d\rho z$$

Section efficace d'ionisation du niveau j de l'élément A  
 Rendement de fluorescence  
 Poids de la raie  
 Conc. élément A  
 Renforcement de l'émission X par fluorescence  
 Nbre.d'électrons incidents  
 Masse atomique  
 Opérateur  
 Paramètres du faisceau incident

grandeurs physiques liées à l'élément A et indépendantes de la composition  
 facteurs instrumentaux  
 grandeurs physiques liées à l'élément A et dépendant de la composition

Source F Robaut – D Boivin Nancy 2024

L'intensité de la raie dépend directement du nombre d'électrons incidents.

Opérateur



Paramètres du faisceau incident

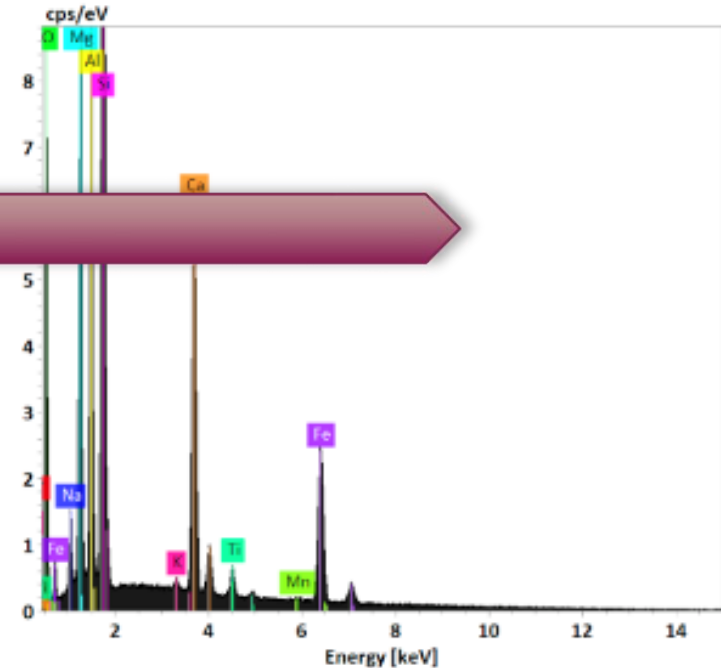
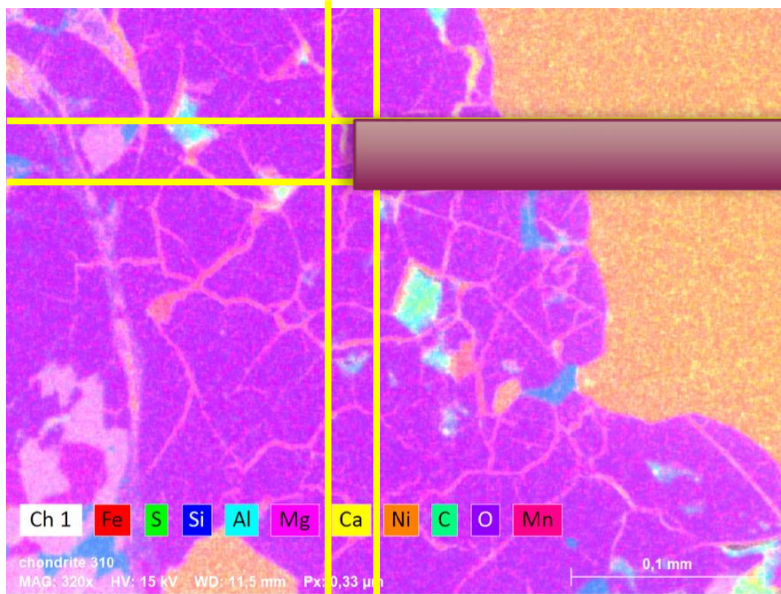


Cartographie



Imagerie Spectrale

EDS



1 pixel



1 spectre

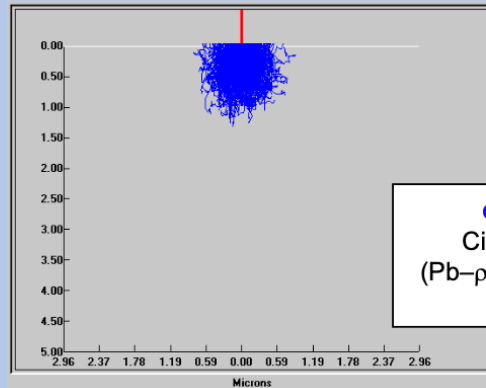
Combien de coups par pixel ?

Analyse qualitative

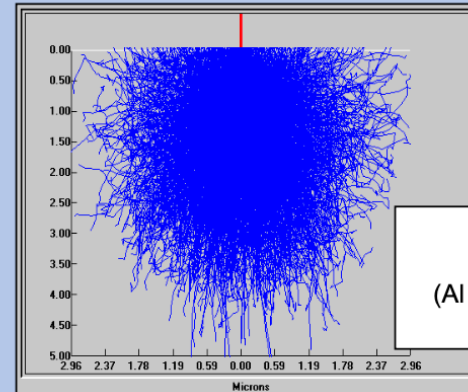
Analyse  
quantitative

**En cartographie X, il faut aussi tenir compte de la dimension de la zone d'où provient l'information qui est de l'ordre du  $\mu\text{m}$  dans des conditions standard et qui dépend :**

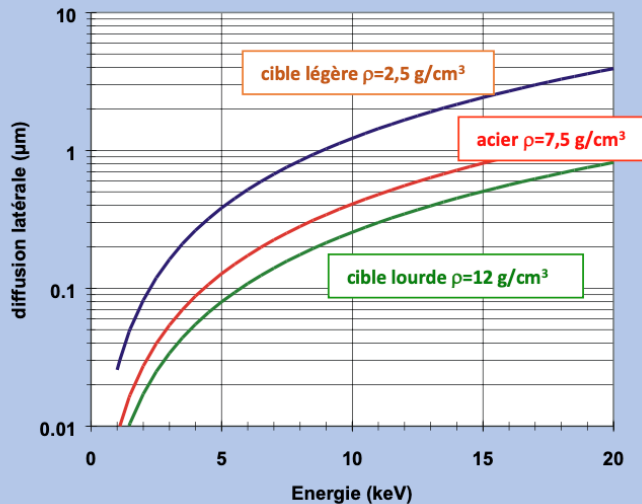
- 1 – du diamètre  $d$  de la « poire » d'interactions (résolution latérale liée à la diffusion électronique,)
- 2 – du diamètre  $\phi$  de la sonde électronique



$d \approx 1\mu\text{m}$   
Cible lourde  
(Pb- $\rho=11.4 \text{ g/cm}^3$ )  
20 kV



$d \approx 4\mu\text{m}$   
Cible légère  
(Al -  $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$ )  
20 kV



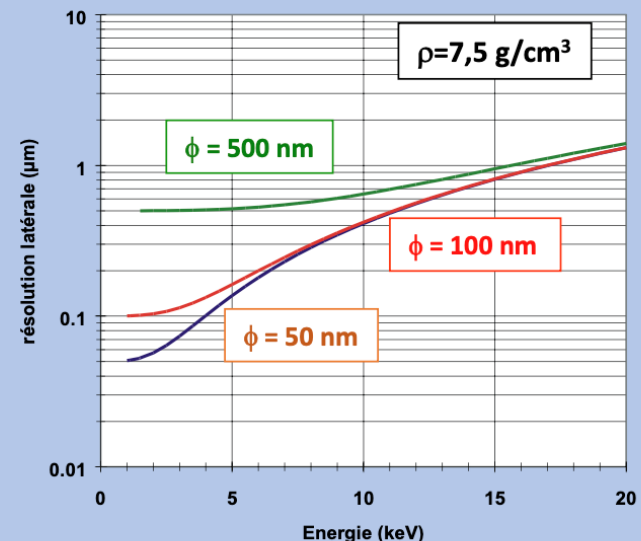
variation de la diffusion électronique  
en fonction de l'énergie, pour  
différentes cibles

**résolution latérale**

$$R = \sqrt{d^2 + \phi^2}$$

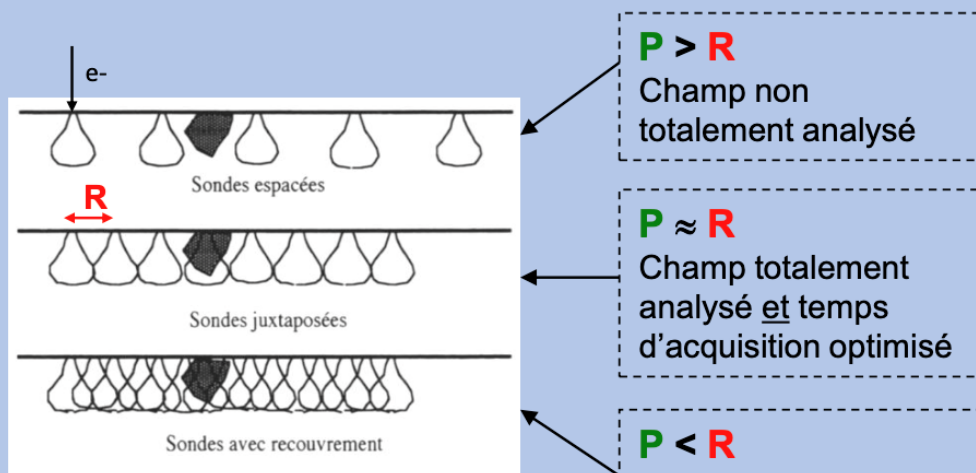
diffusion  
électronique

diamètre  
sonde



variation de la résolution latérale  
pour une cible d'acier et pour  
différents diamètres de sonde

**Taille du pixel ( P ) dans la cartographie X  $\approx$  Largeur du volume source de RX ( R ) dans l'échantillon**



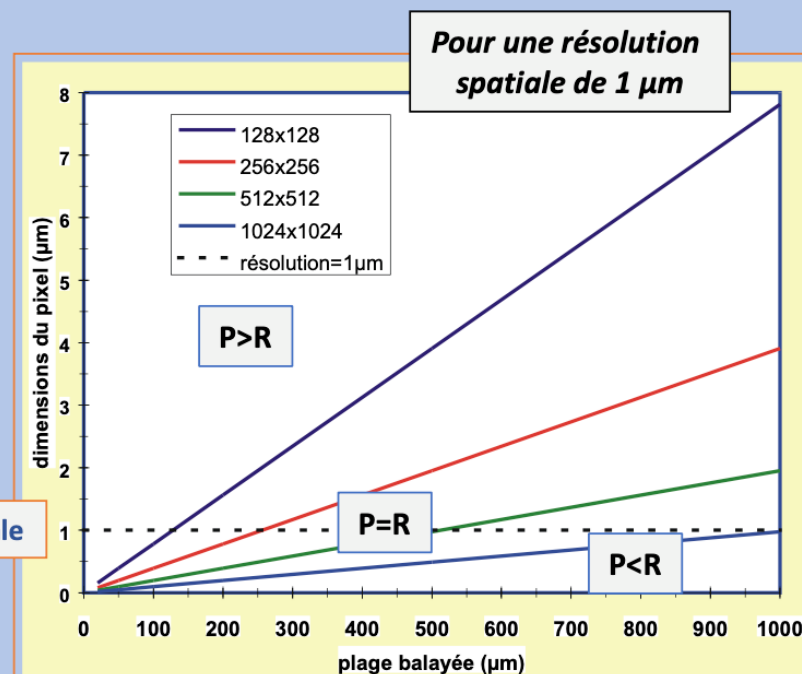
résolution (N)	nb de pixels	taille du fichier*	temps (10ms/pixel)
128x128	16 384	32Ko	160 sec
256x256	65 536	128Ko	11 mn
512x512	262 144	512Ko	45 mn
1024x1024	1 048 576	2Mo	3h
2048x2048	4 194 304	8Mo	12h

\* format non compressé

**En théorie on choisira  $P=R/2$   
(théorème de Shannon)  
et en pratique entre  $2R$  et  $R/2$**

Largeur du champ sur l'échantillon ( $\mu\text{m}$ )	Grandissement (format polaroid)	Nombre de pixels à choisir, pour $R \approx 1\mu\text{m}$	Nombre de pixels à choisir, pour $R \approx 4\mu\text{m}$
1000	120	1024 x 800	256 x 200
500	240	512 x 400	128 x 100
200	600	256 x 200	64 x 50
100	1200	128 x 100	64 x 50
60	2000	64 x 50	64 x 50

résolution optimale





Mode  
ponctuel

EDS

## Sur échantillon plan épais

- Energie du faisceau incident  $E_0$ . (en pratique 15-20 keV)
- Paramètres du faisceau incident bien focalisé à la distance analytique
  - intensité
  - taille du diaphragme
  - taille de spot

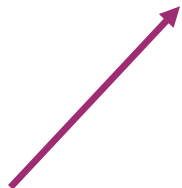
En Cartographie

La dose d'électron par pixel

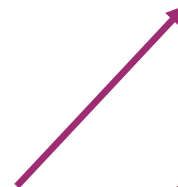
En un Pixel

$$D = I_{\text{incident}} * \tau / A_{\text{pixel}} * e$$

D



Si l'incident



$\tau$

A pixel

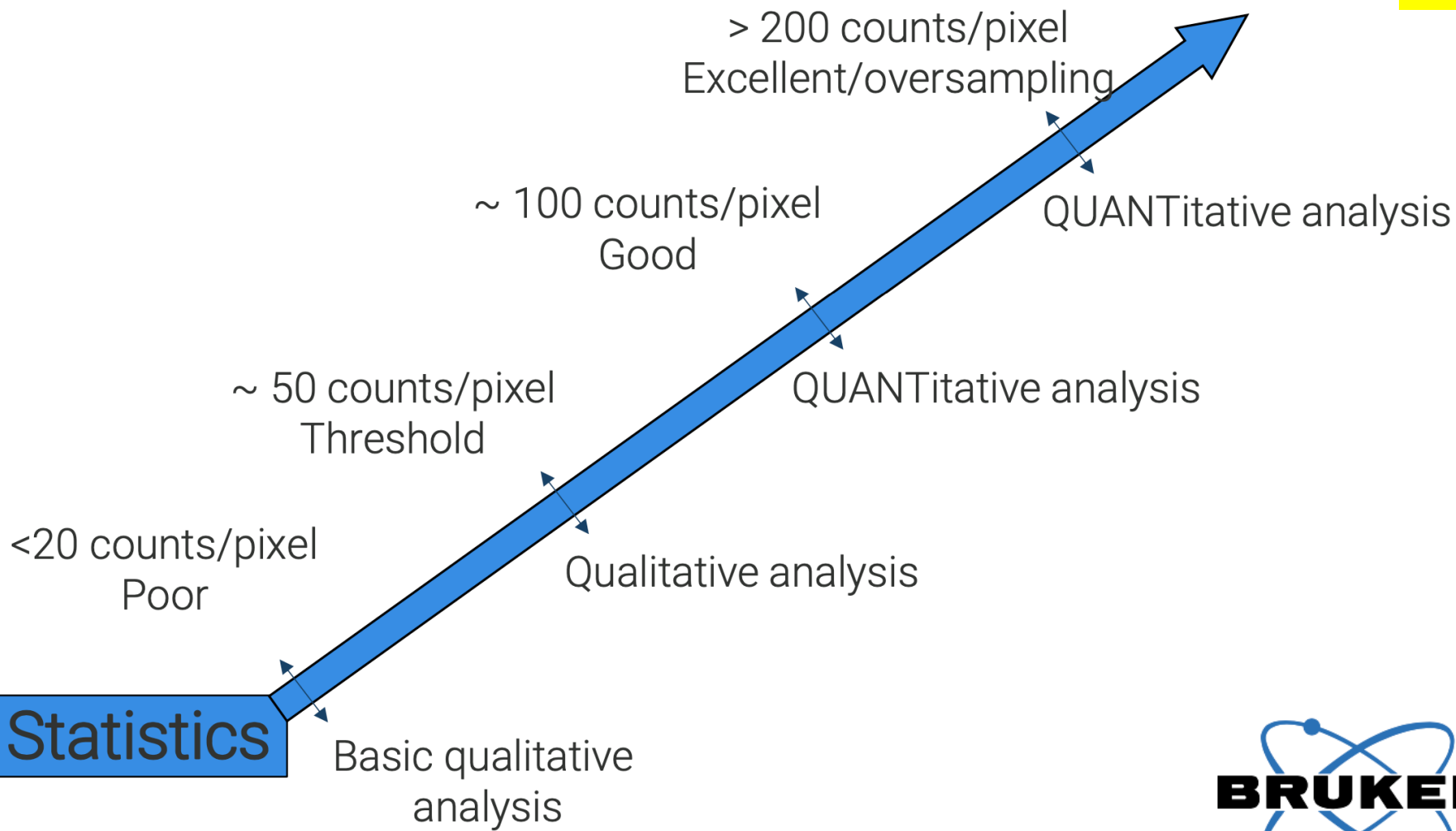


G





Statistics





## Cartographie

G = 1000 - 20 keV

Mode spectre

Taille R =  $2.7 \mu m$

Taille de pixel P =  $0,41 \mu m$

Cartographie à  $312 \times 234 = 73008$  pixels

$\tau$  variable

100 balayages

Échantillon comptage 30000  
cps/seconde

Cartographie

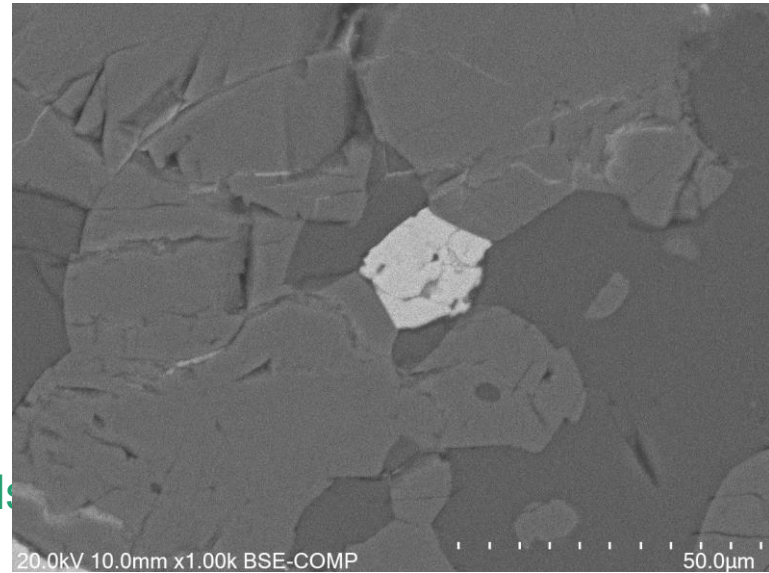
$\tau = 8 \mu s$

T = 58 s



$\tau = 256 \mu s$

T = 31 minutes



EDS

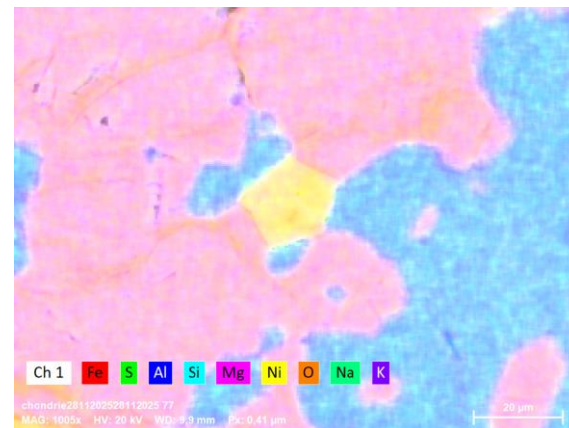
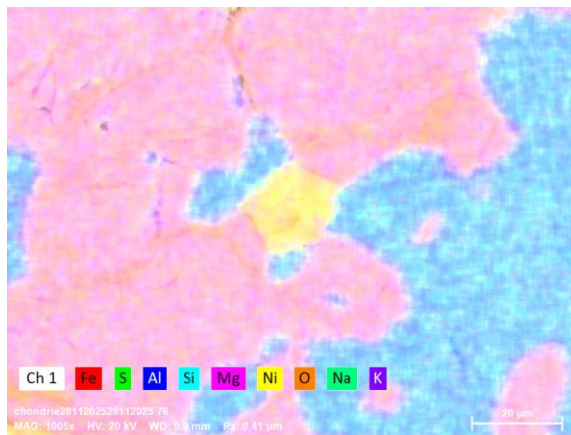
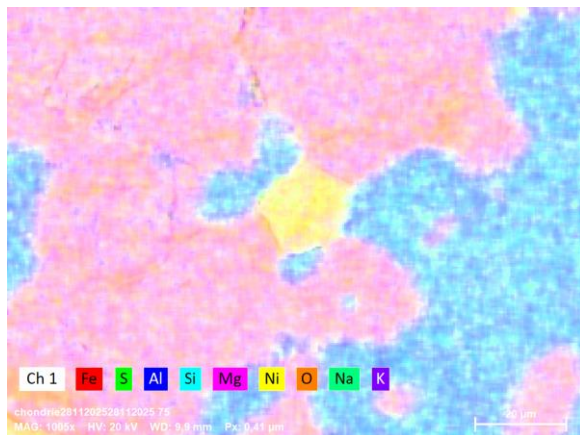


20  $\xrightarrow{\hspace{1.5cm}}$  100  $\xrightarrow{\hspace{1.5cm}}$  200  
faible bon. excellent

$\tau = 8 \mu s$  21

$\tau = 16 \mu s$  42

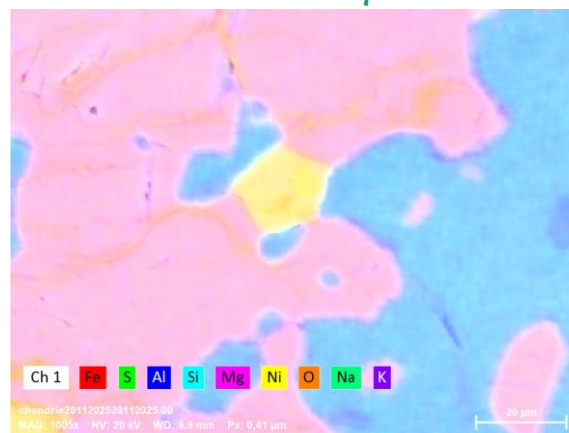
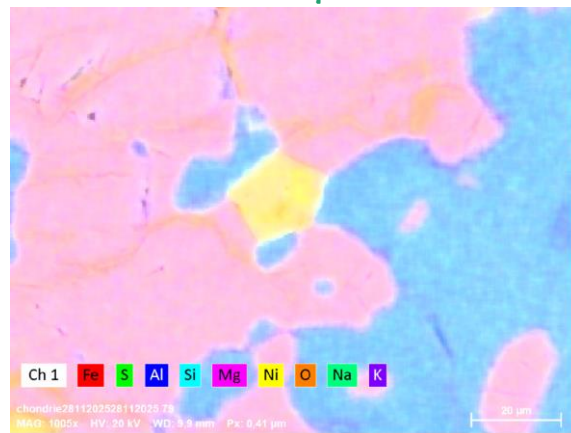
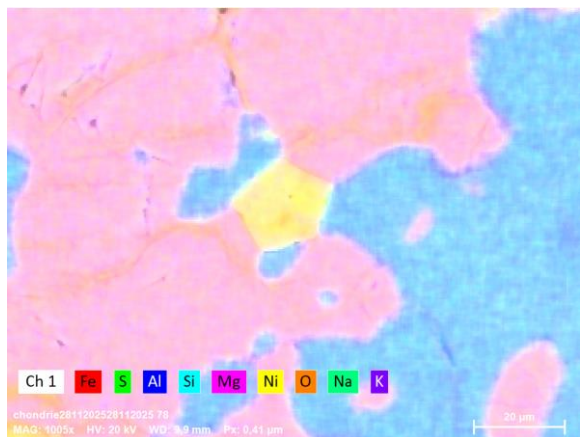
$\tau = 32 \mu s$  84



$\tau = 64 \mu s$  169

$\tau = 128 \mu s$  338

$\tau = 256 \mu s$  680





$\tau = 8 \mu s$  21

20 faible  $\xrightarrow{100 \text{ bon.}}$  200 excellent

EDS

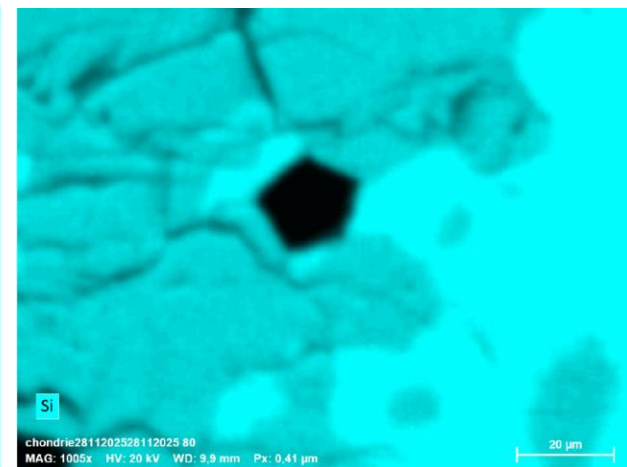
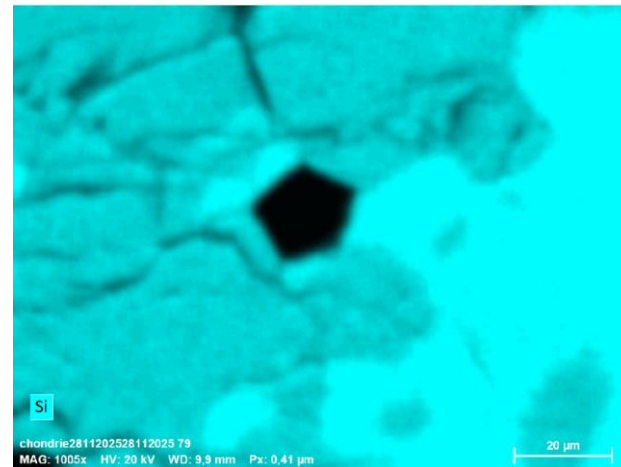
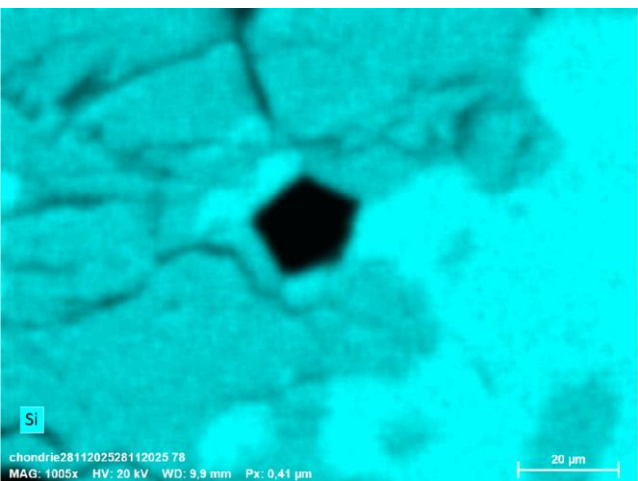
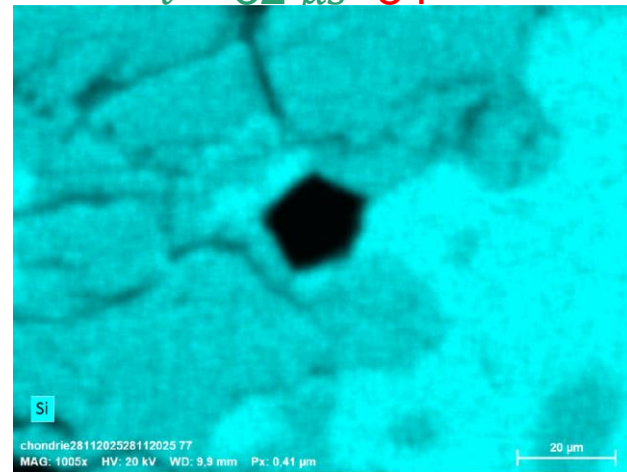
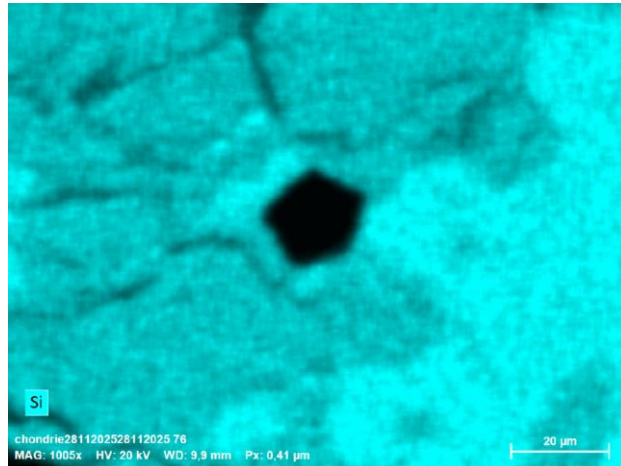
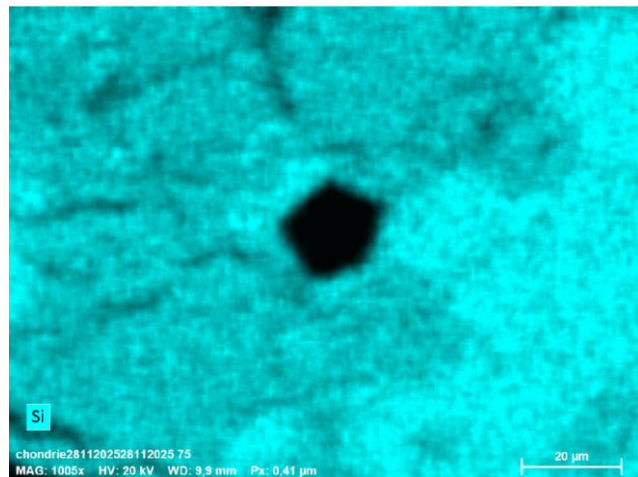
$\tau = 16 \mu s$  42

$\tau = 32 \mu s$  84

$\tau = 64 \mu s$  169

$\tau = 128 \mu s$  338

$\tau = 256 \mu s$  680



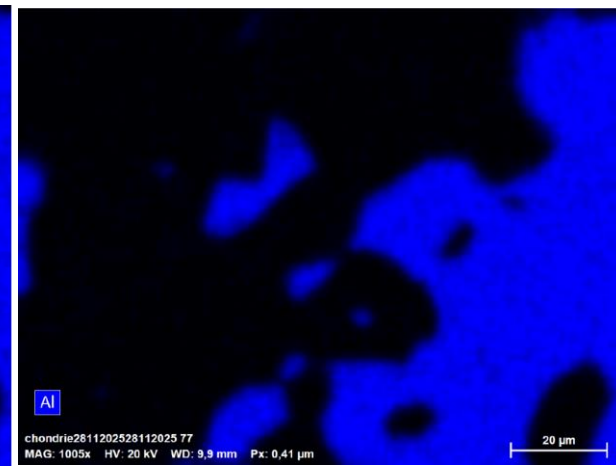
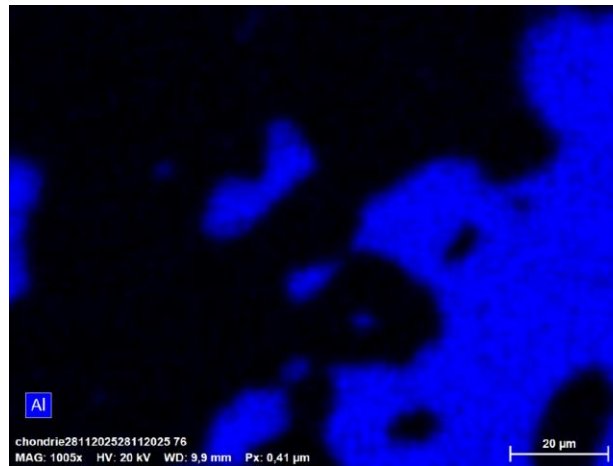
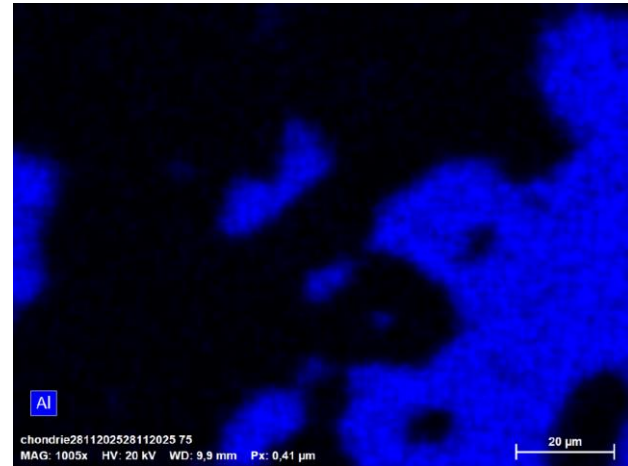
$\tau = 8 \mu s$  21

20 faible 100 bon. 200 excellent

EDS

$\tau = 16 \mu s$  42

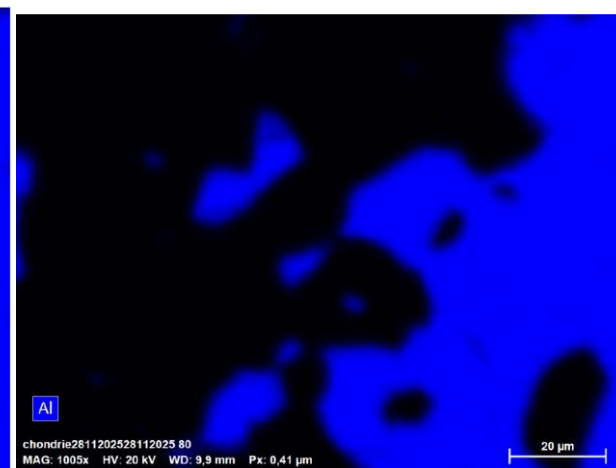
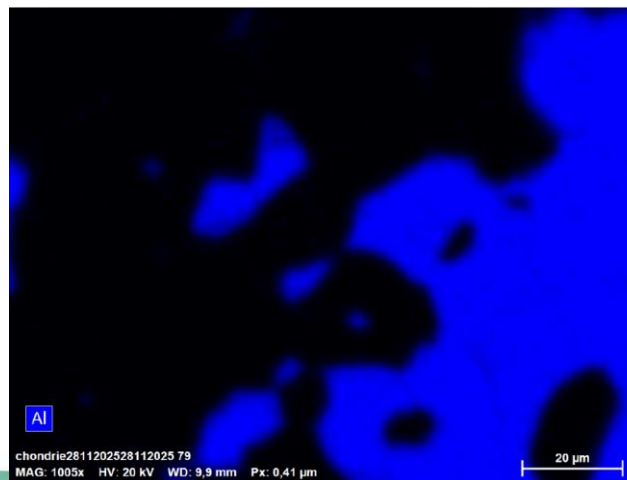
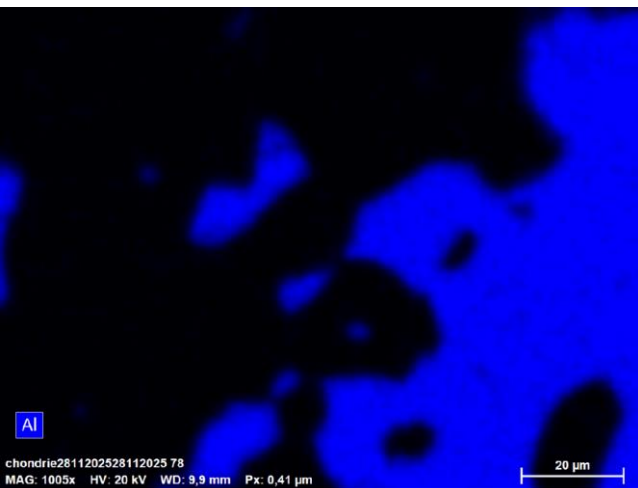
$\tau = 32 \mu s$  84



$\tau = 64 \mu s$  169

$\tau = 128 \mu s$  338

$\tau = 256 \mu s$  680





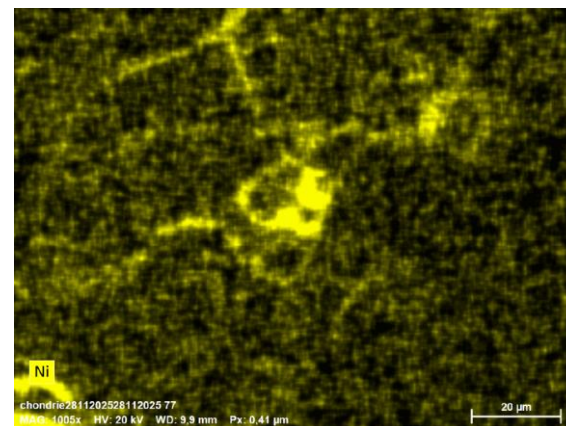
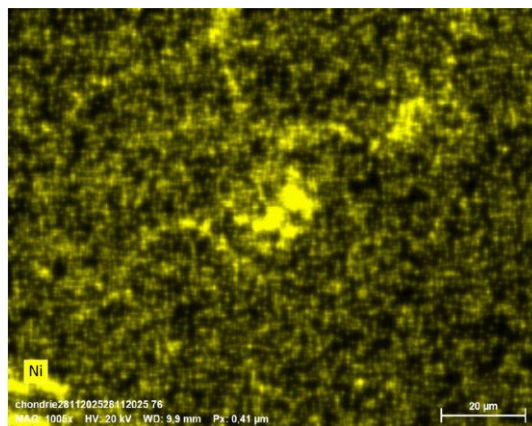
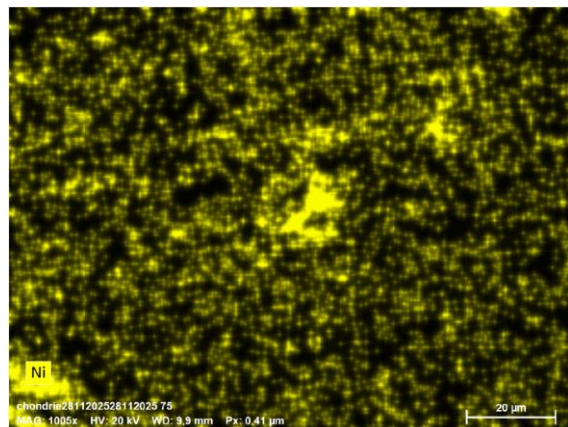
$\tau = 8 \mu s$  21

20 faible 100 bon. 200 excellent

EDS

$\tau = 16 \mu s$  42

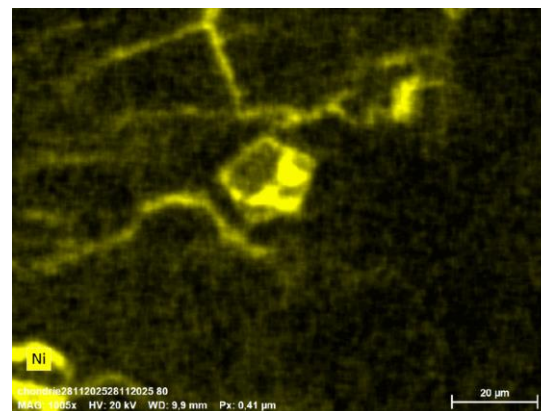
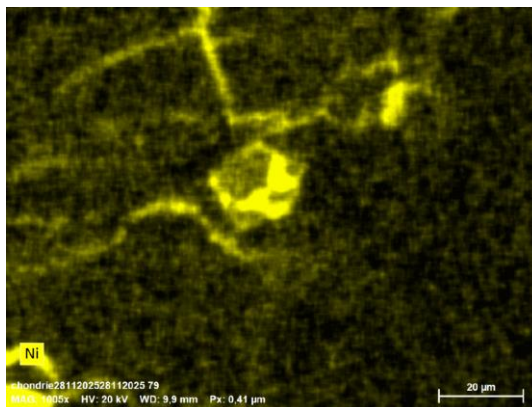
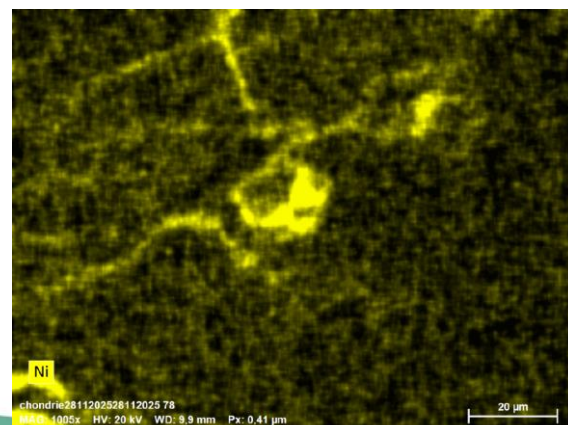
$\tau = 32 \mu s$  84



$\tau = 64 \mu s$  169

$\tau = 128 \mu s$  338

$\tau = 256 \mu s$  680





Imagerie  
électronique

Cartographie X  
Le pixel



Image  
numérique

Aire du pixel



Dimension du  
pixel



Nombre de pixel

Dwell time



Qualité du signal  
(RSB, taux de comptage)

L'instrument

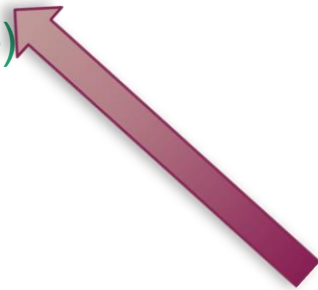
Faisceau  
électronique



- Energie
- Intensité
- Diamètre
- Grandissement



Origine du signal  
Nature du Signal  
Volume d'interaction



Un grand absent

l'échantillon

Conclusion

L'échantillon



Conducteur  
Insensible au  
dégazage

Cartographie analytique



Echantillon plan

Préparation d'échantillon

Comportement sous le faisceau  
d'électron

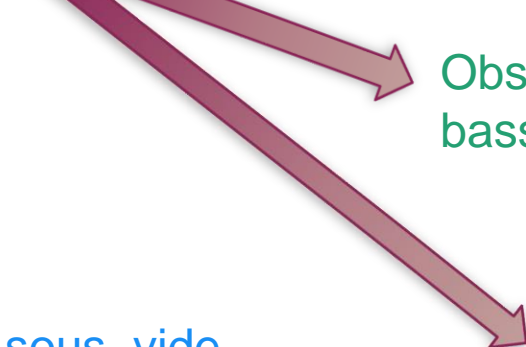
Si non conducteur



Rendre  
conducteur



Observation à  
basse tension

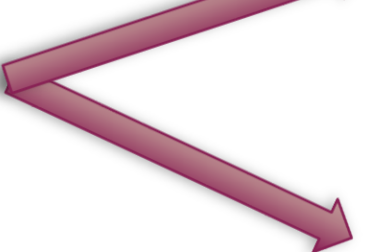


Observation  
condition de  
haute pression

Comportement sous vide



Sensible au  
dégazage

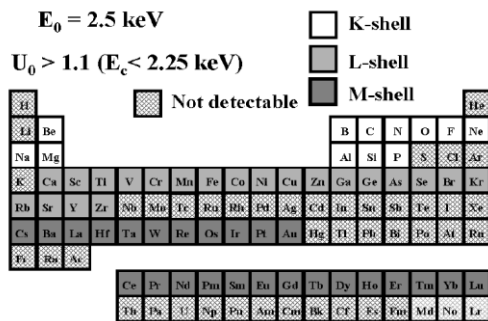


cryomicroscopie

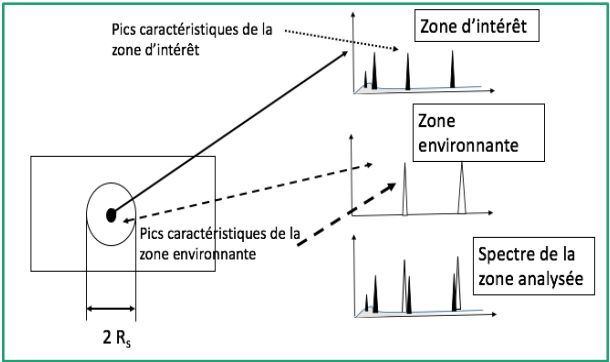
skirting

métallisation

Semiconductor EDS (129 eV resolution at MnK $\alpha$ )



Periodic Table showing choice of atomic shells available for operation in the low beam energy range,  $E_0 = 2.5 \text{ keV}$  and  $U = 1.1$ . Note significant loss of elements that can be effectively measured.





Réunion pédagogique du GNMEBA – 4 et 5 décembre 2025- Paris



*Merci de votre  
attention*

UNITÉ DE CATALYSE ET  
CHIMIE DU SOLIDE

