



Débruitage d'images en microscopie électronique à balayage sous environnement gazeux par Deep Learning

Mohammed Belbekri, Rachid Laref, Christian Mathieu

christian.mathieu@univ-artois.fr



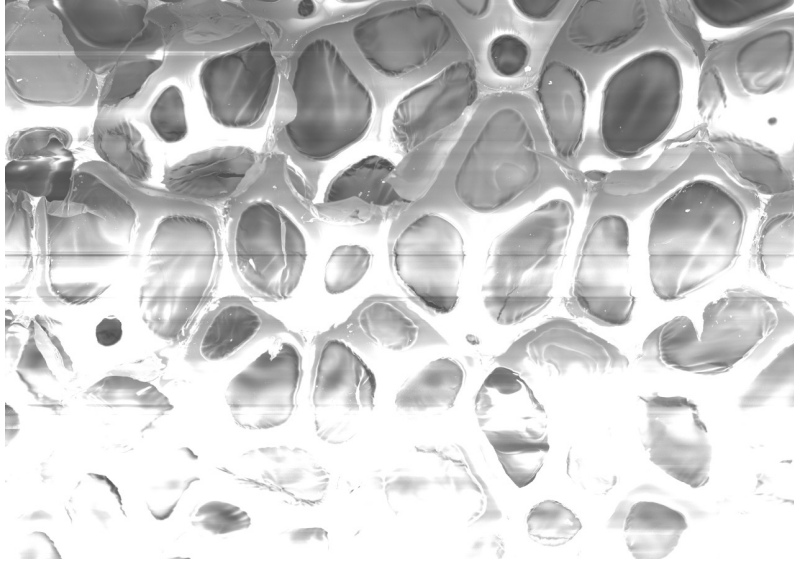
Plan

- Introduction
- l'Imagerie en utilisant les électrons rétrodiffusés
- L'origine du bruit dans l'image
- Les techniques de débruitage des images
- Applications aux échantillons biologiques



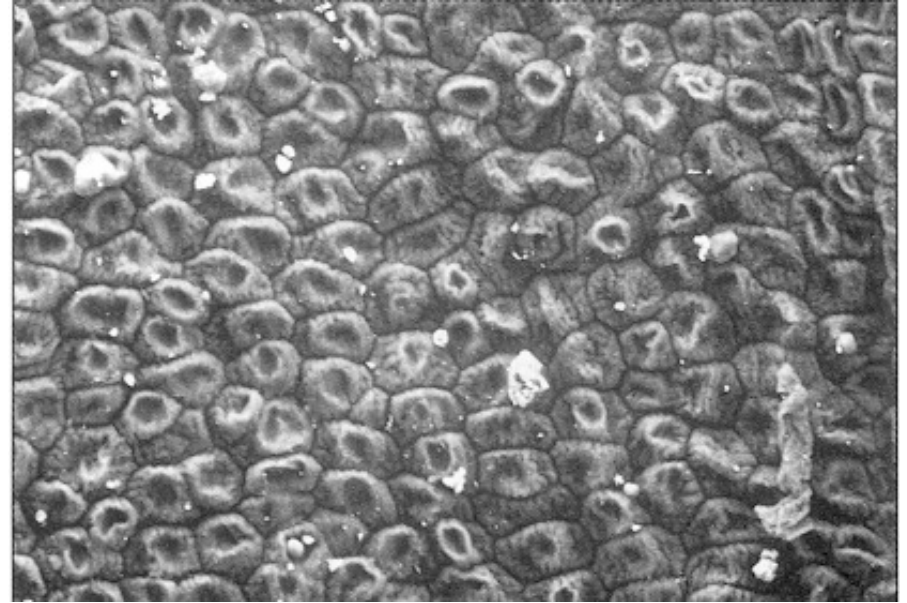
Introduction

ISOLANT



Le phénomène de charge
(mousse de polymère isolante)

SENSIBLE AU DÉGAZAGE



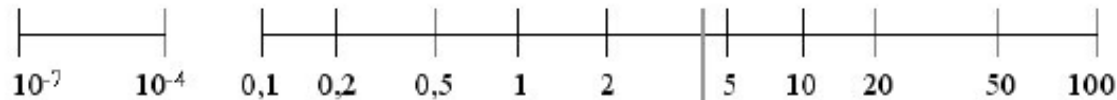
L'altération de l'échantillon
(peau de banane)



Idée : Introduction d'une pression plus importante dans la chambre de l'échantillon

Vide en Torr

(1 Torr = 133 Pascal = 1,33mBar)



MEB

MEB
« low
vacuum »

MEBE



4,6 Torr
(minimum pour H₂O liquide)

VPSEM, Low vacuum

Air, N₂, Hélium

ESEM

Vapeur d'eau

Technologie de la colonne

Détection des électrons

Operateur

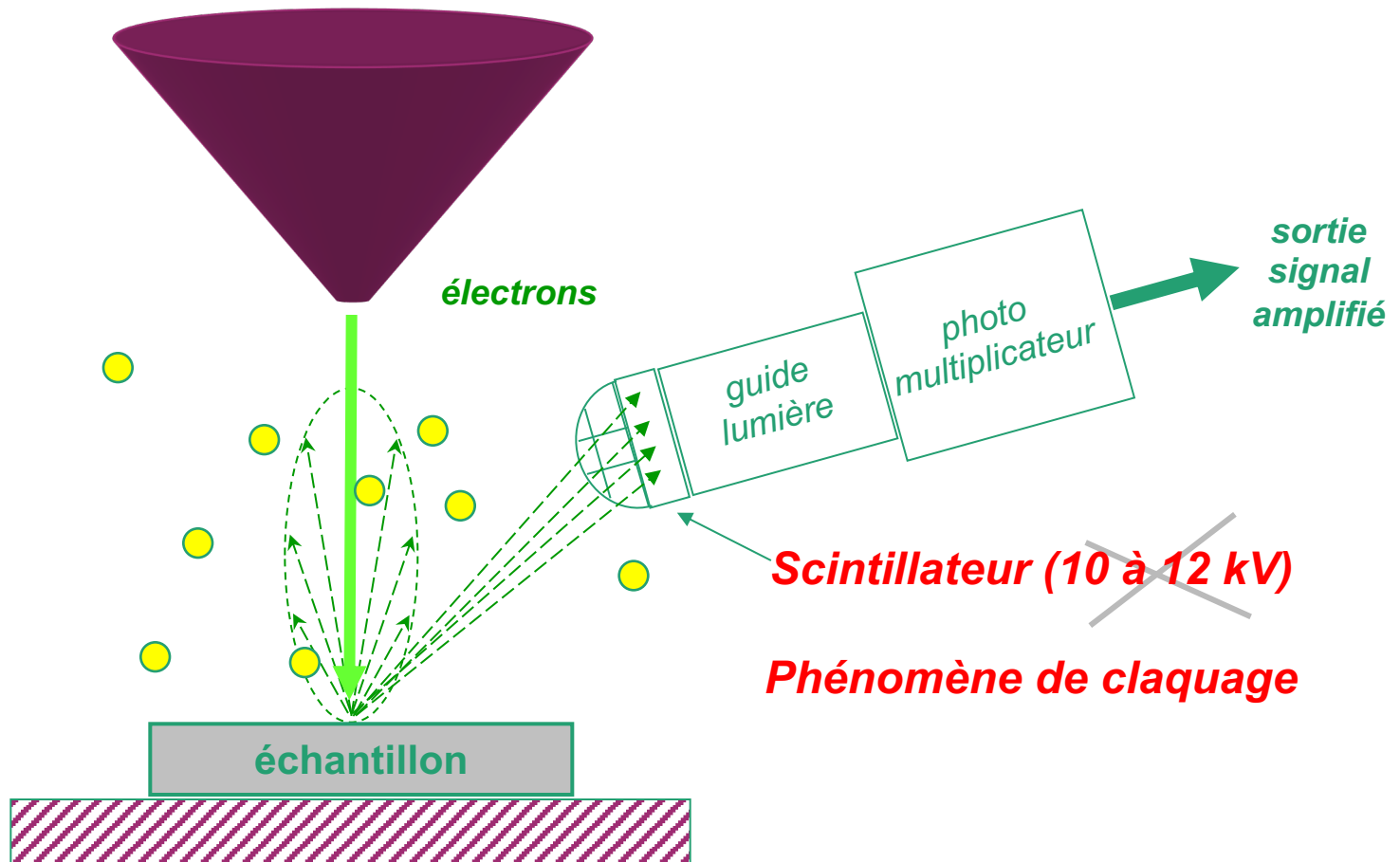


choix de la pression



Pourquoi une nouvelle stratégie de détection des électrons

Si $P \gg 10^{-3} \text{ Pa}$

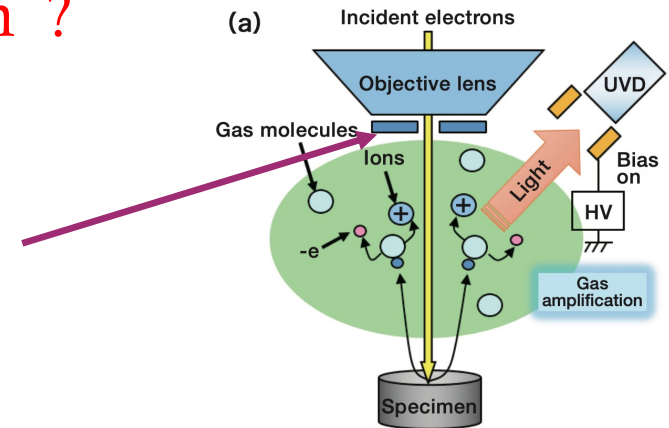




Quelles stratégies de détection ?

Détecteur d'électrons rétrodiffusés (4 secteurs)

Hitachi S3800



Utiliser les électrons rétrodiffusés
(détection présente sur tous les MEB)

Stratégie n°1 ne pas tenir compte des interactions électrons/gaz

Utiliser les électrons secondaires

Stratégie n°2 modifier la conception du détecteur ET

Utiliser les pseudo secondaires

Stratégie n°3 En mettant à profit les interactions électrons/gaz



Détection des électrons rétrodiffusés

- diode semi-conductrice
- scintillateur (Robinson, ...)

Choix de l'opérateur :

- Pour un échantillon isolant,

augmentation de la pression pour éliminer le phénomène de charge

- Pour un échantillon biologique

augmentation de la pression pour limiter le phénomène de déshydratation de l'échantillon

Quelle conséquence sur la qualité de l'image quand la pression varie ?

l'Imagerie en utilisant les électrons rétrodiffusés

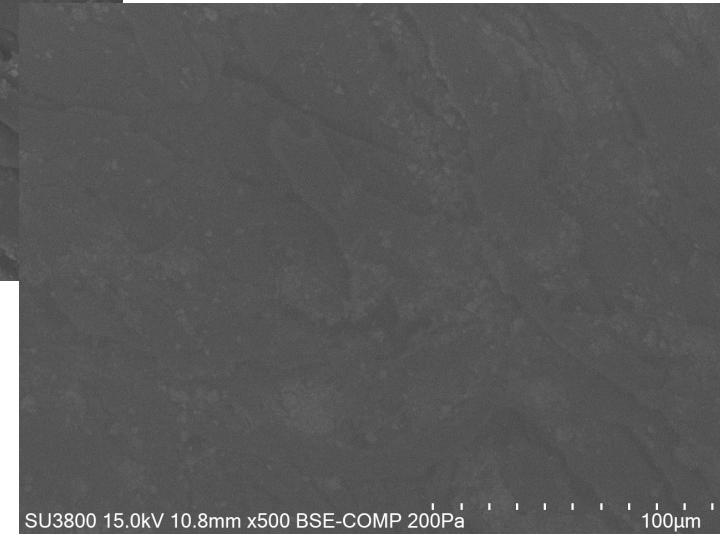
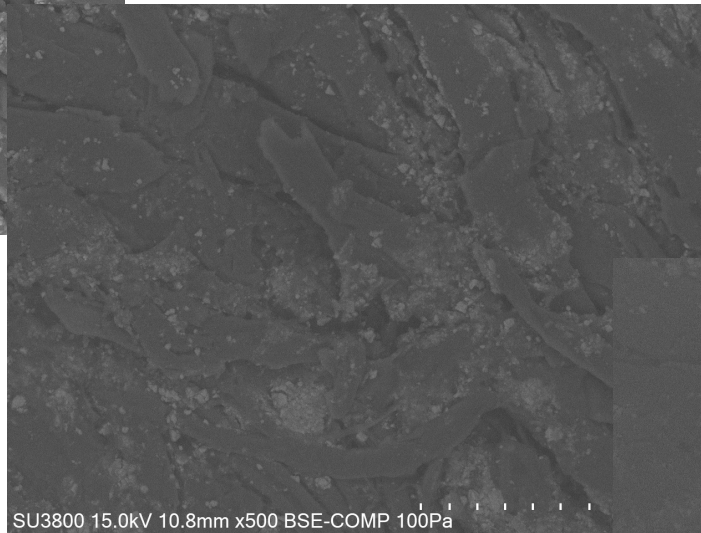
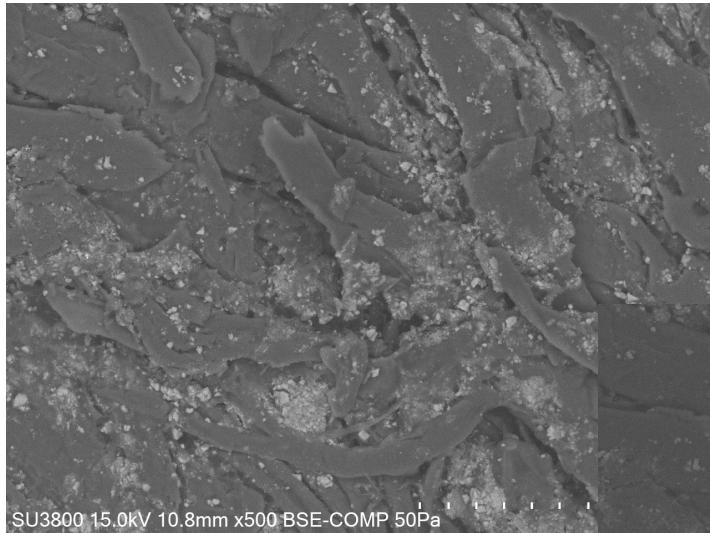
50 Pa

Influence de la pression d'Air

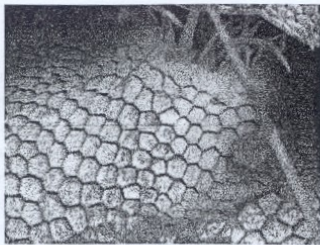
15 kV

100 Pa

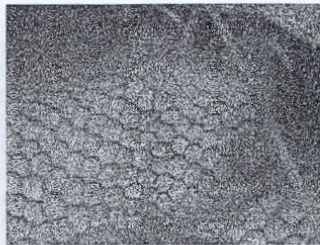
200 Pa



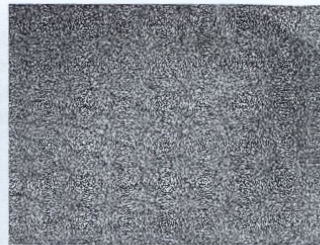
Échantillon isolant.
Papier



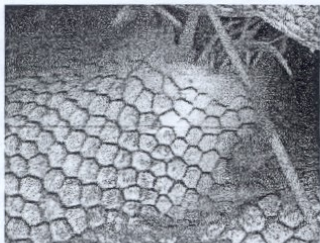
Air 20 Pa



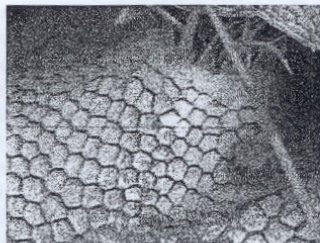
Air 40 Pa



Air 50 Pa



He 20 Pa



He 40 Pa



He 50 Pa

E Oho, et al, Image quality improvement using helium gas in low voltage VPSEM, J electron Microscopy 49(6) 761-763 (2000)

L'interaction gaz-électrons

UCCS

Faisceau primaire

Origine des d'électrons rétrodiffusés

Gaz

BSE liés au gaz

Origine du bruit

Interactions élastiques

Faisceau primaire diffusé

Faisceau primaire transmis

BSE zone d'intérêt

BSE zone environnante

Origine du bruit

Rskirt



Elargissement du faisceau Skirt

Une relation utile à connaître

$$m = \sigma_t P D_{\text{gaz}} / k T$$

m le nombre moyen de collision

σ_t section efficace totale d'interaction

P pression du gaz

D_{gaz} distance parcourue
par les électrons dans le gaz

Faisceau électronique

Fraction non
diffusée

Gaz

Fraction diffusée

Echantillon

Choix de l'opérateur

Tension accélération σ_t

Nature du gaz

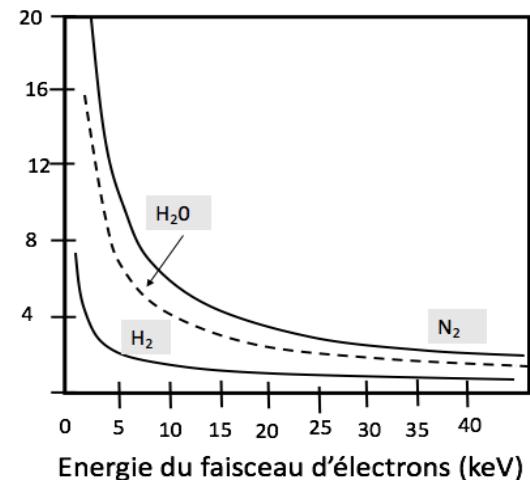
Pression du gaz P

D_{gaz} (distance de travail)

Pour augmenter le Rapport Signal sur Bruit

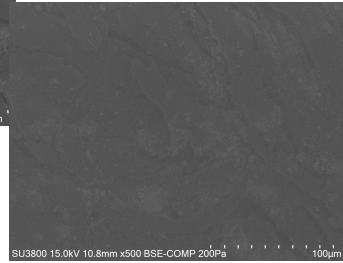
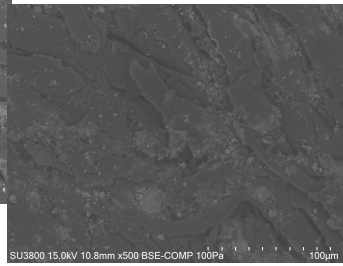
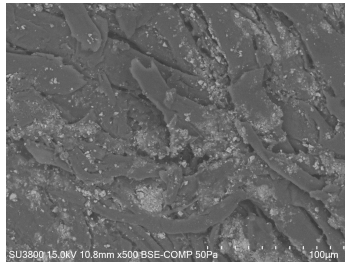
L'opérateur doit diminuer m
pour réduire l'élargissement du faisceau

Section efficace
totale (10^{21} m^2)



L'origine du bruit dans l'image Échantillon isolant. Papier

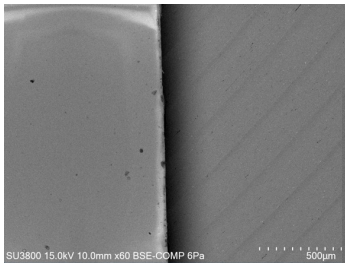
15 kV



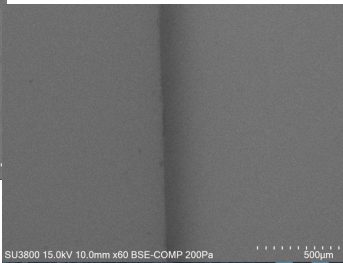
50 Pa

100 Pa

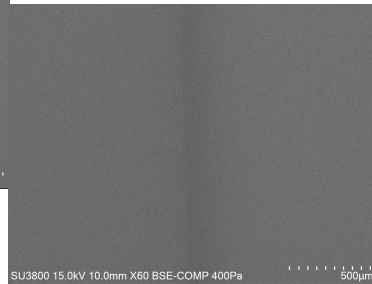
200 Pa



6 Pa

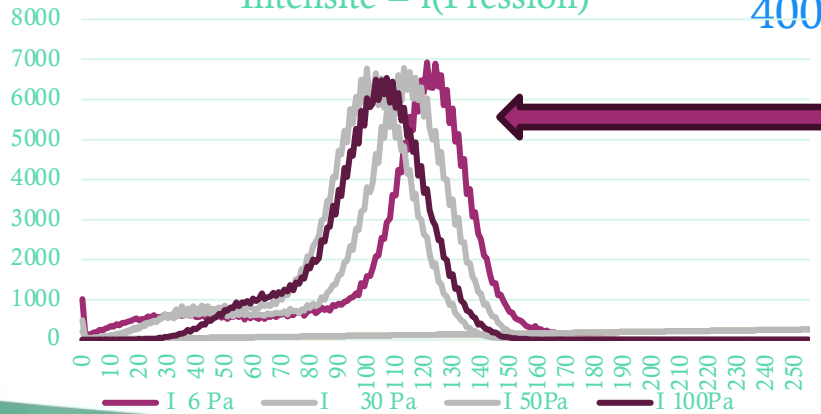


200 Pa

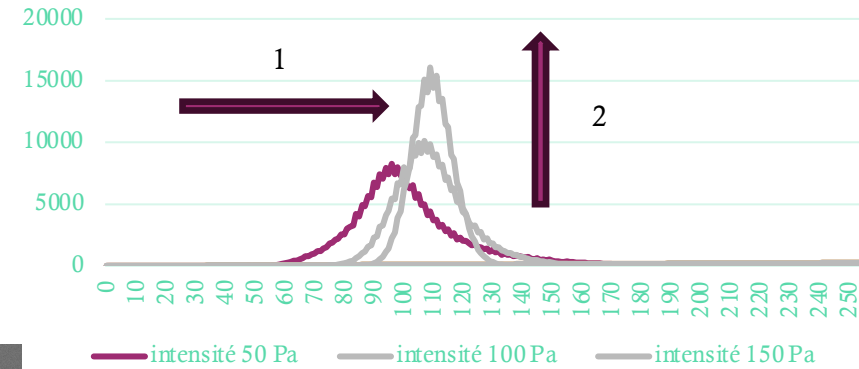


400 Pa

Intensité = f(Pression)

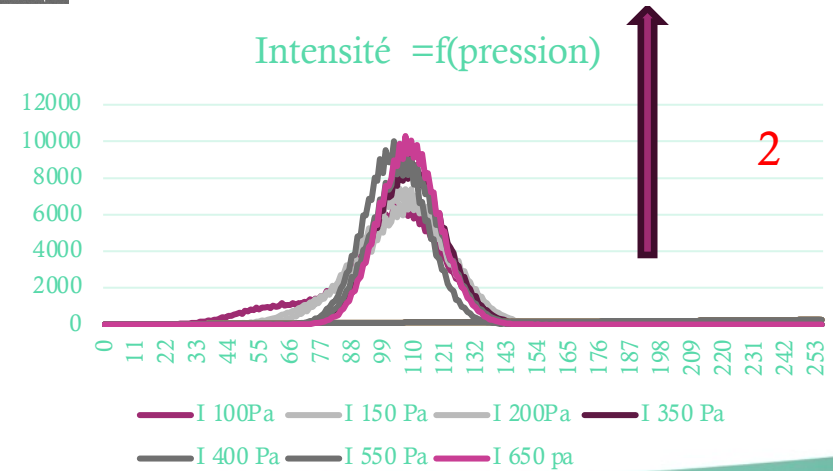


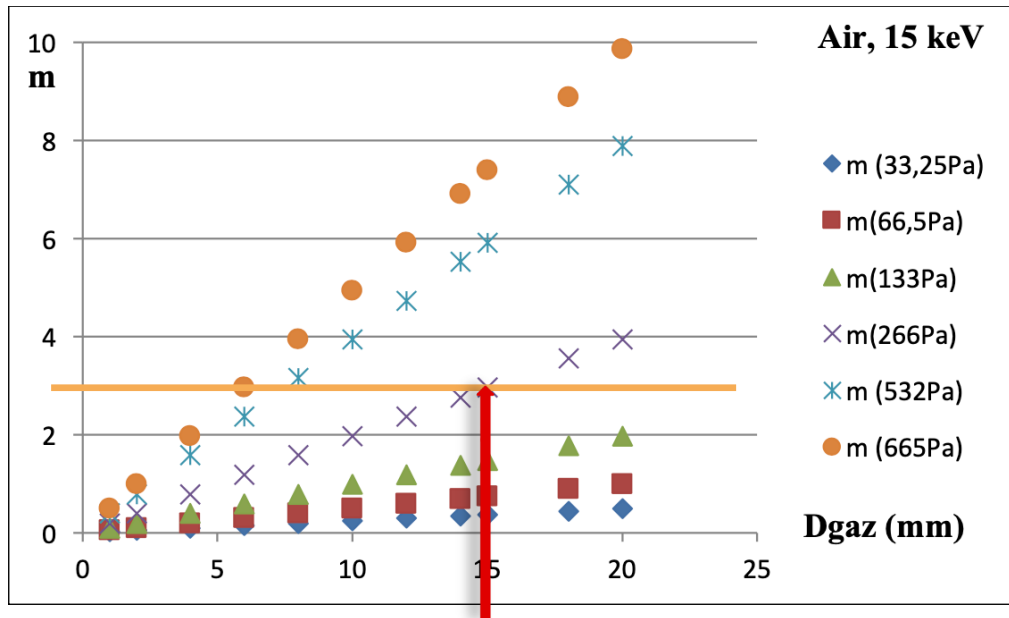
Intensité = f(Pression)



ImageJ

Intensité = f(pression)





$$m = \sigma_t P D_{\text{gaz}} / k T$$

$m < 0,05$ diffusion minimale

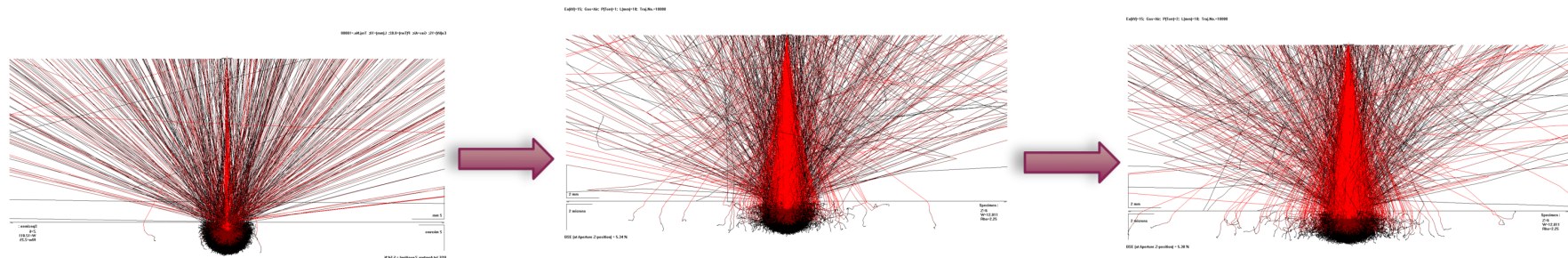
$0,05 < m < 3$ diffusion partielle

$m > 3$ diffusion plurielle

Lahcen Kouchaf, Christian Mathieu
 La microscopie à balayage sous
 environnement gazeux. Du principe à
 l'étude optimisée des matériaux. Edition
 Ellipses - ISBN 9783240-018068

Changement de régime de diffusion

Simulation Monte Carlo



3 Pa

133 Pa

266 Pa

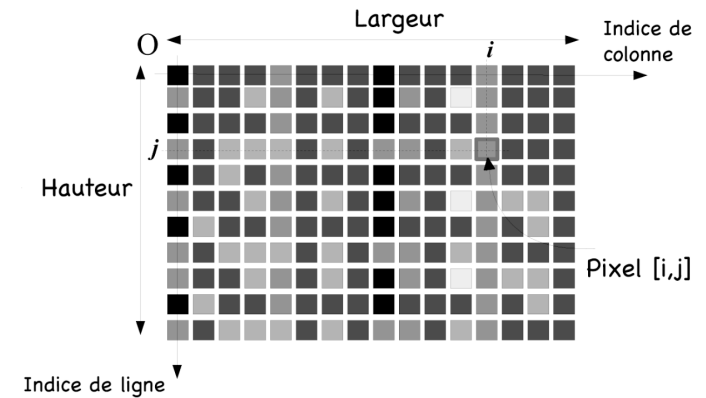
Perte de la zone d'intérêt

Perte d'information



Image bruitée ?

Image numérique : signal numérique
composée d'unités élémentaires (pixels)



$I(i,j) = n$ est la valeur du niveau de gris

n est compris entre N_{min} et N_{max}

256 niveaux de gris

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

Le bruit : le bruit est tout ce qu'il n'est pas possible de décrire ou modéliser de manière déterministe.



Utiliser des modèles stochastiques pour le caractériser.

Probabilité, distribution



Les types de bruit

Bruit additif

Bruit gaussien

Bruit multiplicatif (impulsionnel)

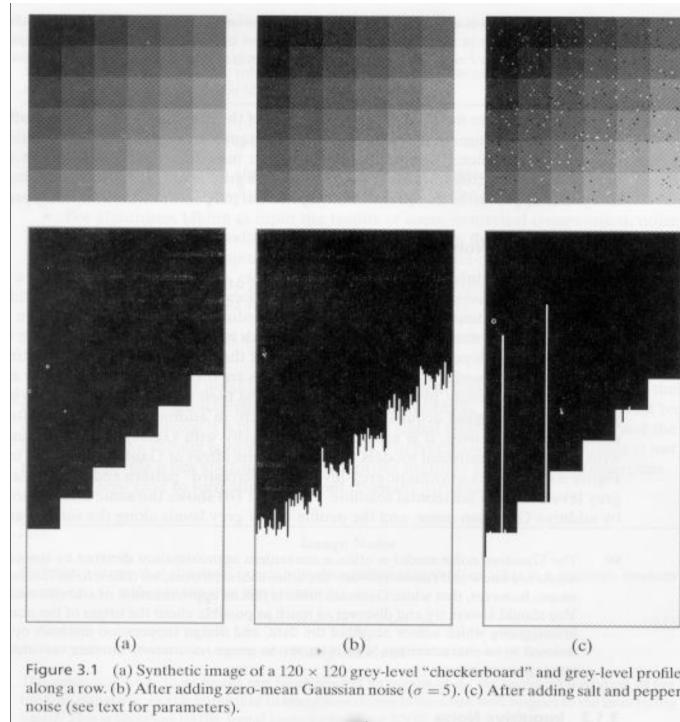
Bruit Poivre et Sel

$$\hat{E}(i, j) = E(i, j) + n(i, j)$$

signal bruité au pixel (i,j) signal pur au pixel (i,j) bruit additif au pixel (i,j)

$$\hat{E}(i, j) = E(i, j) \cdot n(i, j)$$

Signal pur



Bruit multiplicatif



Bruit additif





La nature du bruit dans les images MEB

μ moyenne.

σ écart-type

Reimer L. 1998. Scanning Electron Microscopy: Physics of Image Formation and Microanalysis. Springer.

Description du bruit dans l'image bruit quantique qui suit une distribution de Poisson (lié à l'émission des électrons primaires)

$$f(x) = \frac{\mu^x}{x!} e^{-\mu} \text{ distribution de Poisson}$$

Distribution Gaussienne

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

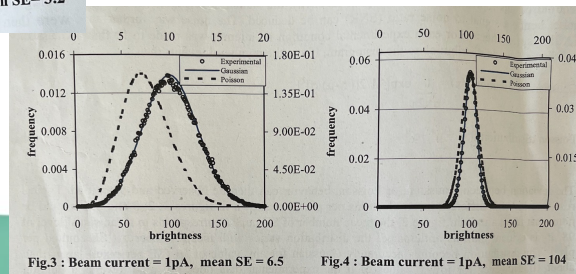
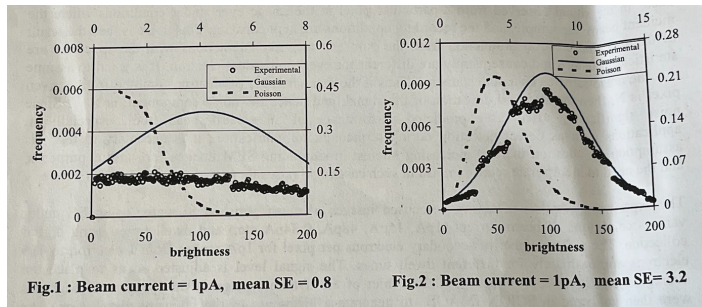
Microsc Microana19(suppl2) 2003 Prasad and Joy is SEM Noise gaussian ?
Comparaison distribution gaussienne et de poisson en fonction du courant de sonde et du dwell time

SCION Image

Le nombre moyen d'électrons secondaires par pixel varies entre 1 et 416 en fonction du dwell time

Distribution gaussienne si

$\mu > 10$





Scanning 34, 137-144 2012 F Timischl, M Date, S Nemoto
A statistical model of signal-noise in SEM

Description des étapes avec des distributions de Poisson pour accéder au SNR

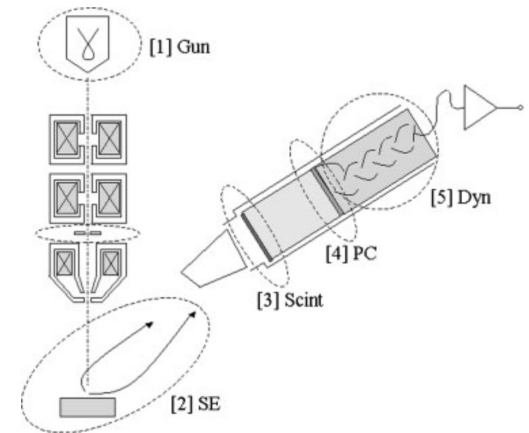


Fig 1. Basic noise model consisting of five signal conversion stages excluding amplifier noise.

Cizmar P, Vldar AE, Ming B, Postek MT.. Simulated SEM images for resolution measurement. Scanning 30 (5): 381-391 2008.

$$C_3 = C_2 + (Q_G + Q_P \sqrt{C_2}) R_i$$



Combinaison bruit gaussien (électronique, détection) et bruit de poisson (canon)

R_i Nombre aléatoire avec la distribution gaussienne

C_2, C_3 Intensité du niveau de gris



La nature du bruit dans les images MEB

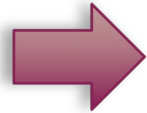
S. Rahman, M. Salomon, S. Dembele. Noise Analysis to Guide Denoising of Scanning Electron Microscopy Images. International Conference on Control, Decision and Information Technologies, Jul 2023, Roma, Italy. hal-04741846

La nature du bruit dépend du dwell time (DT) (MEB FEG Zeiss auriga)

si $DT > 500 \text{ ns}$

Si $DT < 500 \text{ ns}$

Bruit gaussian



Bruit distribution gamma

Les techniques de débruitage

Méthode classique

Méthode par transformation

Méthode par Deep Learning

Domaine spatial
(temporel)

Domaine fréquentiel

Sheikh Shah Mohammad Motiur Rahman, Michel Salomon, Sounkalo Dembélé. Towards scanning electron microscopy image denoising: a state-of-the-art overview, benchmark, taxonomies, and future direction. Machine Vision and Applications, 2024, 35 (4), pp.87 (20). 10.1007/s00138-024-01573-9 . hal-04745625

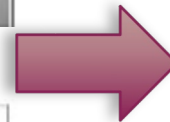
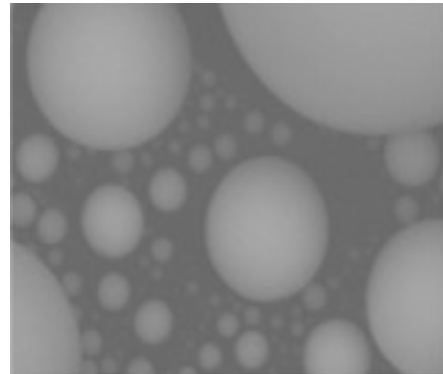
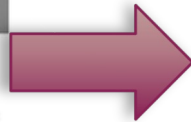
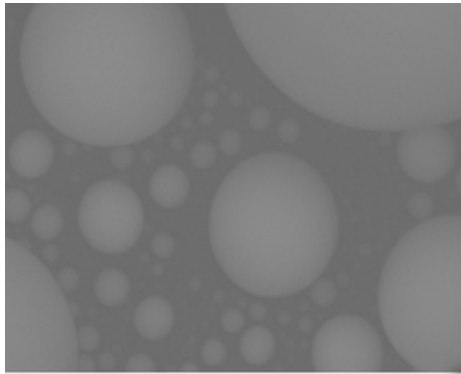


Bille Sn sur Carbone. échantillon conducteur

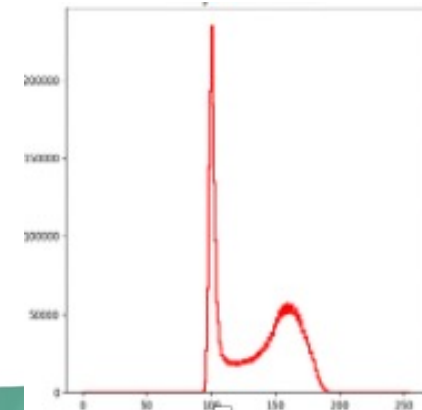
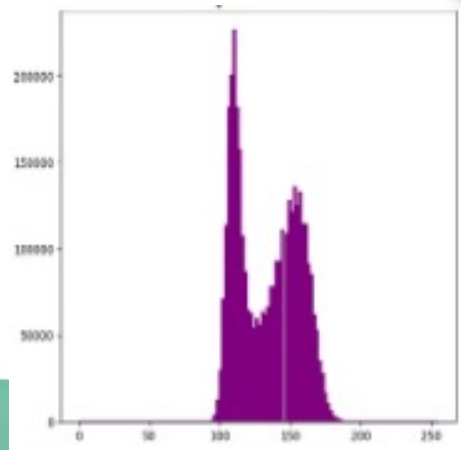
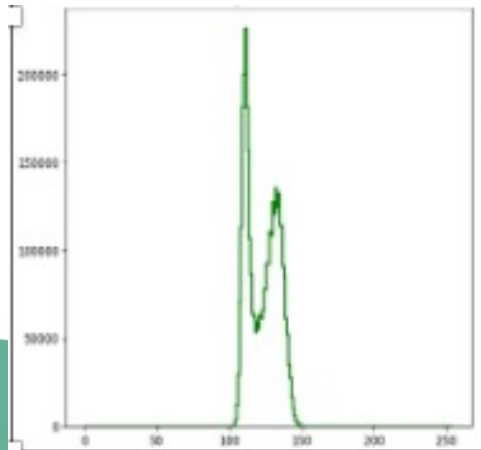
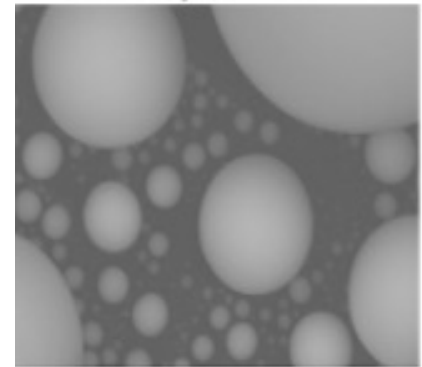
$$I_{\text{norm}}(x, y) = \frac{I(x, y) - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}} \times (N_{\text{max}} - N_{\text{min}}) + N_{\text{min}}$$

DT = 16 μs

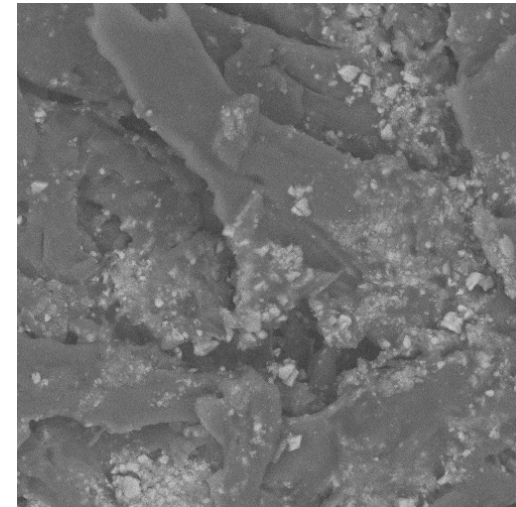
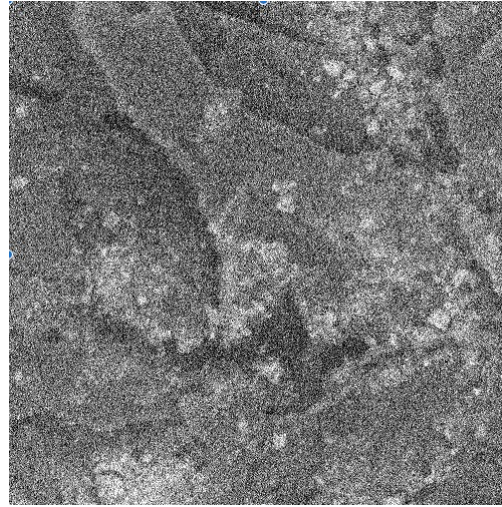
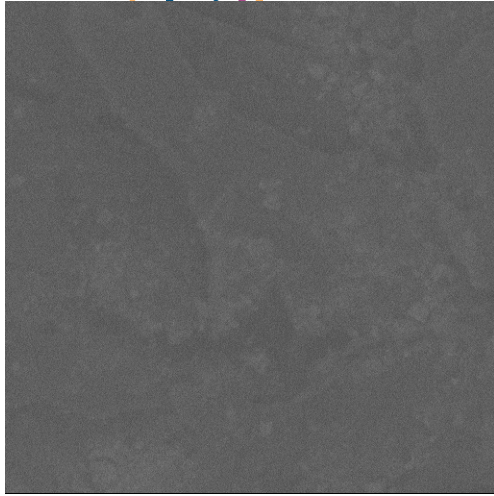
U = 30kV P = 150 Pa

DT = 16 μs

U = 30kV P = 6 Pa



Échantillon isolant



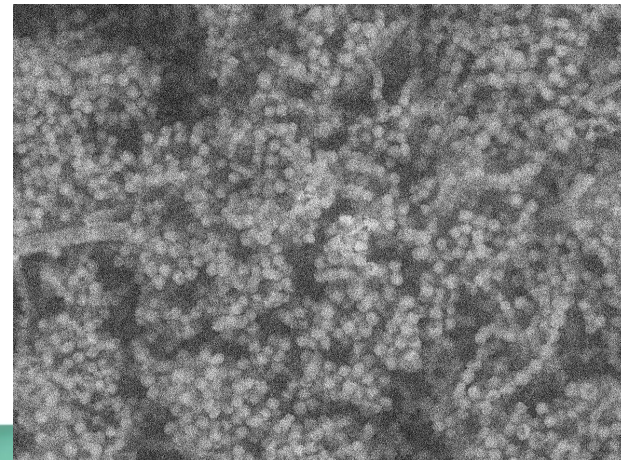
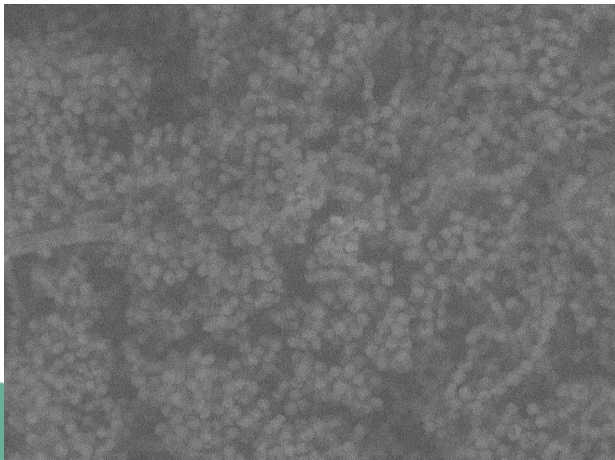
Papier 15 kV - 200 Pa

Normalisation

Papier 15 kV - 50 Pa

Échantillon biologique

Moisissure du Roquefort
15 kV-240 Pa





Méthode par Deep learning

Image
bruitée

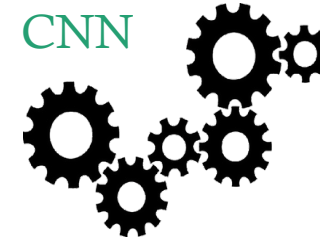


Image
débruitée

Application of deep learning – based denoising methodologies for scanning electron microscope images – S Shin I, Lee, B Chon Park and J Song – Meas Sci technol 36(2025)015406

Method	Augmentation techniques	Descriptions
Autoencoder	Rotations, perspective transform, cropping, flips, Gaussian and motion blur, sequential pipelines.	Versatile and comprehensive, suitable for tasks with high variability in orientation and appearance. Requires more computation.
CycleGAN	Random cropping, rotations, flips, resizing, image transposition.	Simple and efficient, best for basic classification tasks with minimal transformation.
DnCNN	Scaling, patch extraction, rotations, flips, random augmentations.	Ideal for localized feature analysis, useful for texture and medical imaging
DDIM	Center cropping, resizing, rotations, flips, image transposition, batch processing, caching, prefetching.	Balanced approach combining spatial and size-based augmentations. Works efficiently for high-performance pipelines.
U-Net+Attention	Pipeline-based rotations, affine rotations, perspective transform, cropping, flips, blurs, motion blur.	Comprehensive and flexible, combining multiple augmentations, ideal for general-purpose use but resource-heavy.

Métriques

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{MAX}^2}{\text{MSE}} \right)$$

Table 2. Metrics to evaluate the performance of denoising methods.

Notation	Metric	Range
PSNR	Peak signal to noise ratio	$[0, \infty]$
SSIM	Structural similarity index	$[0, 1]$
FSIM	Feature-based similarity index	$[0, 1]$
UIQ	universal image quality index	$[0, 1]$
RMSE	Root mean square error	$[0, \infty]$
DISTS	Deep Image Structure and Texture Similarity	$[0, \infty]$

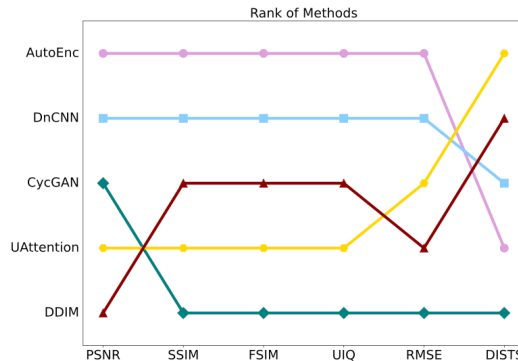
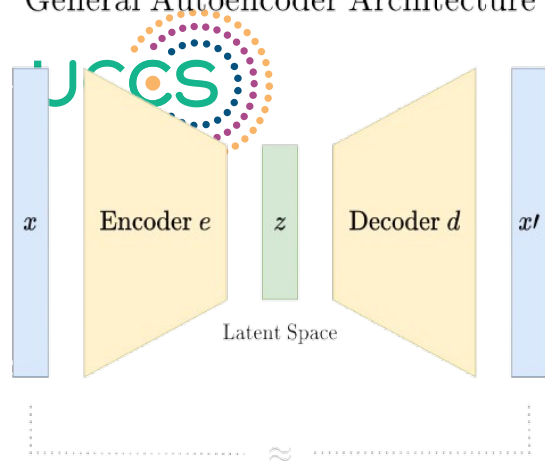


Figure 4. Ranking of five methods according to each metric. The ranking varies depending on the performance.



Choix de
l'Autoencodeur



Un auto-encodeur est un type d'architecture de réseau neuronal conçu pour compresser efficacement (encoder) les données d'entrée vers leurs caractéristiques essentielles, puis reconstruire (décoder) l'entrée d'origine à partir de cette représentation compressée.

Les auto-encodeurs sont entraînés à découvrir les variables latentes des données d'entrée : des variables cachées ou aléatoires qui, bien qu'elles ne soient pas directement observables, ont une incidence fondamentale sur la distribution des données.

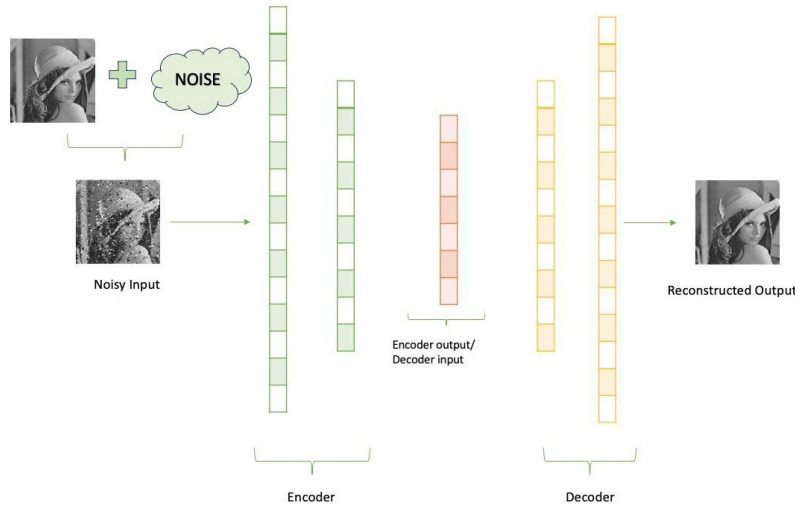
Les auto-encodeurs découvrent les variables latentes en faisant passer les données d'entrée dans un « goulot d'étranglement » avant qu'elles atteignent le décodeur. Cela oblige l'encodeur à apprendre à extraire et à transmettre uniquement les informations les plus adaptées à la reconstruction précise de l'entrée d'origine.



Extraction de caractéristique



Les auto-encodeurs débruiteurs reçoivent des données d'entrée partiellement corrompues et sont entraînés à restaurer l'entrée d'origine en supprimant les informations inutiles grâce à la réduction de la dimensionnalité.



- Construction d'une base de données en fonction de la tension d'accélération, de la pression, du dwell time

Image 1280x960

Métriques utilisées

MSE erreur quadratique moyenne (EQM)

L'image débruitée est comparée à une image de référence. Calcul au niveau des pixels entre deux images

SSIM l'index de similarité structurelle

l'œil humain est plus sensible aux changements de structure dans l'image

Image bruitée

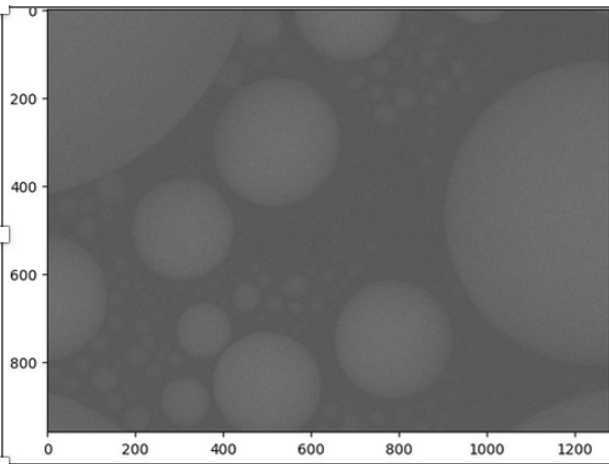


Image débruitée

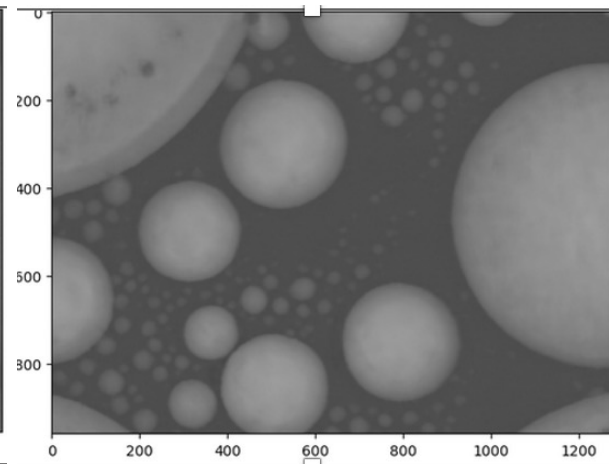
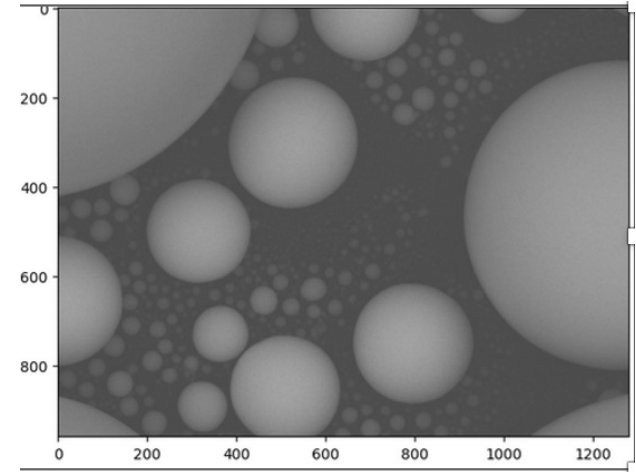


Image non bruitée



EQM=0.08

SSIM=0.48



Premier Test sur Echantillon biologique

Pétale de rose sur Platine Peltier (-20°C)

Image bruitée

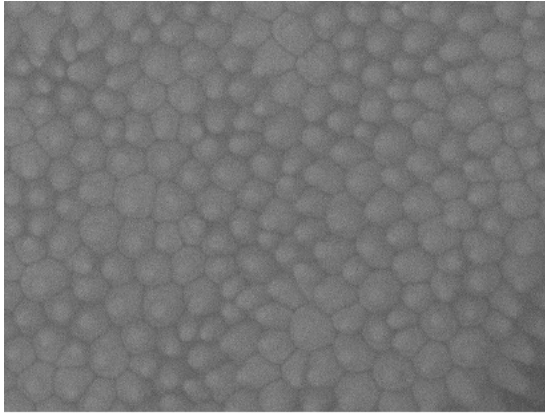


Image débruitée

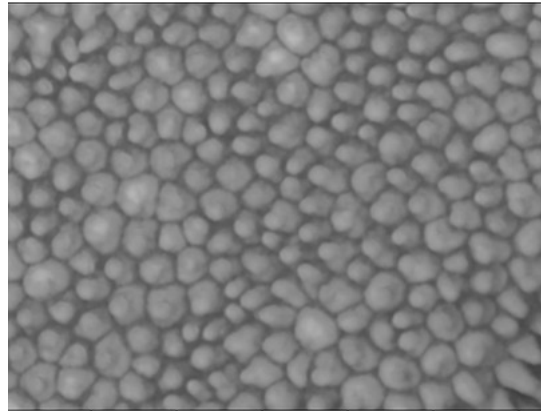
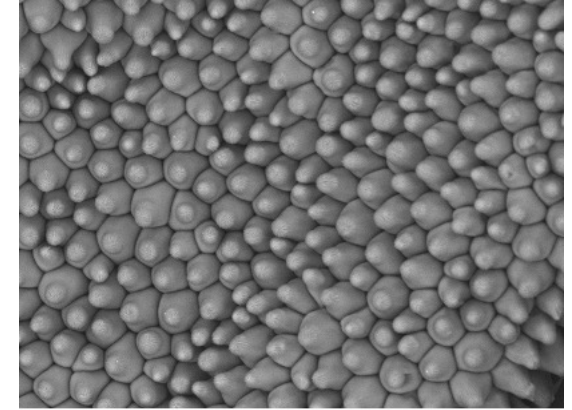


Image non bruitée



U = 15 kV – 240 Pa

6 Pa

La qualité de l'image s'est améliorée mais c'est encore perfectible (faible valeur de SSIM structure locale n'est que partiellement restaurée).

EQM=0.02

SSIM=0.38

La connaissance de la nature du bruit (origine, additif, multiplicatif) est essentiel.

Les résultats préliminaires avec le Deep Learning son encourageants pour le débruitage d'images en électrons rétrodiffusés pour les échantillons biologiques.

Voie exploratoire en complément de l'utilisation de platine refroidie

Perspectives

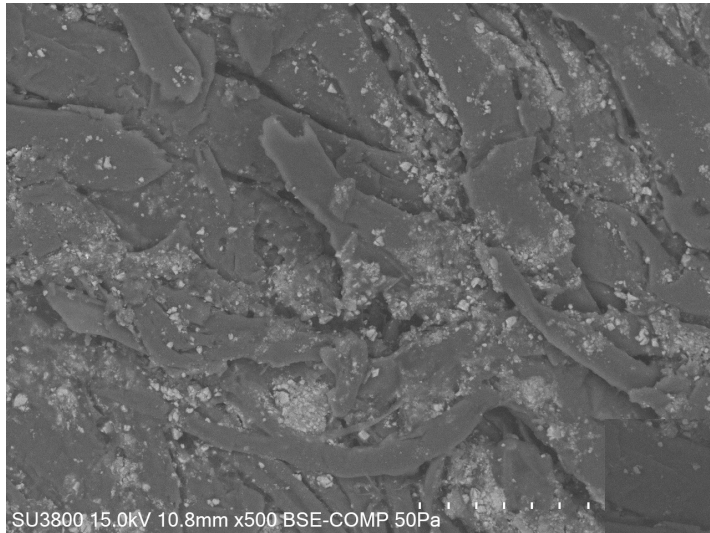
- Détermination de la nature du bruit dans ces conditions particulières
- Extension au méthode de détection autres que les électrons rétrodiffusés

15 kV

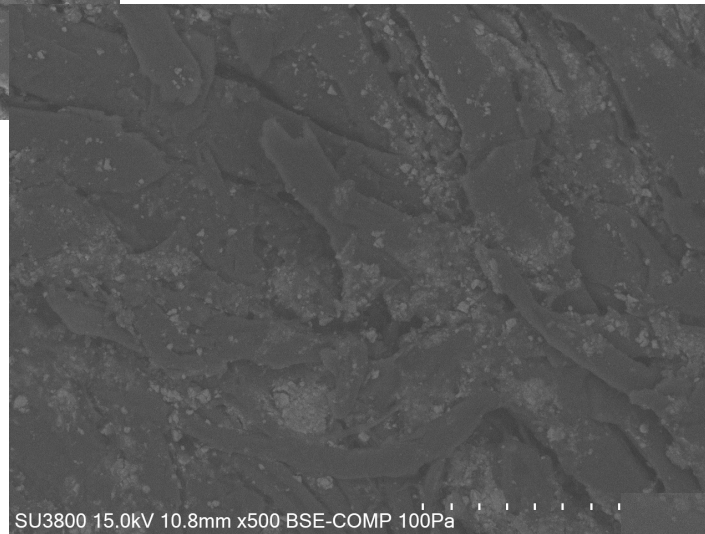
Influence de la pression d'Air

Détecteur BSE

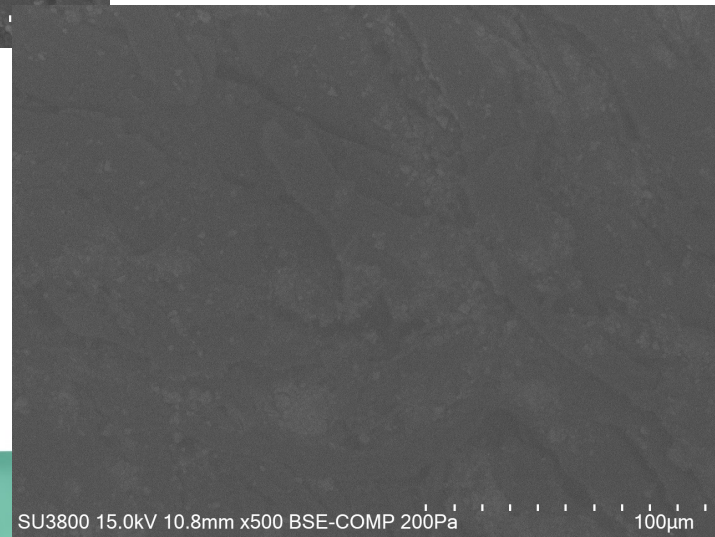
50 Pa



100 Pa



200 Pa



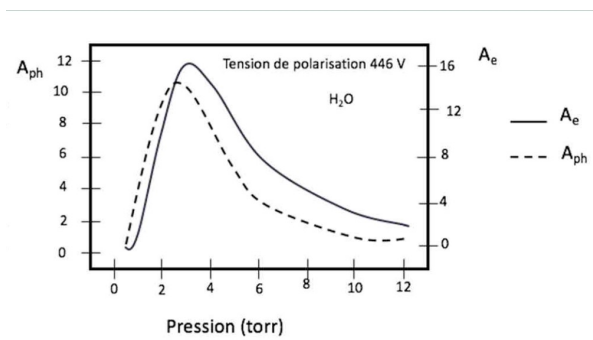
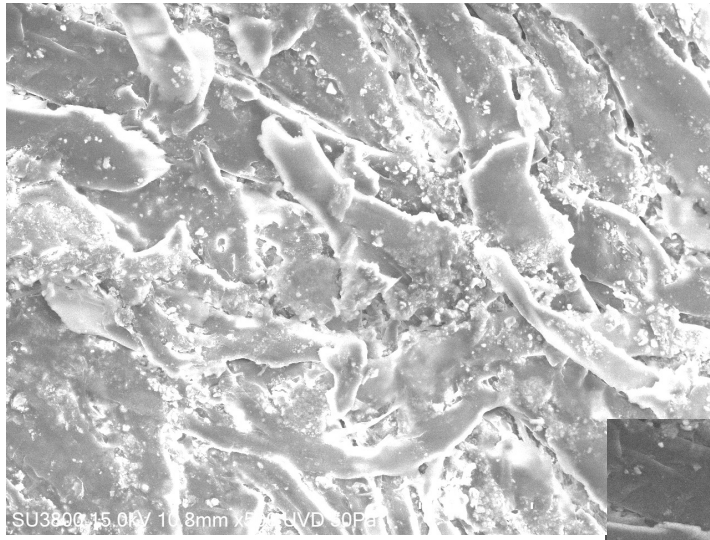
15 kV

Influence de la pression d'Air

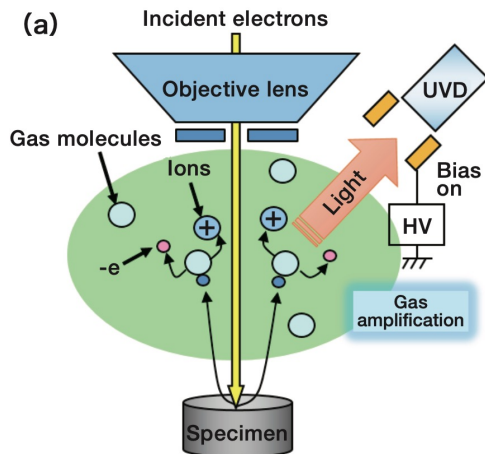
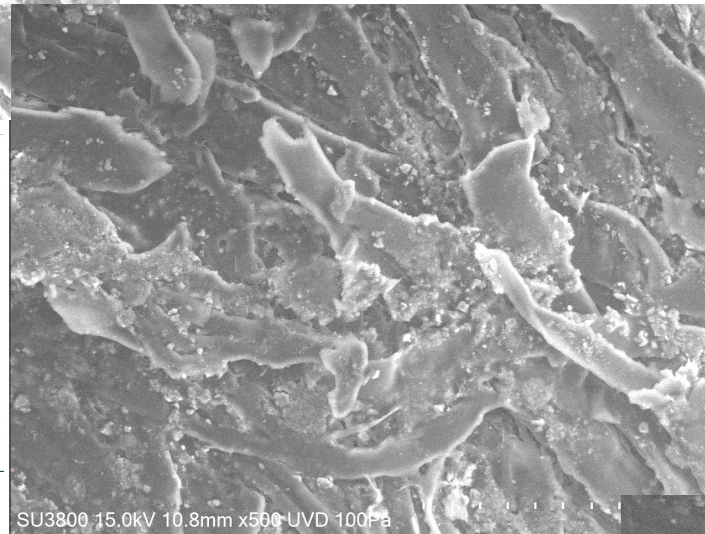
Détecteur UVD

50 Pa

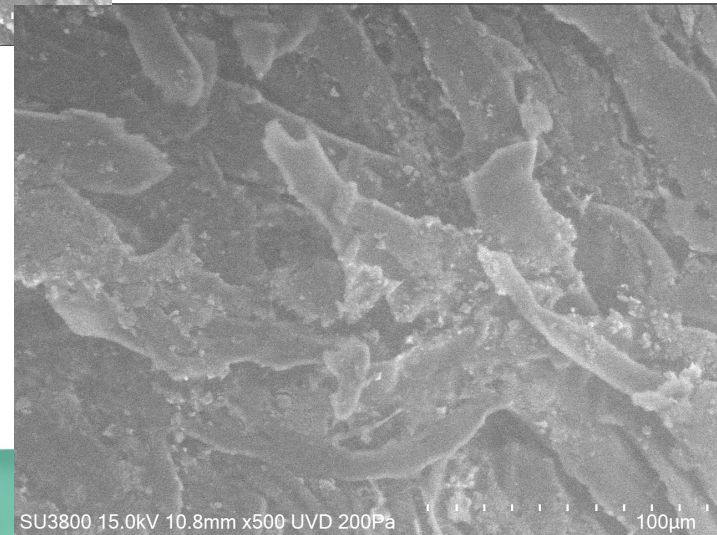
Nature du bruit



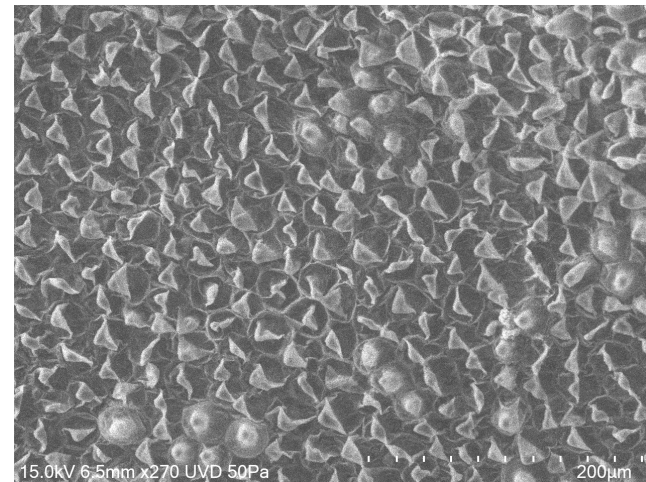
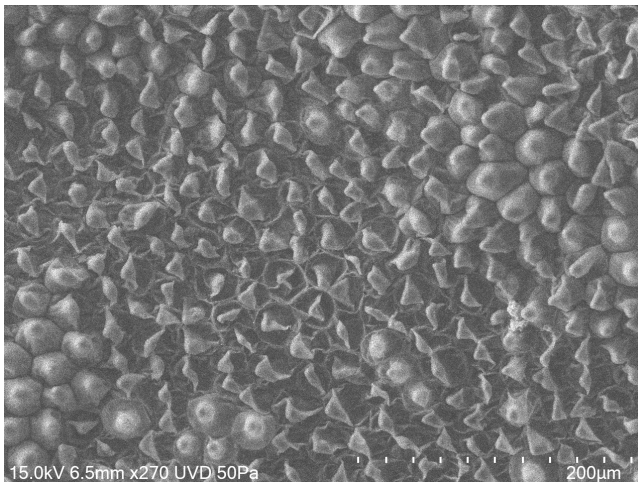
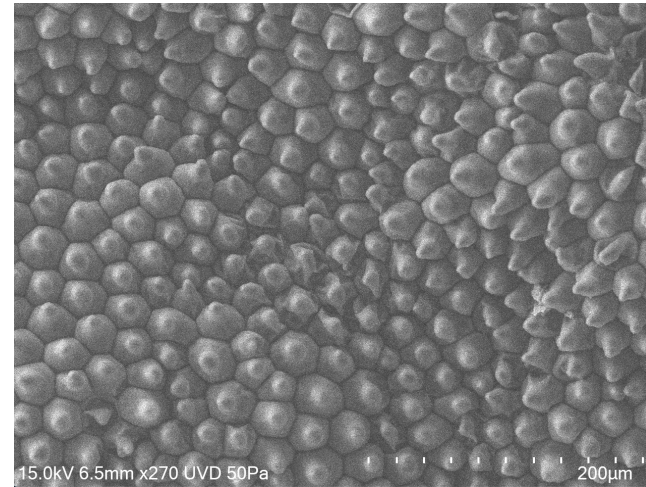
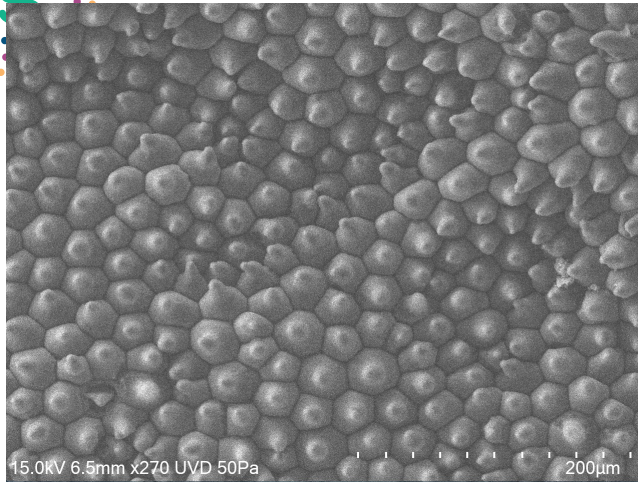
100 Pa



200 Pa

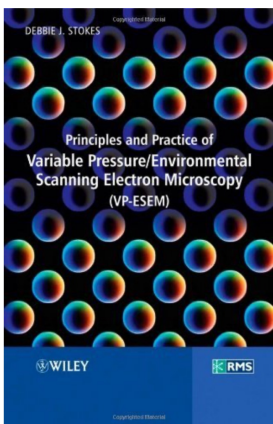


Mais ne jamais oublier la réponse de son échantillon





Pour aller plus loin,
G.D Danilatos www.danilatos.com



Debbie stokes
**Principles and Practice of Variable
Pressure / Environmental Scanning
Electron Microscopy (VP-ESEM) Wiley**
ISBN: 978-0-470-06540-2



Monique Repoux, Christian Mathieu

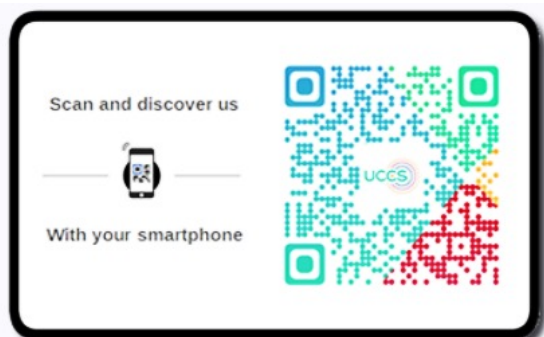
La microscopie électronique à balayage à pression contrôlée 243-266
Microscopie électronique à balayage et Microanalyses – EDP Sciences -
ISBN : 978-2-7598-0082-7

Lahcen Khouchaf, Christian Mathieu

La microscopie à balayage sous environnement gazeux. Du principe à
l'étude optimisée des matériaux. Edition Ellipses - ISBN 9783240-018068



Réunion GNMEBA- Toulouse 2025- Paris



Merci de votre
attention

UNITÉ DE CATALYSE ET
CHIMIE DU SOLIDE

 Université
de Lille




UNIVERSITÉ D'ARTOIS

 centralelille

 institut
Chevreul