

Image processing partie I (chapitre 16)

Les concepts clés du cours concernent la numérisation d'images analogiques et les différentes techniques de post-traitement utilisées pour corriger les défauts et réduire le bruit, notamment les filtres de lissage et le filtrage médian.

1. Fondements du traitement d'image

Buts principaux du traitement d'image :

- Améliorer l'apparence visuelle d'images
- Préparer les images pour des mesures et analyses

△ Modifier une image de manière à tromper le lecteur est considéré comme frauduleux. Il faut : i) conserver l'image originale et ii) documenter toutes les étapes de traitement.

2. Acquisition d'images

2.1 SEM - Scanning Electron Microscopy

L'image est créée par balayage d'un faisceau électronique et détection des électrons secondaires, rétrodiffusés, rayons X,...

2.2 TEM - Transmission Electron Microscopy

L'échantillon est traversé par un faisceau d'électrons et plusieurs signaux peuvent être capturés (électrons élastiques, inélastiques, rayons X,...).

2.3 Chaîne de formation d'image

- 1 Échantillon + faisceau (optique ou électronique)
- 2 Objectif
- 3 Détecteur ou caméra
- 4 Numérisation (image digitale)

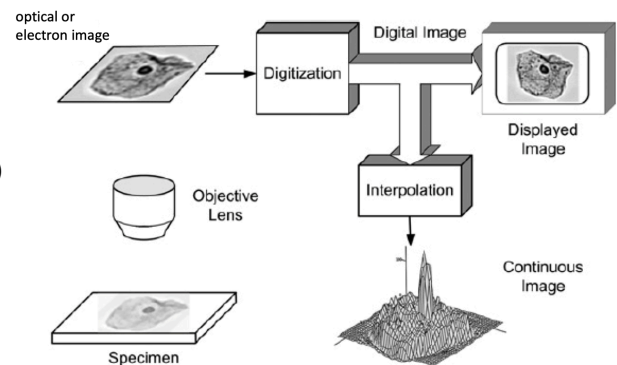


Figure 1: Chaîne de formation d'image

3. Représentation numérique d'une image

3.1 Définition

Une image est une fonction 2D $I(x, y) = f(x, y)$ qui associe à chaque position (x, y) une intensité de niveau de gris ou couleur.

3.2 Contraste

Pour extraire de l'information il faut des variations de l'intensité. Le contraste entre deux points (x_1, y_1) et (x_2, y_2) peut être défini comme

$$C = \frac{I_2(x_2, y_2) - I_1(x_1, y_1)}{I_1(x_1, y_1)} = \frac{\Delta I}{I_1}$$

Intensité : niveau moyen global (image claire ou sombre)

Contraste : amplitude des variations (différence entre zones claires et sombres)

Résolution : distance minimale entre deux points pour qu'ils soient distingués comme séparés.

→ Dépend de la longueur d'onde, de l'ouverture numérique et des aberrations.

Réglages bias et gain

Bias : décalage global du signal (monte/baisse l'intensité moyenne)

Gain : étirement du signal (monte/baisse le contraste)

3.3 Histogramme

Histogramme du nombre de pixels pour chaque niveau de gris.

Permet de voir la répartition des intensités pour vérifier si la dynamique est bien utilisée, choisir des seuils pour la segmentation.

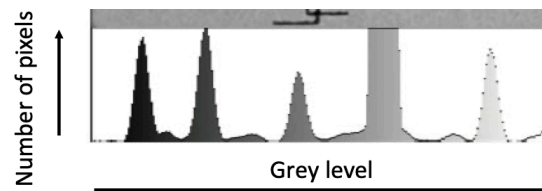


Figure 2: Exemple d'un histogramme

3.4 Bruit & rapport signal/bruit (S/N)

Bruit : fluctuations aléatoires sur les pixels, tels que les grains et les points parasites.

Différents niveaux : plus le S/N est faible, moins les détails sont visibles et plus l'image est "bruyante".

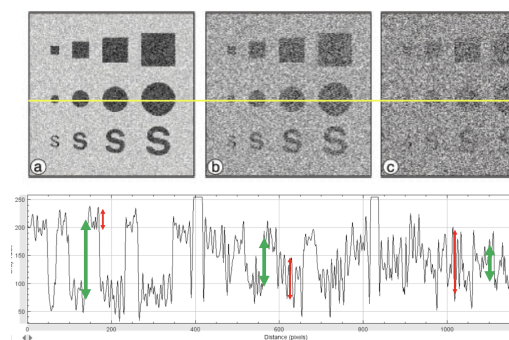


Figure 3 : Exemple de rapport Signal/Bruit, du moins au plus bruyant

4. Détecteurs, caméras et DQE

4.1 DQE - Detection Quantum Efficiency

Pour un détecteur à réponse linéaire,

$$DQE = \frac{(S/N)^2_{\text{sortie}}}{(S/N)^2_{\text{entrée}}}$$

si DQE = 1, le détecteur est parfait, et il n'y a pas de bruit ajouté.

En pratique DQE < 1, tout détecteur ajoute du bruit.

4.2 Dynamique et linéarité

Un détecteur est linéaire seulement dans une certaine plage de signal (=dynamic range)

Si le signal est trop bas, le bruit domine et la réponse n'est pas fiable.

Si le signal est trop haut, il y a saturation, la réponse ne croît plus proportionnellement (la courbe s'aplatit).

4.3 Types de détecteurs

SE (Secondary Electron)

- + Rapides, réponse linéaire, gain élevé
- DQE faible, donc bruit plus important

Détecteurs solides (BSE, HAADF, X-ray, STEM)

- + Haut DQE
- Ne peuvent pas collecter trop d'électrons simultanément donc vitesse limitée

CCD (Charged Coupled Device)

Stockent la charge et transfèrent vers un unique amplificateur

- + Bon S/N, bonne qualité
- Lecture lente, risque de blooming (= débordement des charges)

CMOS (Complimentary Metal-Oxide Semiconductors)

Amplificateur dans chaque pixel, lecture colonne/ligne.

- + Très rapide
- Plus bruité

5. Numérisation de l'image : échantillonnage et quantification

La numérisation est le processus de conversion d'une image analogique (à gradients continus en espace et en intensité) en une forme numérique que les ordinateurs peuvent manipuler. Une image numérique est donc le résultat de la transformation d'un signal continu en un signal discret.

5.1 De l'image analogique à l'image numérique

L'image numérique est un tableau bidimensionnel de valeurs (matrice) qui est défini par deux opérations essentielles de discrétisation :

- **L'échantillonnage (sampling)** : Discrétisation de l'axe spatial (x, y). Il s'agit de diviser l'espace continu de l'image en éléments distincts appelés pixels.
- **La quantification (quantization)** : Discrétisation de l'axe d'intensité (niveaux de gris ou couleur). Il s'agit d'attribuer une valeur numérique (un niveau de gris) à chaque pixel.

5.2 Echantillonnage et théorème de Nyquist

L'échantillonnage découpe l'image physique en une grille de points distincts à intervalles réguliers. C'est ce découpage qui décide de la finesse (la résolution spatiale) des détails qui seront visibles dans l'image numérique finale.

Théorème de Nyquist :

Pour éviter de perdre des informations ou de créer des erreurs, le taux d'échantillonnage doit être au moins le double de la fréquence du détail le plus fin de l'image. Soit, la fréquence à laquelle le signal est mesuré doit être au minimum deux fois supérieure à la plus haute fréquence présente dans l'information originale.

- Un taux d'échantillonnage trop faible (sous-échantillonnage) conduit à une perte d'information ou à l'apparition de fausses structures ne représentant pas l'original.
- Un taux d'échantillonnage beaucoup plus grand que le taux de Nyquist est souvent utilisé, mais il génère des fichiers volumineux et n'ajoute pas d'information (suréchantillonnage).
- Le pixel est un espace fini. Il est préférable que le pixel soit carré pour simplifier les calculs de traitement d'image.

5.3 Quantification : pixels, bits et octets

La quantification détermine la résolution en niveaux de gris ou la profondeur de couleur de l'image. C'est une mesure binaire du nombre de valeurs d'intensité possibles.

- *1 octet = 8 bits* : C'est le format le plus courant, permettant $2^8 = 256$ valeurs de gris (de 0 à 255).
- *12 bits, 16 bits* : Sont souvent utilisés en microscopie scientifique pour capturer une plus grande gamme dynamique du signal (4096 ou 65536 niveaux), même si l'œil humain ne peut distinguer qu'environ 32 niveaux de gris.

6. Correction de défauts et réduction du bruit

Les corrections de défauts sont des opérations de post-traitement visant à corriger les imperfections dues au système optique, aux détecteurs, ou au bruit statistique.

Note Importante : Ces corrections ne peuvent pas remplacer une image "parfaite" acquise initialement. Elles sont utilisées uniquement lorsque l'obtention d'une bonne image n'est pas possible (faible dose, bruit, etc.).

6.1 Ajustements de couleurs

La table de correspondance (Look-Up Table, LUT) permet d'ajuster l'affichage d'une image en modifiant la couleur utilisée pour représenter chaque valeur de pixel.

La modification de la LUT est réversible car elle n'altère jamais la valeur numérique (le chiffre) qui est réellement stockée pour chaque pixel. Elle change uniquement la "règle" qui dit au logiciel comment afficher ce chiffre sur l'écran (par exemple, afficher le chiffre 150 en gris foncé au lieu de gris moyen).

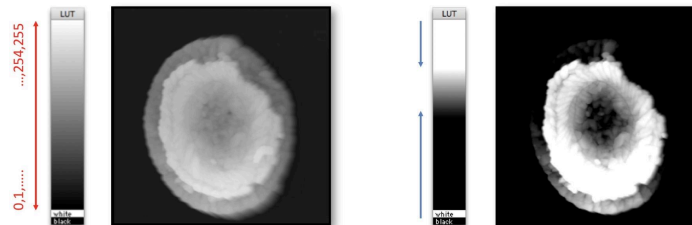


Figure 4 : Contraste augmenté

Des échelles linéaires ou non-linéaires peuvent être utilisées pour améliorer le contraste ou révéler des caractéristiques peu visibles.

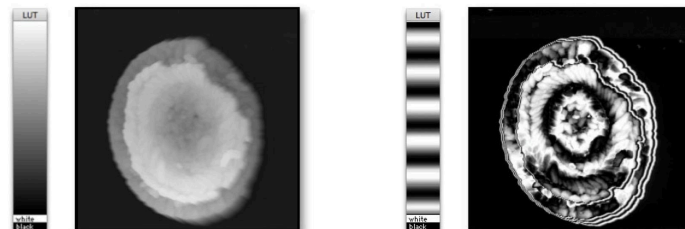


Figure 5 : Niveaux de gris "zébré"

Les images en microscopie sont généralement capturées en niveaux de gris, puis une couleur : espace RGB (Red-Green-Blue) peut être appliquée pour la visualisation. Le but de l'application de couleur n'est pas de montrer la couleur réelle de l'échantillon, mais d'améliorer la visibilité et l'interprétation des données d'intensité. C'est beaucoup plus facile pour l'œil humain de distinguer 10 nuances de rouge, de vert et de bleu différentes que 10 nuances subtiles de gris.

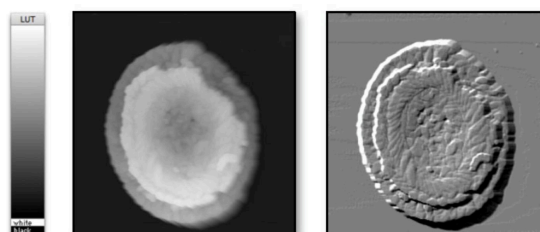


Figure 6 : Application d'une couleur de l'espace RGB

6.2 Réduction du bruit par filtres linéaires (lissage par moyenne)

Le bruit est une fluctuation aléatoire des valeurs de pixels. La réduction du bruit est effectuée à l'aide d'un filtre à noyau (Kernel Filter), une matrice ($n \times n$) appliquée à chaque pixel.

Lissage par voisinage (neighborhood averaging) : Le pixel central est remplacé par la moyenne de lui-même et de ses voisins. Ceci est réalisé en utilisant une matrice de poids numériques (ex. : 3×3).

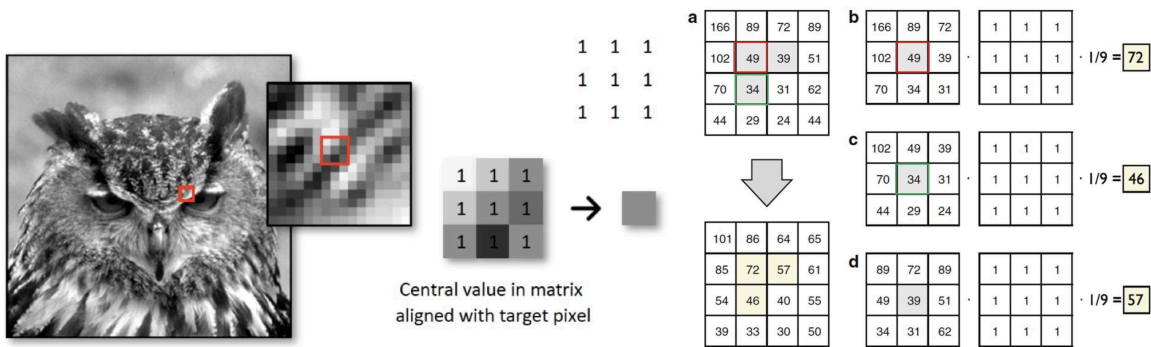


Figure 7 : Lissage par voisinage

6.3. Lissage Gaussien (Gaussian Smoothing)

Le lissage gaussien est un lissage par moyenne pondérée qui utilise un ensemble de poids qui approxime le profil d'une fonction gaussienne :

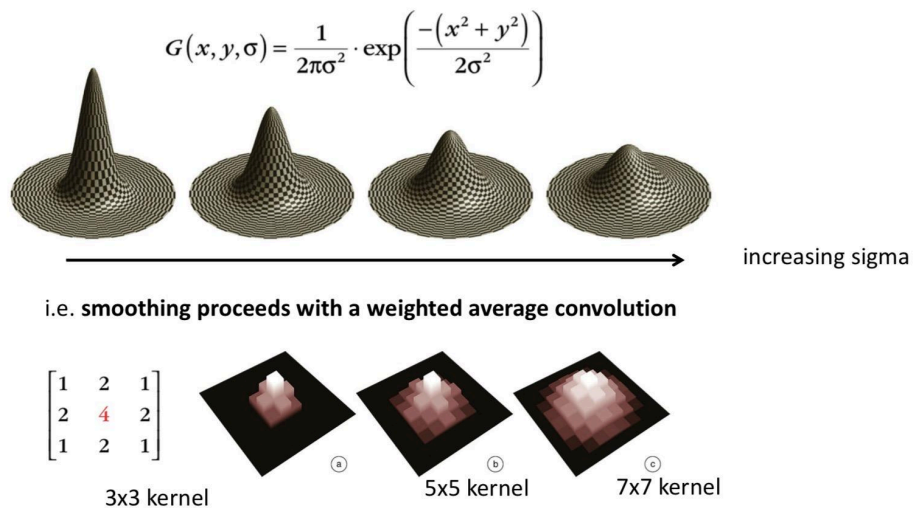


Figure 8 : Fonction gaussienne

Le paramètre sigma, (l'écart type) contrôle le degré de flou (ou l'étendue du lissage). Si la taille du noyau est mal choisie, des artefacts peuvent apparaître en interagissant avec les caractéristiques de l'image.

6.4. Filtrage médian (median filtering)

Le filtrage médian est une méthode de classement par voisinage qui est particulièrement efficace contre le bruit impulsionnel (bruit "poivre et sel"). C'est un type de bruit qui se manifeste dans une image numérique par l'apparition de pixels isolés ayant des valeurs d'intensité (de gris) très différentes de celles de leurs voisins.

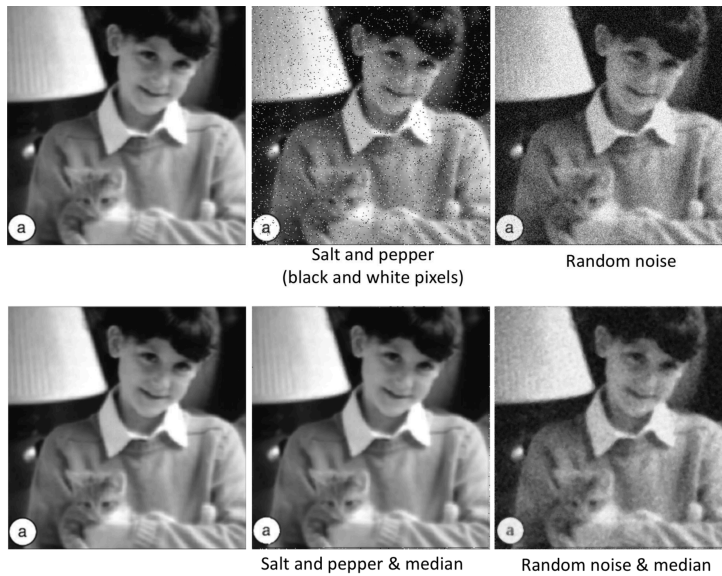


Figure 9 : Application du filtrage médian

Il remplace la valeur du pixel central par la valeur médiane de l'ensemble ordonné de toutes les valeurs de pixels dans son voisinage. La nouvelle valeur est donc une valeur existante dans le voisinage, ce qui préserve les bords.

Avantages : Le fait que la médiane utilise une valeur existante, le rend très efficace pour réduire les valeurs aberrantes (outliers) sans créer de nouvelles valeurs intermédiaires, préservant ainsi mieux les transitions de couleur (les bords) que les filtres de moyenne.

Le filtre médian hybride (Hybrid Median) est une variante qui utilise deux sous-voisinages pour préserver les lignes et les coins qui seraient autrement arrondis ou effacés par le filtre médian conventionnel.

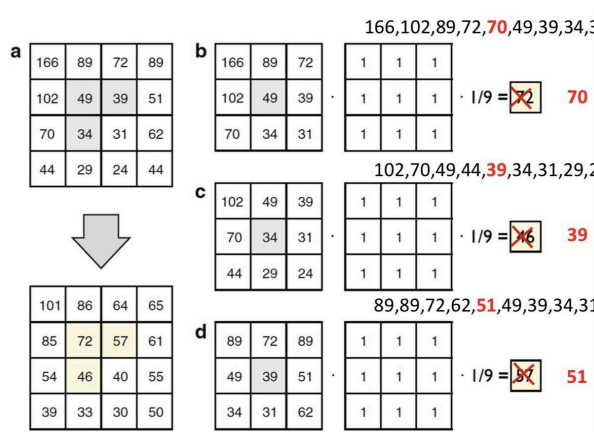


Figure 10 : Lissage par voisinage VS médian