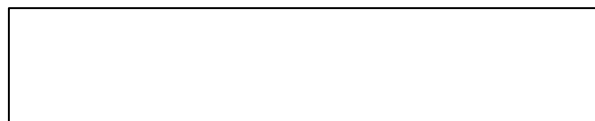




ANALYSE D'IMAGE



1. PRESENTATION DE L'ANALYSE D'IMAGE.	4
1.1. OJECTIF ET BUT DE L'ANALYSE D'IMAGE	4
1.2. PRINCIPE	4
1.2.1. FORMATION DE L'IMAGE NUMERIQUE	4
1.2.2. TRANSFORMATION DE L'IMAGE NUMERIQUE EN IMAGE BINAIRE	5
1.2.3. TRAITEMENT DE L'IMAGE BINAIRE	5
1.2.4. EXEMPLE DE TRAITEMENT	5
1.3. HISTORIQUE.	5
2. FORMATION DE L'IMAGE NUMERIQUE.	5
2.1. LE PIXEL.	6
2.1.1. PASSAGE ANALOGIQUE-NUMERIQUE	6
2.1.2. PIXEL ECRAN- PIXEL NUMERIQUE	6
2.1.3. MAILLAGE EN PIXEL NUMERIQUE	6
2.2. ECHELLE DE CODAGE ET DE LUMINOSITE.	7
2.2.1. CODAGE EN BIT DES NIVEAUX DE GRIS	7
2.2.2. ECHELLE DE LUMINOSITE MONOCHROMATIQUE :	7
2.2.3. ECHELLE DE COULEUR.	7
2.2.4. ACQUISITION DE L'IMAGE PAR UNE CAMERA.	8
3. TRAITEMENT MATHEMATIQUE DE L'IMAGE.	8
3.1. LE SEUILLAGE	9
3.2. TRAITEMENT MATHEMATIQUE D'IMAGES BINAIRES.	10
3.2.1. LES TRANSFORMATIONS LOGIQUES.	10
3.2.2. LES TRANSFORMATIONS MORPHOLOGIQUES.	10
3.2.2.1. Erosion et Dilatation :	11
3.2.2.2. Théorème du masque de mesure :	11
3.2.2.3. Ouverture et Fermeture.	11
3.2.2.4. Transformation de voisinage	12
3.2.2.5. Amincissement et Epaississement	13
3.2.2.6. Transformation Géodésique	13
3.3. TRAITEMENT MATHEMATIQUE D'IMAGES NUMÉRIQUES.	14
3.4. LES FILTRES LINÉAIRES.	14
3.5. LES FILTRES MORPHOLOGIQUES.	15
3.5.1. FILTRES PASSE-BAS.	15
3.5.2. FILTRES PASSE-HAUT.	15
3.5.3. TRANSFORMATIONS DE VOISINAGE.	16
4. TRAITEMENT DE L'IMAGE BINAIRE	17
4.1. FILTRAGE	17
4.2. SEGMENTATION	17
4.3. SIMPLIFICATION MORPHOLOGIQUE	17
5. MESURES	18
5.1. FENÊTRE DE MESURE	18
5.2. DÉNOMBREMENT	18
5.3. PARAMÈTRES DE TAILLE.	18
5.3.1. IMPORTANCE RELATIVE.	18
5.3.2. GRANULOMÉTRIE EN NOMBRE.	18
5.3.3. GRANULOMÉTRIE EN MESURE.	19
5.3.4. QUELQUES PARAMÈTRES INTÉRESSANTS.	19

5.4. PARAMÈTRES DE FORME.	19
5.5. PARAMÈTRES D'INTENSITÉ.	21
5.6. PARAMÈTRES DE TEXTURE	21
5.7. PARAMÈTRES DE RÉPARTITION SPATIALE.	21
6. STÉRÉOLOGIE	23
6.1. NOTATIONS	23
6.2. RELATIONS FONDAMENTALES	24
6.3. CAS D'UNE RÉPARTITION DE PARTICULES DE TAILLES DIFFÉRENTES.	25
7. APPLICATIONS	27
7.1. APPLICATION A LA GRANULOMETRIE	27
7.2. APPLICATION A DES IMAGES SATELLITAIRE DU GLOBE TERRESTRE	28
7.2.1. GÉNÉRALITÉS	28
7.2.2. ETUDE DE LA RÉPARTITION DE LA VÉGÉTATION SUR UNE PHOTO AÉRIENNE	28
7.3. APPLICATION A L'ANALYSE MÉDICALE	29
7.3.1. LE SCANNER X	30
7.3.2. L'IMAGERIE PAR RÉSONANCE MAGNÉTIQUE NUCLÉAIRE	31
7.4. APPLICATION AU CONTRÔLE DE QUALITÉ	31
8. MATÉRIEL D'ANALYSE D'IMAGE QUE L'ON PEUT TROUVER SUR LE MARCHÉ :	32
8.1. INTRODUCTION	32
8.2. L'ANALYSEUR LEICA	32
8.3. PRIX DES ANALYSEURS	34
9. BIBLIOGRAPHIE	35
9.1. LIENS INTERNET	35
9.2. OUVRAGES	35

1. PRESENTATION DE L'ANALYSE D'IMAGE.

1.1. OJECTIF ET BUT DE L'ANALYSE D'IMAGE

Le but de l'analyse d'image est de fournir une description quantitative de l'image (nombre de cellules d'une certaine taille) ou une reconnaissance de forme (utile si les caractéristiques morphologiques de l'image sont liées aux propriétés de l'objet). Elle trouve des applications dans de nombreux domaines : sciences des matériaux, sciences de la vie, géologie, robotique...

Les analyseurs d'images quantitatifs se composent d'une caméra de télévision qui peut être combinée à un microscope optique, un appareil de projection ou un microscope électronique. Les signaux provenant de l'image reçue par la caméra sont traités par une unité centrale qui calcule les surfaces, effectue les comptages et répartit les particules en classe de diamètre. Il est également possible de déterminer des caractéristiques telles que le rapport entre les diamètres maximal et minimal. La zone en cours d'examen est visualisée sur un écran ; le système est accessible au clavier ou commandé par menu. Avec un tel dispositif, il est possible de choisir les objets à examiner, d'en effacer et de séparer des particules adjacentes. Ces systèmes permettent fréquemment la correction des images ou l'utilisation de méthodes de classement telles que l'intensification d'image par détection du niveau de gris pour obtenir un meilleur contraste.

1.2. PRINCIPE

1.2.1. FORMATION DE L'IMAGE NUMERIQUE

Une image «réelle » va être transformée en une image numérique par différents outils de transformation (caméra, scanner, satellite...).

Cette image numérique est constituée de pixels contenant chacun différentes informations (intensité lumineuse, couleur...). Ces informations seront codées dans une grille échelonnée, le niveau de gris, de 0 à 63 par exemple.

L'image obtenue après acquisition contient un nombre très élevé d'informations (ex 512*512*64). Ces informations sont de plus imparfaites, car les conditions d'acquisitions ne sont jamais idéales (par exemple, défocalisation de la surface, défauts de symétrie d'éclairage, contraste insuffisant)... De plus, la richesse des informations est néfaste car souvent les informations apportées ne sont pas pertinentes : de nombreux détails de l'image concernent des objets que l'on ne veut pas prendre en considération.

Il faudra donc simplifier l'image pour essayer de ne garder que les informations utiles à l'analyse. L'utilisation de filtres permet d'éliminer les effets indésirables et de «purifier » l'image.

1.2.2. TRANSFORMATION DE L'IMAGE NUMERIQUE EN IMAGE BINAIRE

En fonction des formes recherchées (grains de telles tailles, zones de couleurs particulières), on va séparer les structures intéressantes des autres par l'opération de seuillage. Elle consiste à donner la valeur 1 aux structures qui vérifient les critères sélectionnés et 0 aux autres. On obtient donc une matrice binaire.

1.2.3. TRAITEMENT DE L'IMAGE BINAIRE

Les structures de cette image binaire peuvent être étudiées sous deux aspects : la morphométrie ou la stéréologie.

La morphométrie est une analyse quantitative de l'image d'un objet ou d'une structure, elle définit des grandeurs mesurables.

La stéréologie est un ensemble de méthodes mathématiques qui permet de passer d'une analyse bidimensionnelle sur coupe à une analyse tridimensionnelle.

1.2.4. EXEMPLE DE TRAITEMENT

RECOPIER PAGE INTERNET **Erreur! Source du renvoi introuvable.** (3 pages de photos)

1.3. HISTORIQUE.

L'analyse d'images abordée par les mathématiques est très récente, elle date de 1967.

Toutefois les possibilités de l'analyse d'images étaient pressenties depuis longtemps, puisque le géologue A. Delesse (1848) a créé la première méthode d'analyse d'images, en montrant que l'aire occupée par une section quelconque d'un agglomérat est égale au volume occupé par ce constituant dans la masse de roche.

Puis des auteurs comme Minkowski (1901) et Hadwiger (1957) continuent à travailler sur les coupes à 2 dimensions (images) en adoptant un modèle ensembliste pour aborder le problème mathématique. Simultanément, des chercheurs et physiciens élaborent des méthodes d'analyse quantitative (Saltykov en 1958).

Depuis l'apparition de moyens informatiques qui ont ouvert la perspective d'images digitalisées, transformables avec une grande souplesse, la morphologie mathématique s'est développée grâce aux travaux de Haas, Matheron, et Serra (1967), et la stéréologie grâce aux travaux de Miles notamment. Ces théories scientifiques sont en développement. Les différentes écoles n'ont pas encore harmonisé leurs travaux. Toutefois, Coster et Chermant ont réalisé un grand travail d'homogénéisation dans leur Précis d'Analyse d'Images (1985).

2. FORMATION DE L'IMAGE NUMERIQUE.

DEFINITIONS ANALOGIQUE-NUMERIQUE :

La représentation analogique d'une grandeur physique est généralement assurée par un signal électrique, c'est-à-dire un courant ou une tension variant en fonction du temps. Cependant il est possible de remplacer ce signal continu par une suite de mesures dont on note le résultat sous forme de nombres, c'est la numérisation. La seule contrainte porte sur la fréquence avec laquelle ces relevés doivent être effectués pour tenir compte de la vitesse d'évolution du phénomène

2.1. LE PIXEL.

2.1.1. PASSAGE ANALOGIQUE-NUMERIQUE

Une image est digitalisée lorsqu'elle est échantillonnée et quantifiée selon une forme qui peut être lue par un ordinateur. Elle est simplement transformée en une longue suite de signaux «on/off ».

Le plus petit élément d'une photo conventionnelle est un grain. L'élément digital équivalent est le pixel (« pix » vient de picture et « el » de element). Digitaliser une image c'est comme superposer une grille très fine sur une scène en analysant la couleur et la luminosité à travers les mailles puis de noter les valeurs dans une grande liste avec un certain ordre.

Mais de combien de pixel avons-nous besoin pour décrire notre image ?

Il en faut suffisamment jusqu'au moment où nous ne pouvons plus distinguer les informations que nous apportent en plus les nouveaux pixels.

2.1.2. PIXEL ECRAN- PIXEL NUMERIQUE

Il est important de bien dissocier le pixel d'un écran de télévision, qui a une taille physique, et le pixel numérique. Le pixel de l'écran de télévision est déterminé une bonne fois pour toutes lors de sa fabrication alors que le pixel digitale a une taille physique uniquement lorsqu'on la lui donne. Un pixel digitale est simplement une définition mathématique à l'intérieur de l'ordinateur que l'on caractérise en choisissant une taille.

2.1.3. MAILLAGE EN PIXEL NUMERIQUE

Considérons l'image d'une pomme rouge sur fond noire de luminosité et de couleur relativement uniforme. Le plus petit nombre de pixels que l'on peut utiliser est de un et on pourrait donc définir le pixel comme l'image entière. Mais si nous prenons la moyenne de la luminosité et des couleurs pour définir le niveau de gris du pixel, nous n'aurons qu'un seul niveau de gris.

Si nous découpons en quatre parties l'image d'une pomme. La numérisation transformera les couleurs de chaque partie en un niveau de gris qui correspond à la moyenne de la luminosité et des couleurs de chaque partie. Ainsi, puisque nous avons pris une image de luminosité et de couleur homogène, chaque pixel(une partie) aura un niveau de gris sensiblement équivalent.

Plus nous découperons cette image, plus les pixels auront des niveaux de gris différents. En doublant progressivement le nombre de pixel par ligne et par colonne(8*8 , 16*16, 32*32, 64*64, 128*128, 256*256), nous augmenterons la résolution.

Lorsque nous arrivons à une taille de 256*256, soit 65 536 pixels, nous n'arrivons plus à distinguer les pixels digitales des pixels de l'écran vidéo.

Bilan :

Pour une taille donnée d'image, augmenter le nombre de pixel utilisés pour décrire l'image augmente la résolution sur l'écran jusqu'à ce que la résolution de l'écran soit atteinte. Ensuite l'augmentation de ce nombre n'a pas de résultat apparent sur la résolution. Cependant cette augmentation comporte un certain intérêt si nous souhaitons agrandir l'image.

2.2. ECHELLE DE CODAGE ET DE LUMINOSITE.

2.2.1. CODAGE EN BIT DES NIVEAUX DE GRIS

- un BIT :

Un bit est la plus petite donnée qu'un ordinateur peut utiliser. De la même manière qu'une lampe, il ne peut être qu'allumé ou éteint.

Si nous décidons d'utiliser un bit pour décrire notre image, nous pouvons utiliser cet état allumé ou éteint pour représenter le noir ou le blanc sans avoir d'état intermédiaire possible(pas de gris).

- deux BIT :

Si nous utilisons désormais deux bits pour décrire notre image, nous avons désormais quatre états possibles : noir, gris foncé, gris clair, blanc.

- n BIT :

A chaque fois que nous augmenterons de un le nombre de bit, nous doublerons le nombre total de combinaisons que nous utiliserons pour définir le nombre total de niveau de gris.

Une échelle de 0 à 63 sera ainsi codée sur 6 bits.

2.2.2. ECHELLE DE LUMINOSITE MONOCHROMATIQUE :

Chaque pixel peut donc être défini en luminosité par une échelle de gris particulière. En générale, l'intensité lumineuse est codé sur 6 bits, avec une échelle de gris allant de 0 à 63, soit 64 niveaux. Mais rien ne nous empêche d'augmenter ou de diminuer cette échelle. En considérant une grille de 512*512 pixels, on obtient ainsi un nombre d'images différentes possibles de 512*512*64 ; une image numérique peut donc être stockée sur 192 koctets.

2.2.3. ECHELLE DE COULEUR.

En générale, pour exprimer un équivalent digitale d'une image monochrome, on considère une échelle de 256 niveaux codée sur 8 bits.

Ainsi, si nous voulons décrire chacune des couleurs primaires - rouge, vert et bleu -, nous avons besoins de 8*3 bits pour décrire une image photographique réelle. Cela nous

impose donc $256 \times 256 \times 256$ combinaisons possibles, soit 16 777 216 niveaux. On codera donc les images couleurs sur 24 bits.

2.2.4. ACQUISITION DE L'IMAGE PAR UNE CAMERA.

En fonction des caractéristiques de l'image que nous voudrions conserver pour l'analyse (luminosité ou couleur) nous devrions utiliser des caméras qui séparent les couleurs et la luminosité de l'image en nuance de rouge, vert et bleue pour les passer dans l'ordinateur.

Un canal sera donc un signal monochrome qui représentera la valeur de la luminosité de chacune des couleurs primaires (ou de l'ensemble des couleurs). L'ordinateur convertira en retour chaque canal dans la couleur d'origine (ou le canal global de luminosité en une image en niveaux de gris) sur le tube cathodique. Les trois couleurs primaires seront ensuite mélangés par notre cerveau pour donner une image colorée.

3. TRAITEMENT MATHEMATIQUE DE L'IMAGE.

But: transformer l'image pour la traiter et y définir des grandeurs mesurables.

Une étape clé du traitement de l'image est le seuillage c'est à dire le passage de l'image numérique à l'image binaire.

Différents traitements peuvent être réalisés, que ce soit sur l'image numérique ou l'image binaire. Effectués après le seuillage, les traitements binaires sont destinés à définir le plus précisément possible les objets à analyser.

Chronologiquement, les traitements numériques ont été développés ultérieurement afin d'améliorer la qualité de l'image numérique et de seuiller plus facilement.

3.1. LE SEUILLAGE

Une image numérique, pour pouvoir être exploitée a généralement besoin d'être simplifiée, c'est le but du seuillage. Ce dernier consiste à transformer l'image codée sur 6, 8 ou 16 bits, en une image binaire où les pixels à 1 correspondent aux objets et les pixels à 0 au fond de l'image.

A la différence des différents traitements de l'image numérique, le seuillage est un passage obligatoire pour toute analyse morphologique ultérieure. Le seuillage permet de sélectionner les parties de l'image qui intéressent l'opérateur, par exemple 2 types de grains (blancs et sombres) dans un mélange. On peut donc, par exemple, attribuer à tous les pixels de l'image numérique qui ont un niveau de gris compris entre deux valeurs i_1 et i_2 , choisies par l'opérateur, la valeur 1; à tous les autres pixels est attribué la valeur 0.

Après seuillage, les parties de l'image sélectionnées seront traduites en noir et blanc. L'image, digitalisée par l'ordinateur (0 et 1), est appelée image binaire. Cette dernière, tout comme l'image numérique contient des informations superfétatoires, qu'il convient d'éviter, ou masquées qu'il faut révéler. Les traitements suivants permettent de modifier l'image binaire à ces fins.

Il n'est pas en général nécessaire de s'intéresser à tous les paramètres de base relatifs à une image, car seules certaines propriétés sont utiles. L'idée est donc de transformer l'image binaire pour n'accéder qu'aux informations qui nous préoccupent. De plus, le seuillage de l'image peut faire apparaître des défauts dus à l'irrégularité de la surface ou à d'autres causes externes. La morphologie mathématique permet de transformer ces images en « tout ou rien » grâce à des éléments structurants.

3.2. TRAITEMENT MATHÉMATIQUE D'IMAGES BINAIRES.

Le traitement d'une image binaire est réalisé grâce à deux classes de transformations :

3.2.1. LES TRANSFORMATIONS LOGIQUES.

Elles s'effectuent entre deux images binaires ; elles utilisent les opérateurs logiques de l'étude des ensembles : l'intersection, le complémentaire, la différence symétrique. Les ensembles comparés sont dans ce cas, les sous-ensembles de l'image binaire composés des pixels de valeurs 1. La figure suivante illustre différentes opérations possibles : l'intersection (d), la réunion (c), la différence (f) de deux images (a) et (b) ainsi que le complémentaire de l'image (a) conditionnellement à Z (e)

(figure 4.1 p137, annexe 4, thèse de Claudine Jacquet, n° d'ordre 60 CD, Caractérisation géométrique et propriétés de transport de milieux poreux consolidés, 1991)

3.2.2. LES TRANSFORMATIONS MORPHOLOGIQUES.

La morphologie mathématique est une méthode de description de la forme des objets par comparaisons avec des objets de formes connues, les éléments structurants.

Les éléments structurants les plus employés sont les éléments convexes tels que le segment et surtout le disque qui est isotrope.

Concrètement, si le réseau régulier de pixels choisi pour représenter une image binaire est hexagonal, un élément structurant, assimilé dans cet exemple à un disque, sera parfaitement déterminé par les valeurs attribuées (1 ou 0) à son centre et plus proches voisins de ce dernier, répartis selon un hexagone. L'ensemble des plus proches voisins constitue le voisinage du centre.

Ainsi :

$\begin{matrix} 0 & 1 \\ x & 1 & 0 \\ x & x \end{matrix}$	et	$\begin{matrix} 1 & 1 \\ x & 0 & x \\ x & x \end{matrix}$
---	----	---

sont deux exemples d'élément structurant dans lesquels les pixels représentés par x prennent indifféremment la valeur 1 ou 0.

3.2.2.1. *Erosion et Dilatation :*

Ce sont les deux transformations de base de l'analyse d'images.

L'érodé Y d'un ensemble X par un élément structurant B est l'ensemble des points x de X tel que B est tout entier contenu dans X lorsqu'il est centré sur x .

$$Y = E^B(X) = \{x \in X / B_x \subset X\}$$

C'est la transformée en tout ou rien de X par B . La notation B_x signifie que l'élément structurant B est centré sur le pixel x .

De la même façon, on définit le dilaté Z de X par l'élément structurant B comme étant l'ensemble des points x de X tels qu'au moins un des points de B soit en contact avec X , quand il est centré sur x .

$$Z = D^B(X) = \{x \in X \setminus X \cap B_x \neq \emptyset\}$$

(figures 1 p 181 et 2 p 182, annexe 4, thèse de JM. Missian, numéro d'ordre 34 CD, Etude par analyse d'images des milieux granulaires : caractérisation des contacts et de l'homogénéité, 1989)

Quelques propriétés :

- Ces deux opérations ne sont pas idempotentes mais itératives. L'érosion, appliquée un grand nombre de fois, aboutit à la disparition de l'objet.

- L'érosion et la dilatation ne sont pas homotopiques. La dilatation préserve la connexité si l'élément structurant est connexe. L'érosion ne préserve pas la connexité.

- Il est équivalent d'éroder (resp. de dilater) n fois un objet par un élément structurant de taille unité et d'éroder (resp. de dilater) une fois ce même objet par le même élément structurant de taille n . Cette propriété est très intéressante dans la mesure où elle permet de limiter le nombre d'éléments structurants en mémoire.

3.2.2.2. *Théorème du masque de mesure :*

Pour toute transformation en tout ou rien utilisant un élément structurant B , réalisée localement et uniformément sur X connu dans un masque Z , le résultat de la transformation n'est connu sans biais que dans le masque Z' , érodé de Z par B .

Ce théorème est important dans la mesure où il délimite clairement le bord de l'image non utilisable après une transformation.

3.2.2.3. *Ouverture et Fermeture.*

On réalise une ouverture de X par un élément structurant B en effectuant une érosion par B suivie par une dilatation par le transposé B^t de B (ie le symétrique de B par rapport à son centre)

$$O^B(X) = D^{B^t}(E^B(X))$$

La figure suivante représente l'ouverture d'un objet par un disque et par un segment.

(figure 3 p 183, annexe 4, thèse de JM. Missian, numéro d'ordre 34 CD, Etude par analyse d'images des milieux granulaires : caractérisation des contacts et de l'homogénéité, 1989)

L'ouverture joue le rôle d'un filtrage sur l'image binaire. $O^B(X)$ est plus régulier et moins riche en détails que X. Elle adoucit les contours, coupe les isthmes étroits, supprime les petites îles et les caps étroits

On réalise une fermeture de X par un élément structurant B en effectuant une dilatation par B suivie par une érosion par le transposé B^t de B
 $F^B(X) = E^{B^t}(D^B(X))$

La figure suivante représente la fermeture d'un ensemble d'objets par un disque.

(figure 4 p 184, annexe 4, thèse de JM. Missian, numéro d'ordre 34 CD, Etude par analyse d'images des milieux granulaires : caractérisation des contacts et de l'homogénéité, 1989)

La fermeture a également un effet de lissage sur l'image binaire : elle bouche les canaux étroits, supprime les petits lacs et les golfs étroits. Dans tous les cas on a $F^B(X) \supset X$.

Ces deux transformations sont duales l'une de l'autre, on peut montrer que :

$$F^B(X) = (O^{B^t}(X^C))^C$$

Elles sont non homotopiques et idempotentes

3.2.2.4. Transformation de voisinage

Considérons un élément structurant B réunion de deux ensembles disjoints B^0 et B^1 . En représentation digitale, on utilisera généralement des éléments structurants inclus dans l'hexagone de taille 1. On attribuera aux pixels de B^0 la valeur 0 et à ceux de B^1 la valeur 1.

La transformée de voisinage de l'image X par B, noté $X \otimes B$, est l'ensemble défini par :

$$X \otimes B = \{ x \in X / B_x^1 \subset X, B_x^0 \subset X^C \}$$

En analyse digitale cela revient à ne retenir de X que les points qui ont la configuration de voisinage définie par l'élément structurant B. Les différentes configurations de voisinages peuvent être regroupées par familles définies par une lettre et regroupées dans l'alphabet de Goley.

(figure p 58, cours de G. Thomas, L'analyse d'images, ENSMSE)

Les transformations de voisinage sont très générales et ne possèdent pas de propriétés particulières. Il y a 2^7 configurations possibles pour un réseau hexagonal.

3.2.2.5. *Amincissement et Epaissement*

Les transformations de voisinage permettent de définir des transformations plus complexes, l'amincissement et l'épaississement.

L'amincissement d'un ensemble X consiste à lui enlever des points correspondants à une configuration donnée, B , tandis que l'épaississement consiste à rajouter à X les points de X^C qui ont la configuration définie par Bt .

Amincissement : $X \ominus B = X \setminus (X \otimes B)$

Epaissement : $X \oplus B = X \cup (X^C \otimes Bt)$

Quelques opérations classiques réalisées par amincissement :

(table 1 p 185, annexe 4, thèse de JM. Missian, numéro d'ordre 34 CD, Etude par analyse d'images des milieux granulaires : caractérisation des contacts et de l'homogénéité, 1989)

L'amincissement par l'élément structurant L ou M a la propriété d'être homotopique, c'est-à-dire qu'il conserve le nombre de connexité de l'image.

Si on amincit un grand nombre de fois un objet de connexité 1 par la famille d'éléments structurants L_6 ou M_6 (constituée par les 6 rotations de $k\pi/6$, k variant de 0 à 5, des éléments L ou M) on tend vers un ensemble limite constitué de ligne d'épaisseur 1 pixel.

Cet ensemble a les propriétés d'un squelette, lieu des points équidistants des frontières. On le note $Sq(X)$.

Ex de squelette :

(figure 5 p 186, annexe 4, thèse de JM. Missian, numéro d'ordre 34 CD, Etude par analyse d'images des milieux granulaires : caractérisation des contacts et de l'homogénéité, 1989)

Un squelette particulier, aux propriétés intéressantes : le SKIZ

L'ouverture possède une opération duale, la fermeture. Le squelette possède en quelque sorte une transformation complémentaire le SKIZ. Considérons une image d'un ensemble X défini dans R^2 et constituée de particules individuelles.

Le squelette par zone d'influence est le squelette du complémentaire X^C de X par la famille L_6 , dont on a éliminé les « branches mortes » par ébarbulage. On le note $Sz(X)$. Ce squelette partage l'espace en autant de parties qu'il y a de particules dans X . De plus, c'est un sous ensemble du squelette du complémentaire X^C : $Sz(X) \subset Sq(X^C)$

(figure p 55, cours de G. Thomas, L'analyse d'images, ENSMSE)

3.2.2.6. *Transformation Géodésique*

Une transformation est dite géodésique selon un ensemble X_0 si elle est réalisée exclusivement dans l'espace que cet ensemble. Les transformations que nous avons considérées jusqu'à présent étaient géodésiques selon l'ensemble X tout entier.

On se référera à Coster et Chermant (1985 page 194) pour de plus amples informations concernant ces transformations. Entres autres on peut noter comme applications intéressantes :

- la segmentation d'un agrégat d'objets par la méthode des bassins versants

(figure 8a, page 189, annexe 4, thèse de JM. Missian, numéro d'ordre 34 CD, Etude par analyse d'images des milieux granulaires : caractérisation des contacts et de l'homogénéité, 1989)

- la détermination du centre géodésique d'un objet X qui permet de marquer chaque objet par un point.

(figure 8b, page 189, annexe 4, thèse de JM. Missian, numéro d'ordre 34 CD, Etude par analyse d'images des milieux granulaires : caractérisation des contacts et de l'homogénéité, 1989)

3.3. TRAITEMENT MATHÉMATIQUE D'IMAGES NUMÉRIQUES.

La fonction essentielle des traitements numériques est d'améliorer le contraste entre les zones de l'image à conserver après seuillage, et celles que l'opérateur juge inutiles. Ils ont un rôle de filtrage.

Deux grandes classes de filtres peuvent être envisagées : les filtres linéaires et les filtres morphologiques.

Dans chacune de ces classes, on peut considérer deux types de filtres ayant des fonctions opposées :

- les filtres passe-bas ont un rôle de lissage du signal : ils adoucissent les variations brutales d'intensité. Comme ils éliminent simplement le bruit, ils modifient assez peu l'image et gardent généralement intacte l'intensité moyenne de l'image.

- les filtres passe-haut ont pour but de rehausser les frontières : ils mettent en valeur les points isolés ou les limites des objets, alors que les autres points sont mis à 0 (en noir). Ceci permet d'accentuer les contrastes, les reliefs et tend à supprimer le flou de l'image.

Dans ce paragraphe l'image est représentée dans une trame de l lignes et c colonnes. Pour une ligne donnée, on définit une fonction d'intensité lumineuse $f(x)$ dite fonction de niveau de gris. Elle peut prendre m valeurs entre 0 et $m-1$ (généralement $m=64$).

3.4. LES FILTRES LINEAIRES.

Ils ont pour origine les méthodes de traitement du signal. On y trouve notamment :

- le filtrage par transformée de Fourier
- le filtrage par produit de convolution

3.5. LES FILTRES MORPHOLOGIQUES.

3.5.1. FILTRES PASSE-BAS.

Serra (1982) définit une série de transformations morphologiques appliquées non plus à un ensemble mais à une fonction : la fonction de niveau de gris $f(x)$.

- érosion : On érode l'ensemble X des points sous la courbe $f(x)$ par un élément structurant plan B de taille p centré en x . On obtient une nouvelle fonction $f_E(x) = E^B f(x) = \inf \{f(u) / u \in B_x\}$

- dilatation : $D^B f(x) = \sup \{f(u) / u \in B_x\}$

- ouverture : $O^B f(x) = D^{B^t} E^B f(x)$

- fermeture : $F^B f(x) = E^{B^t} D^B f(x)$

L'ouverture et la fermeture sont des filtres passe-bas, c'est à dire des filtres éliminant les variations fortes (en + ou en -) du signal. Ils gardent à peu près constante l'intensité de l'image.

3.5.2. FILTRES PASSE-HAUT.

Dans le cadre de la morphologie mathématique, ils sont notamment représentés par le gradient morphologique et par « le chapeau haut de forme ». On a alors une perte à peu près totale d'intensité.

- le gradient : il permet de ne retenir de l'image traitée que les zones de contraste élevé, c'est à dire où l'intensité lumineuse (donc le niveau de gris) passe, de façon brutale (sur un domaine restreint), d'une valeur élevée à une valeur faible (ou vice et versa). L'opération est définie ainsi : $g(x) = [D^B f(x) - E^B f(x)]/2$

(figure p 19, cours de G. Thomas, L'analyse d'images, ENSM.SE)

- le chapeau haut de forme de hauteur h , d'épaisseur q : il permet de sélectionner sur l'image traitée, uniquement les zones très lumineuses (ou très sombres). Q désigne le pas d'ouverture associé à l'élément structurant B (pour $q = 4$, $B = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$). La transformation fait l'image I avec une fonction d'intensité $f(x)$ à une image R par la succession suivante :

- ouverture de pas q sur l'image I donnant une fonction d'intensité $f_0(x)$.

- calcul de $g(x) = f(x) - f_0(x) - h$ en chaque point. Si g est négatif, on prend $g = 0$. Le fait de retrancher h permet d'effectuer un seuillage simultané, mais certains analyseurs ne font pas cette opération de seuillage supplémentaire, ce qui revient alors à prendre $h = 0$.

- R est l'image de fonction d'intensité $g(x)$

3.5.3. *TRANSFORMATIONS DE VOISINAGE.*

On peut tout à fait étendre les notions d'amincissement et d'épaississement des images binaires aux images numériques. Il est alors possible d'aller jusqu'au squelette par amincissements successifs.

Il est également possible de segmenter les objets d'une image grâce à « la ligne de partage des eaux » qui s'obtient par itération d'amincissements jusqu'à idempotence.



4. TRAITEMENT DE L'IMAGE BINAIRE

L'image obtenue après seuillage est donc appelée **image binaire** (les pixels ont tous un état 0 ou 1).

Les traitements de l'image binaire ont plusieurs buts :

- filtrage (passe haut ou passe bas)
- segmentation,
- simplification morphologique.

4.1. FILTRAGE

En poursuivant le traitement de filtrage, on peut éliminer le bruit si l'image n'a pas été filtrée avant seuillage ou supprimer les derniers artefacts qui n'ont pu disparaître lors du filtrage en niveaux de gris. Toutes les méthodes décrites lors du traitement des images numériques peuvent être utilisées, mais c'est dans ce domaine que la morphologie mathématique se révèle la plus efficace.

4.2. SEGMENTATION

La segmentation d'une image binaire a la même finalité que le seuillage; d'ailleurs, certains auteurs classent le seuillage parmi les méthodes de segmentation. Elle consiste à séparer l'image en plusieurs zones. La segmentation la plus simple consiste à séparer les particules convexes apparues comme connexes à la suite des opérations précédentes. On peut utiliser la morphologie mathématique. La segmentation fait appel à la notion de connexité. Cette notion, évidente dans le cas ensembliste ou binaire, a été envisagée dans le cas des images en niveaux de gris (segmentation par la ligne de partage des eaux).

4.3. SIMPLIFICATION MORPHOLOGIQUE

Pour étudier la morphologie des objets à analyser, on est souvent conduit à simplifier encore plus l'image. Cette simplification peut être faite par des ouvertures ou fermetures morphologiques qui lissent le contour des objets et permettent ainsi de mettre en évidence, par exemple, les protubérances ou les cavités.

La simplification extrême est le squelette.

5. MESURES

INSERER LES IMAGES EN FACE DE CHAQUE PARAGRAPHE CORRESPONDANT DU POLY d'analyse d'images par Catherine Souchier (docteur 3eme cycle Biologie appliquée).

Les mesures de segmentation ont permis d'isoler dans l'image les objets à quantifier ou à reconnaître. Les mesures possibles sont très nombreuses et dépendent du problème posé. Les objectifs doivent être bien définis, au préalable, pour limiter le plus possible l'acquisition et la rendre efficace.

5.1. FENETRE DE MESURE

Le champ de mesures ne correspond pas obligatoirement à l'image toute entière. L'utilisateur décide de sa forme, de sa taille et de sa position dans l'image. Il peut programmer son déplacement, de même que celui d'une platine porte échantillon et d'un système de focalisation automatique. Il peut analyser une image par secteurs, ou au contraire un ensemble d'images et faire par exemple un examen exhaustif d'une lame.

5.2. DENOMBREMENT

Les possibilités de comptage sont utilisées pour contrôler le nombre de mesures effectuées ou comme données dans les évaluations d'effectifs totaux ou de densités numériques : nombres par unité de surface ou de volume. Des règles sont établies pour les objets frontières. Par exemple on ne prend en compte que les objets complètement à l'intérieur de la fenêtre et ceux qui coupent la fenêtre de mesure en haut et à gauche. Dans une étude exhaustive tous les objets convexes seront comptés une fois et une seule fois.

Le nombre évalué sur coupe est une mesure relative et n'est pas directement transposable à un nombre par unité de volume, sauf si une structure peut être reconnue par un marqueur spécifique suffisamment gros pour être bien visible, mais suffisamment petit pour n'apparaître que sur une seule coupe. Toute autre évaluation nécessite soit l'estimation de la taille des objets et une hypothèse sur leur forme soit mieux : la mise en parallèle de plusieurs coupes sériées.

5.3. PARAMETRES DE TAILLE.

5.3.1. IMPORTANCE RELATIVE.

Un rapport de surfaces (surface d'une phase / surface de référence = densité de surface) permet d'évaluer l'importance d'un composant. Evaluée sur coupe, la densité de surface, dans les cas d'anisotropie, est égale à la densité volumique (théorème de Delesse).

5.3.2. GRANULOMETRIE EN NOMBRE.

La distribution de la taille des images de particules peut être évaluée par une mesure de surface ou par une longueur (diamètre du cercle de même surface, diamètre de Ferêt). La

distribution de la taille volumique des particules nécessite une étude de l'ensemble des coupes sériées (volume de Cavalieri) ou une hypothèse sur leur forme.

5.3.3. GRANULOMETRIE EN MESURE.

La distribution des tailles peut être exprimée en n'attachant pas la même importance à toutes les particules, mais en leur affectant un poids fonction de leur taille. On peut donner une évaluation sans biais du volume moyen pondéré par le volume, par une mesure d'intercept. Cette mesure est cependant difficile à automatiser. On peut évaluer une granulométrie en mesure par une mesure de surface effectuée à plusieurs pas d'ouverture (cercles de taille croissante). Ce type de granulométrie présente l'intérêt de pouvoir s'appliquer même sur des ensembles interconnectés, sans avoir recours, comme pour une granulométrie en nombre, à des algorithmes de séparation automatique qui sont quelquefois difficiles ou même impossibles à mettre en place. Une étude récente montre l'intérêt d'une série d'ouvertures numériques sur l'image de gris comme mesure granulométrique.

5.3.4. QUELQUES PARAMETRES INTERESSANTS.

- **La compacité** (= nombre de points noirs/ nombre total de points = $L / L_{totale} = S / S_{totale} = V / V_{total} = 1 - (\text{porosité}) = 1 - \sigma$)
- **NL** = (nb de « pixels » de sortie de l'objet lors du parcours horizontal des pixels)/(nb de lignes) car ce paramètre permet d'obtenir la surface spécifique donnée par :
 $S / V = (4/\pi) * NL$

5.4. PARAMETRES DE FORME.

Les différentes variables accessibles dans un analyseur d'images, associées à toutes les transformations d'images possibles, permettent de rendre compte de beaucoup de formes. L'indice de circularité (ou rondeur) est défini par le rapport du périmètre au carré à la surface multipliée en général par la constante $4 * \pi$. Dans le cas d'un rond, le paramètre de rondeur est minimal et est égal à 1. Le paramètre de rondeur est très rapide d'acquisition. Il est cependant peu adapté comme paramètre d'élongation, en cas d'invaginations ou de trous. Dans ces cas, le paramètre d'élongation: rapport du diamètre de Férêt maximal au diamètre de Férêt minimal, convient bien, malgré un temps de mesure plus long. Le diamètre de Férêt se définit comme la distance séparant les deux tangentes parallèles à une direction donnée et qui encadrent la particule.

D'autres paramètres de forme peuvent être définis, par exemple:

- le rapport de la projection sur le diamètre de Férêt,
- le rapport du périmètre sur le périmètre convexe,
- le rapport de la surface du plus grand cercle circonscrit à la surface du plus petit cercle inclus,
- le rapport de surfaces avant et après ouverture,
- le rapport de la longueur du squelette à la longueur euclidienne entre les points extrêmes.

Ces derniers exemples montrent l'intérêt des transformations comme paramètres de mesure et non plus seulement pour sélectionner des zones. La réciproque est aussi vraie. Le paramètre de rondeur est souvent utilisé pour identifier les objets isolés qui seront ensuite analysés.

D'autres approches morphologiques sont aussi employées comme la décomposition d'un contour en un ensemble de segments: droit, convexe, concave, etc., et l'analyse syntaxique de cette suite, ou l'utilisation de la transformée de Fourier.

5.5. PARAMETRES D'INTENSITE.

La valeur associée à chaque point de l'image rend compte du niveau de gris de l'image en ce point. L'échelle des valeurs peut être calibrée en transmission, en densité optique ou selon n'importe quelle gamme étalon.

Le paramètre densitométrique le plus utilisé est la densité totale intégrée, somme des densités de tous les points correspondant à la phase ou à l'élément étudié. Il est proportionnel à la quantité de substance colorée de façon stoechiométrique (loi de Lambert-Beer). On peut en déduire la densité moyenne.

Lors d'une acquisition couleur, les valeurs numériques dans les trois plans (rouge, vert, bleu) sont représentatives de la couleur de l'image en ce point. Des transformations permettent de donner les valeurs de teinte, de saturation ou de luminescence.

5.6. PARAMETRES DE TEXTURE

La texture se définit comme l'étude de la distribution des différents niveaux de gris, à l'intérieur d'une structure. Un premier groupe de méthodes consiste à étudier la distribution des différents niveaux de gris présents dans la structure, sans tenir compte de leur situation topographique. L'information est résumée par des variables comme le coefficient de variation, de dissymétrie ou d'aplatissement, ou l'importance des points les plus noirs ou les plus blancs.

Ces mesures peuvent être effectuées dans différentes parties de la structure. Par exemple du centre à la périphérie pour une mesure d'excentricité. De même, l'étude des points les plus blancs ou les plus noirs peut se compléter par l'analyse des images de ces points extrêmes: évaluation de l'importance des points en mottes ou de l'excentricité par exemple. La comparaison entre un point et ses voisins a donné naissance à d'autres développements. Les matrices de co-occurrence où les matrices de longueurs de sections en sont des exemples.

Dans le premier cas. les variables sont obtenues à partir du dénombrement des couples de points de niveaux de gris (i. j), les niveaux de gris étant regroupés en classes de niveaux de gris. Dans la méthode de longueurs de sections, les variables sont obtenues à partir de la longueur des suites de points de même classe de niveau de gris i. D'autres approches existent. Des transformations numériques peuvent souligner certains aspects de la texture, et servir de base à la quantification de la texture.

5.7. PARAMETRES DE REPARTITION SPATIALE.

Un point est repéré par ses coordonnées dans un système donné. Le repérage d'un élément se fait par rapport à un ou plusieurs points bien précis comme le centre de gravité ou le centre du plus petit carré qui entoure la panicule. Il peut se définir par rapport à sa position dans l'image ou dans un réseau, sur une lame de microscope par exemple. Les rapports de contiguïté ou d'éloignement entre particules se déduisent de ces paramètres de position (dénombrement dans des quadrats évaluation de distances) ou à partir de transformations d'images par des éléments structurants comme le doublet de points (covariogrammes). La construction des graphes de voisinage permet d'étudier les relations entre panicules de

différents types. Les orientations préférentielles sont mises en évidence à partir des coordonnées des points, des mesures de longueurs (rose de direction) ou des transformations d'images selon plusieurs directions.

6.

Techniques instrumentales



STEREOLOGIE

L'un des problèmes majeurs posés en analyse d'images est que l'on ne peut effectuer des mesures de paramètres que sur des coupes de l'échantillon. L'analyse d'image ne permet d'accéder qu'à des paramètres en 2 dimensions alors que l'on s'intéresse souvent à des paramètres en trois dimensions. En effet, en granulométrie par exemple, l'image de la coupe ne permet d'accéder qu'à des paramètres concernant la coupe en particulier et il n'est pas évident de remonter à des paramètres de l'échantillon entier sans admettre certaines conditions d'homogénéité de l'échantillon.

6.1. NOTATIONS

Les règles internationales de codification des paramètres stéréologiques sont les suivantes : Le paramètre que l'on mesure est noté d'une lettre majuscule suivi d'une minuscule indiquant l'espace de référence dans lequel il a été évalué. La parenthèse qui suit indique premièrement le nom de ce que l'on a mesuré suivi du nom de l'espace de référence.

Exemple :

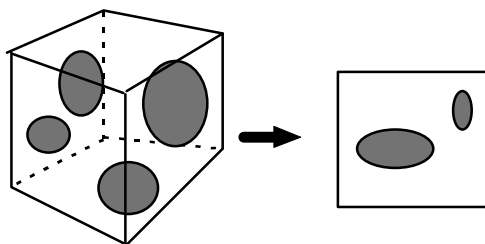
$$V_V(\text{noyau, cytoplasme}) = \frac{\text{Volume du noyau}}{\text{Volume du cytoplasme}}$$

Les lettres utilisées sont :

V	Volume
A	Surface de section
B	Périmètre
S	Surface d'enveloppe
N	Nombre
L	Longueur
P	Nombre de points
I	Nombre d'intersections

Les plus usités sont la fraction volumique V_V , la surface de section relative A_A , la densité de surface d'enveloppe S_V et le périmètre par unité de surface de section B_A .

Exemple :



La fraction volumique V_V est égale dans l'échantillon de départ au rapport des volumes des particules sur le volume total, tandis que dans la coupe que l'on fait, la surface de section relative A_A est égale au rapport des surfaces des coupes de grains sur la surface de la coupe.

6.2. RELATIONS FONDAMENTALES

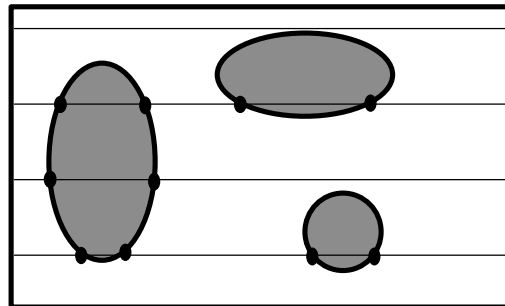
Afin de pouvoir remonter des paramètres issus de la coupe comme A_A et B_A à ceux concernant l'échantillon complet comme V_V et S_V , il existe des relations entre ces différents paramètres.

La première, découverte par le mathématicien italien Cavalieri, énonce que la fraction volumique est égale au rapport des surfaces de coupe. Ainsi,

$$V_V = A_A$$

C'est une relation très utilisée en granulométrie puisqu'elle permet d'évaluer le volume des grains. Par un comptage du nombre de ces grains, on peut ensuite remonter à leur volume moyen.

De même il est possible d'établir une relation entre B_A et S_V . Le principe de la mesure de B_A a été énoncé par Buffon. Au XVIII^e siècle. Il est le suivant : On dépose un trame de lignes sur l'image et on compte le nombre d'intersections de ces lignes avec les enveloppes.



Soit I le nombre d'intersections, L_T la longueur totale des lignes déposées sur l'image, alors

$$B_A = \frac{\pi}{2} \times \frac{I}{L_T}$$

Or, on a par ailleurs $I/L_T = S_V$.

Donc

$$B_A = \pi/4 * S_V$$

Cette mesure nécessite cependant quelques précautions. En effet, si la répartition des particules n'est pas isotrope dans l'échantillon, il est nécessaire d'apporter une correction à la mesure. Suivant la coupe effectuée, on peut obtenir des valeurs différentes de B_A dépendant de l'angle entre la coupe et l'axe principal des particules. Un facteur de correction a été proposé en 1881 :

$$B_A = k(q) * S_V \quad \text{avec} \quad k(q) = \sqrt{(1 + \cos^2 q)/2}$$

q étant l'angle entre l'axe principal des particules et la direction perpendiculaire à la surface de section.

Il existe d'autres méthodes permettant une correction, notamment en effectuant plusieurs coupes de directions différentes et permettant de compenser l'anisotropie.

6.3. CAS D'UNE REPARTITION DE PARTICULES DE TAILLES DIFFERENTES.

Le problème qui se pose est le suivant : Lorsque l'on a un milieu composé de particules qui ont toutes le même diamètre, la coupe présentera elle des cercles de diamètre différents. Il en va bien sûr de même si l'on a une poudre composée de particules hétérogènes. Comment alors remonter de la distribution des diamètres des cercles sur la coupe à la distribution des diamètres des grains ?.

La réponse la plus simple est possible dans le cas d'une distribution uniforme en diamètre des grains : il suffit de repérer le diamètre le plus grand sur la coupe. C'est le diamètre des grains. La réponse est moins évidente dans le cas d'une distribution hétérogène.

La méthode itérative :

On peut théoriquement représenter pour une distribution uniforme de grains, la distribution des diamètres des cercles obtenus.

SCHEMA A SCANNER p.27

Microscopie quantitative : stéréologiePierre CAU INSERM 1990.

La méthode itérative consiste à partir de la distribution des diamètres 2D. On prend le diamètre plus grand : ces cercles proviennent des grains les plus gros. On peut donc déterminer la quantité de ces grains de plus grande taille. On enlève de la distribution 3D obtenue la contribution de ces grains les plus gros et on recommence la méthode à partir de la nouvelle distribution 3D obtenue.

SCHEMA P.30 Microscopie quantitative : stéréologie.....Pierre CAU
INSERM 1990

Il existe d'autres méthodes plus récentes et plus aisées de détermination des diamètres moyens comme celle de 1961 proposée par deux métallurgistes américains de Hoff et Rhines :

$$N_V = N_A / d_{3D}^3$$

N_A est la densité de grains par unité de surface de coupe.

N_V est la densité de grains par unité de volume de l'échantillon.

d_{3D} est le diamètre moyen des grains.

D'autres méthodes encore plus récentes qui prennent les noms de « selector », « fractionnator », ou encore « disector » permettent des analyses plus fines et non biaisées.

7. APPLICATIONS

7.1. APPLICATION A LA GRANULOMETRIE

L'image issue de l'observation microscopique d'un échantillon peut ensuite être analysée de façon à en déterminer ses principales caractéristiques et propriétés.

Principales caractéristiques :

Chaque type d'élément présente une couleur différente sur l'image numérique. Le seuillage précédant l'obtention de l'image binaire permet d'isoler une catégorie de constituants dans l'échantillon. Le traitement de l'image binaire pourra ensuite permettre de déterminer différents paramètres :

- proportion en nombre et en volume (correspondant à la compacité), i.e. importance d'un constituant dans un échantillon,
- taille des grains de ces constituants,
- répartition spatiale (répartition uniforme dans l'espace, présence d'agrégats...).

En effectuant de la sorte plusieurs seuillage différents, il est possible de déduire la constitution globale d'un échantillon. Cela nécessite toutefois d'être capable d'établir une correspondance entre un niveau de gris (ou de couleur) et un type de constituant donné.

On pourra en outre détecter des défauts concernant la structure d'un matériau. En effet, il est possible d'éliminer par seuillage tous les constituants normalement présents dans l'échantillon étudié. Il apparaît alors sur l'image binaire des tâches correspondant aux grains d'impureté ou du moins à des constituants dont on n'avait pas prévu la présence. L'analyse binaire ne permettra pas forcément d'en déterminer la nature. C'est ici essentiellement une méthode de détection.

Enfin, l'analyse d'image et le traitement binaire de l'image peuvent permettre de déterminer la structure cristalline d'un matériau. Le calcul des paramètres de compacité et de porosité, ainsi que l'étude de la répartition des composants de l'échantillon et des orientations préférentielles (rose des directions), sont des outils permettant de déduire sa structure

Principales propriétés :

De nombreuses propriétés sont essentielles pour définir le domaine d'utilisation d'un matériau, et l'analyse d'image permet de les déterminer.

- **Connexité** : ce paramètre intervient dans les phénomènes de transfert. L'observation des tâches de l'image binaire seuillée permet d'étudier la possibilité d'un transfert d'un grain à un autre, et donc d'une extrémité de l'échantillon à une autre (par exemple : chaleur, champ électrique...).
- **Surface spécifique** : comme il a été précisé auparavant, il est possible de déterminer la surface spécifique (d'une poudre par exemple) à partir du calcul du rapport $N_L = (\text{nombre de pixels de sortie}) / (\text{longueur totale parcourue})$. Cette propriété est essentielle, par exemple dans le domaine de la catalyse, la surface spécifique correspondant alors à la

surface de réaction disponible. D'autre part, ce facteur est aussi déterminant dans des phénomènes de transfert entre différentes phases. La surface d'échange correspond dans ce cas à la surface spécifique.

- **Compacité et porosité** : ce paramètre va influencer sur le comportement mécanique du matériau étudié. En effet l'observation de défauts (lacunes...) permet de prévoir la propagation de fissures et la fragilité du matériau.

Notons l'importance du seuillage pour réaliser une analyse granulométrique. Le choix du seuillage se fait en fonction de ce que l'on désire observer et va influencer sur la qualité de l'étude ultérieure de façon décisive. Cela représente donc l'étape la plus délicate de l'analyse.

7.2. APPLICATION A DES IMAGES SATELLITAIRE DU GLOBE TERRESTRE

7.2.1. GENERALITES

L'analyse se fera de la même, façon que pour la granulométrie sur la base de photos aériennes ou prises par satellite. L'analyse se fera ainsi en deux étapes :

- Identification des couleurs et seuillage
- Mesures (surtout : surface, forme et répartition).

EX : Forêts,
zones de pollution,
cartographie,
ressources terrestre,
prévision de récoltes,
météorologie...

7.2.2. ETUDE DE LA REPARTITION DE LA VEGETATION SUR UNE PHOTO AERIENNE

IMAGE

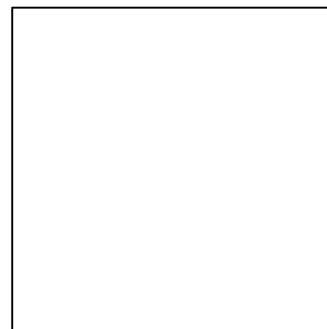
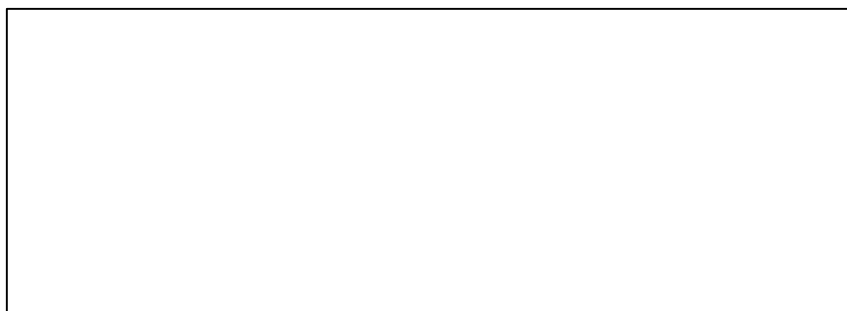
Voir disquette supplementaire bene.jpg

Etant donnée une photographie ci-dessus qui représente une photo aérienne discrétisée en deux niveaux (image binaire : le noir étant la végétation), il peut être intéressant de déterminer les paramètres suivants :

- 1/ Un zonage de 3 classes établies sur le pourcentage de surface de tâches noires par rapport au fond transparent (**densité de répartition**) : ($< x \%$, $> y\%$ et compris entre x et y %)

Il est ici nécessaire pour effectuer ce zonage plus commodément de partager la photo en plusieurs rectangles.

Par exemple, pour la photo précédente, on obtiendrait :



2/ La Granulométrie des taches en trois ou quatre classes également ($> a$, $< b$, compris entre a et b).

3/ Le dénombrement des tâches d'une certaine dimension dans une classe de pourcentages de surface par exemple :

pour les zones comprises entre x et y % de couverture, il y a n taches de dimension $> a$,

q taches de dimension $< b$,

p taches de dimension comprise entre a et b .

4/ Pour une classe de dimension déterminée, la distance entre les points, par exemple :

pour une classe de tache $> b$ distinguer les zones dont la distance entre les taches est $< u$ des zones dont la distance est $> v$ et des zones dont la distance est comprise entre u et v .

7.3. APPLICATION A L'ANALYSE MEDICALE

En médecine, l'analyse d'image est un outil performant pour la recherche et l'aide au diagnostic.

Elle permet d'acquérir des données objectives, précises, reproductibles sur l'importance des composants tissulaires, la manière dont ils sont organisés au sein du tissu, la morphologie des cellules (taille, forme, couleur), la quantité d'acide désoxyribonucléique (ADN) nucléaire, l'intensité d'un marquage et sa répartition.

L'un des buts recherchés est de rechercher des critères précis qui vont permettre l'identification des divers groupes cliniques.

Les données descriptives acquises par cette analyse sont alors traduites quantitativement pour pouvoir classer avec le plus de précision possible les cas intermédiaires.

Une des applications est le dépistage automatique des cancers du col de l'utérus. Les prélèvements suspects sont repérés pour un examen approfondi par le biologiste qui disposera pour l'aider des données de l'analyseur.

L'analyse d'image est aussi utilisée pour rechercher de nouvelles variables qui vont permettre de prévoir ou de diagnostiquer des maladies ou comme outil de connaissance. Une autre application importante de l'analyse d'image est l'estimation du contenu en ADN nucléaire, cette donnée n'est pas accessible visuellement. Il a été ainsi démontré une relation entre l'importance de la prolifération des cellules néoplastiques et la ploïdie dans plusieurs types de cancers.

Nous allons voir maintenant une application majeure de l'analyse d'image: l'observation de la structure et de l'activité du cerveau en examinant les principaux outils qui permettent d'observer.

7.3.1. LE SCANNER X

Le scanner X utilise les rayons X pour visualiser un organe en coupes, cette technique s'appuie comme la radiographie classique sur l'absorption plus ou moins importante des rayons X selon le milieu traversé.

Elle permet de visualiser l'objet par tranches successives de quelques millimètres d'épaisseur chacune alors qu'une radiographie ordinaire n'offre qu'une vue en projection du volume.

La section examinée est balayée avec un faisceau étroit de rayons X et on enregistre pour chaque position du faisceau l'intensité transmise. Pour recueillir le maximum d'informations possible, la balayage se fait plusieurs fois sous des angles différents. Les données enregistrées sont ensuite traitées par ordinateur pour reconstituer l'image X de la tranche explorée. La répétition de l'opération sur plusieurs coupes successives de l'organe permet de construire une image tridimensionnelle.

Le scanner X est souvent utilisé en médecine pour diagnostiquer des tumeurs, des lésions, des fractures. En effet, la résolution spatiale est très bonne de l'ordre du millimètre et la scanographie d'une tranche ne prend que quelques secondes voire moins.

La tomographie par émission de positrons

La tomographie par émission de photons consiste à utiliser des éléments radioactifs qui se transforment en émettant un positron. Elle permet ainsi de cartographier une substance injectée dans le corps et marquée à l'aide de ces noyaux atomiques instables.

On utilise pour cela des détecteurs gamma qui sont disposées en couronne autour de l'organe exploré. Ces couronnes forment un cylindre, on parle alors de "caméra à positrons" qui comporte aujourd'hui plusieurs dizaines de milliers de détecteurs gamma individuels. Chacun de ces détecteurs est constitué d'un matériau scintillateur qui émet de la lumière visible lorsqu'il reçoit un photon gamma, et d'un tube photomultiplicateur qui amplifie le signal.

La résolution des images obtenues en TEP atteint près de 4 millimètres. L'enregistrement d'une image dure 1 à 2 minutes lorsque le traceur est l'oxygène 15. Les grandeurs physiques observées sont par exemple le débit sanguin.

Il existe aussi la tomographie par émission de simples photons qui fait appel aussi à des traceurs radioactifs. La différence est que les noyaux radioactifs mis en jeu se désintègrent en émettant un seul photon contrairement à la TEP où les photons sont émis par paire.

7.3.2. L'IMAGERIE PAR RESONANCE MAGNETIQUE NUCLEAIRE

Cette technique permet d'obtenir des images tridimensionnelles en exploitant les propriétés magnétiques de certains noyaux atomiques (c'est le phénomène de résonance magnétique nucléaire)

Pour obtenir une image, on applique un champs magnétique variable dans l'espace de sorte que la valeur de la fréquence de résonance change d'un point à l'autre de l'objet étudié. Avec une onde de fréquence fixe, seule une région sera donc à résonance et fournira un signal. En décalant le champs magnétique, une région différente se retrouve en situation de résonance et on sonde alors une autre zone de l'objet.

Un traitement par ordinateur permet de faire la synthèse de tous les signaux recueillis et de construire une image tridimensionnelle.

La RMN est appliqué aux noyaux d'hydrogène dans le domaine médicale qui sont nombreux dans l'eau et les graisses de tissus biologiques. On visualise ainsi la structure anatomique.

Avec le développement de techniques ultrarapides d'acquisition et de traitement des données, on peut maintenant réaliser des images RMN en des temps suffisamment brefs pour suivre certains aspects du métabolisme. En imagerie cérébrale, on applique la résonance magnétique à l'hémoglobine.

7.4. APPLICATION AU CONTROLE DE QUALITE

Une évaluation quantitative par analyse d'image permet de comparer un échantillon avec des normes. Les applications au contrôle de qualité sont nombreuses. On va pouvoir contrôler la qualité du lait cru par numération bactérienne, l'aptitude à la mise en forme d'alliages d'aluminium. De même, on peut évaluer les inclusions non métalliques dans un acier ou la composition de prélèvements de houille.

8. MATERIEL D'ANALYSE D'IMAGE QUE L'ON PEUT TROUVER SUR LE MARCHÉ :

8.1. INTRODUCTION

Deux sociétés principales se partagent le marché du matériel destiné à l'étude d'images : IMASYS et LEICA.

Elles proposent une offre complète de produits de haute technologie intervenant à tous les stades de la chaîne de l'imagerie numérique :

- Acquisition
- Numérisation
- Traitement d'images
- Analyse d'images
- Visualisation
- Stockage
- Impression
- Transmission

La totalité de ces outils composant cette gamme se retrouve au sein de la chaîne globale du traitement et de l'analyse d'images (cf schémas joint).

8.2. L'ANALYSEUR LEICA

Concernant l'analyse d'image proprement dite, LEICA a mis sur le marché dernièrement « l'Analyseur d'Image LEICA Q Win Premium » :

Ce système traite et analyse des images obtenues à l'aide d'une camera TV haute résolution.

Il est constitué des composants suivants :

- Une carte d'acquisition haute résolution, version étendue à la Numérisation d'images sur la base d'un signal monochrome ou couleur à résolution TV standard ou haute résolution monochrome.
- Une carte d'acquisition PCI Local Bus, de résolution d'image jusqu'à 764*574.
- Un transfert en temps réel de la video digitalisée vers la mémoire du système.
- Un transfert en temps réel de l'image vers la mémoire et l'affichage du PC.
- Un trigger externe pour les caméras à intégration.

Le serveur d'image Leica Imaging Systems est inclus dans ce système. Il permet l'acquisition et le pré-traitement des images.

Ses fonctions d'acquisition incluent :

- L'ajustement gain et offset de la vidéo source.
- L'affichage en temps réel de l'histogramme de l'image.
- L'affichage des valeurs des niveaux blanc et noir du signal vidéo
- L'affichage de l'image live monochrome ou couleur.

Ses fonctions de pré-traitement de l'image incluent :

- La correction d'ombrage sur l'image acquise ou en direct.
- Il applique un rehaussement de contraste via une LUT.
- Il sélectionne parmi inverse, carré, auto-contraste avec effet immédiat sur l'image affichée.

La station PC PREMIUM comprend :

- Un écran 21 pouce.
- Un processeur Pentium Untell 200Mhz
- Une mémoire RAM de 64 Moctets.
- Une mémoire cache 256 K second niveau.
- 6 slots, 3 PCI, ISA et 1 mixte.
- Un disque dur de 4 Goctets.
- 2 ports série, 1 port parallèle.
- Une carte réseau 100Mhz.
- Une carte graphique Matrox Millenium 4 Moctets 1280*1024 en 16.7 millions de couleurs.

Leica Qwin Pro permet :

- D'avoir un écran unique pour l'image et l'interface utilisateur.
- L'affichage et l'analyse de l'image couleur et monochrome.
- L'affichage d'images en pseudo-couleurs.
- Des zooms image jusqu'à 20* avec possibilité de dérouler l'image.
- L'affichage d'images binaires multiples superposées à l'image couleur ou monochrome.
- L'annotation sur l'image de textes ou de graphes, et l'affichage d'une échelle de calibration
- La mémoire est reconfigurable selon la taille de l'image choisie.

Les mesures incluent :

--Des mesures en couleur, en niveau de gris ou densitométriques, des mesures globales ou individuelles, des paramètres définis par l'utilisateur, des histogrammes et statistiques.

--Des mesures interactives de distances, des profils en gris et en couleur, des fenêtres et calibration variables.

Le traitement d'image comprend :

--Les transformées point-à-point, les convolutions, les fonctions arithmétiques, l'édition d'image, la transformation dans l'espace des couleurs.

Pour les opérations sur image binaire il y a :

--Les opérations d'identification, les opérations logiques, l'édition d'image, la segmentation et la génération de figures graphiques(grille, étoile,...).

Leica Quips permet :

- La création interactive de programmes par enregistrement automatique des séquences.
- La donné d'instructions de contrôle et arithmétiques.
- L'interaction avec les menus d'analyse d'image.

- La sortie formatée des résultat.

Le logiciel Leica, logiciel de transformée de fourier rapide, permet de nombreuses possibilités de création et de manipulation des transformées.

Le logiciel Leica QFAB, cartographie et étude des objets analysés, permet d'afficher, de visualiser et de revoir les données individuelles mesurées par Qwin.

8.3. PRIX DES ANALYSEURS

Ce système est proposé sur le marché à un prix de 188 000frs HT auquel il faut rajouter une camera couleur de 750 LVT de définition coûtant près de 30 000frs HT.

Cet ensemble décrit est destiné pour les laboratoire. Pour l'industrie, ou les laboratoires de très haute technologie, des systèmes dont le prix peut avoisiner les 100 millions de frs sont aussi disponibles.

Leur capacités sont décuplées par rapport au système présenté ici.

INSERER IMAGE : analyse.jpg



9. BIBLIOGRAPHIE

9.1. LIENS INTERNET

Erreur! Source du renvoi introuvable.#Heading3
présentation générale (18 pages).

Erreur! Source du renvoi introuvable.
exemple de traitement en photos (3 pages).

Erreur! Source du renvoi introuvable.

Erreur! Source du renvoi introuvable.
cette adresse correspond a la "binarisation automatique d'images en microscopie electronique" de J-Michel Jolion et Patrick Prevot

9.2. OUVRAGES

Coster et Chermant « Précis d'analyse d'image » Ed. du CNRS 1985

La Recherche 289 Juillet-Août 1996 « l'Imagerie Médicale »

Morphologie mathématique ,dossier du CNRS

Microscopie quantitative : stéréologie , autoradiographie et immunocytochimie quantitatives. Pierre CAU INSERM 1990

Le poly de G. Thomas...

Le poly d'analyse d'images par Catherine Souchier (docteur 3eme cycle Biologie appliquée).

Prospectus publicitaires divers.