

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté des sciences appliquées
Département de génie civil

ÉTUDE DE LA STRUCTURE DES GRANULATS CONCASSÉS
PAR ANALYSE D'IMAGES ET STÉRÉOLOGIE

Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées
spécialité: génie civil

Marco QUIRION

Sherbrooke (Québec), CANADA

Décembre 1995

IV -918



**National Library
of Canada**

**Acquisitions and
Bibliographic Services**

**395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

**Bibliothèque nationale
du Canada**

**Acquisitions et
services bibliographiques**

**395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-21820-1

RÉSUMÉ

Les granulats provenant du concassage des roches sont inévitablement endommagés en raison des nombreux chocs et forces de tension élevées qu'ils subissent. L'endommagement se traduit par l'initiation et le développement de fissures à la faveur de défauts préexistants (pores, fissures, impuretés). La description quantitative de l'endommagement d'un granulats concassé est une étape fondamentale dans l'évaluation de la qualité d'un processus de concassage et de l'adaptation du produit obtenu à l'objectif poursuivi. Une telle description consiste en la mesure de la taille, de la forme et de la distribution spatiale des zones endommagées. Il est d'usage de procéder à de telles mesures au moyen d'un analyseur d'images; la rapidité et la reproductibilité des mesures sont garanties. Les images analysées peuvent provenir d'une observation macroscopique ou microscopique (microscopie photonique ou électronique).

On propose une analyse de la porosité d'une dolomie concassée (le diamètre des granulats est de 12,5 mm) observée au microscope électronique à balayage. Une série de 22 images adjacentes de 256×256 pixels a été saisie à partir d'une section polie du granulats. Ces images montrent des zones sombres, les pores, sur un fond plus clair mais de niveau de gris irrégulier, le fond. Un algorithme de segmentation d'images, mettant à profit diverses opérations morphologiques, méthodes de filtrage et de seuillage automatique, a été élaboré afin d'obtenir des images binaires sur lesquelles les mesures doivent être faites. Le fond des images est alors uniformément blanc et les pores sont noirs. Les paramètres de taille tels l'aire, le diamètre de Feret et son orientation ainsi que la distribution spatiale des pores sont alors mesurés. Ces mesures autorisent une description bidimensionnelle, dans le plan de la section polie, de la porosité du granulats.

L'inférence des paramètres tridimensionnels à partir des mesures 2D précédentes repose sur les équations fondamentales de la stéréologie. Admettant que la section polie étudiée est placée et orientée au hasard dans le granulats, il est dès lors possible d'estimer divers paramètres. Parmi ceux-ci, on retrouve la proportion volumique des pores et donc la porosité ainsi que la densité surfacique des zones poreuses et donc la surface d'échange entre pores et milieu dolomitique.

Les résultats montrent que la particule de dolomie étudiée a une porosité d'environ 9%. De plus, une rose des directions d'allongement des pores laisse voir une orientation préférentielle de ces derniers. Le clivage des minéraux de dolomite formant la roche ou encore des structures géologiques orientées constituent des zones de faiblesse dans la roche qui ont peut-être permis l'agrandissement, selon une orientation préférentielle, des pores déjà présents. La forme polygonale et allongée des pores, ainsi que leur distribution aléatoire, permet de conclure que la minéralogie et la structure initiale de la roche influencent son aspect structural après concassage. Cette modification de la structure interne des granulats influence probablement le comportement des matériaux dans lesquels ils sont utilisés, comme les bétons, qui contiennent dans leur matrice environ 60% en poids de granulats.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier M. Gérard Ballivy, directeur de ces travaux, pour la confiance qu'il m'a accordée, non seulement tout au long de cette recherche, mais aussi, lors des autres activités de recherche du Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée de l'Université de Sherbrooke.

À madame Joëlle Riss, j'exprime ici toute ma gratitude pour la disponibilité et l'encadrement qu'elle m'a accordé. Je n'oublierai pas l'accueil qu'elle et les chercheurs du CDGA de l'Université de Bordeaux I m'ont réservé. Je n'oublie pas les thésards, Marie-Pierre, Nassima, Laurent, qui ont rendu ces trop courts mois en France particulièrement agréables.

Je remercie également, M. François Gitzhofer, professeur au Département de génie chimique de l'Université de Sherbrooke, pour les nombreuses discussions en caractérisation des matériaux et M. Pierre Magny pour qui le MEB et le non moins célèbre LINK AN-10000 n'ont plus de secrets.

Je tiens à remercier aussi tous les étudiants, techniciens et chercheurs du groupe de mécanique des roches ainsi que ceux du groupe béton pour les discussions intéressantes et l'aide apportée, sans oublier Nicole et Marthe pour leur dévouement.

Finalement, je veux dire merci à ma copine, Danielle, pour sa compréhension et son appui durant ces deux années.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1 Introduction	1
1.1 Granulats et bétons à haute performance	2
1.2 Objectif de la recherche	3
1.3 Structure du mémoire et documentation	4
CHAPITRE 2 Microdiscontinuités des roches	7
2.1 Endommagement des roches	8
2.2 Types de microdiscontinuités	9
2.2.1 Microcraquelures	11
2.2.2 Microfissures	11
2.2.3 Microfractures	11
2.2.4 Porosité	12
2.3 Minéralogie et texture des roches	15
2.3.1 Texture des roches	16
2.3.2 Minéralogie	17
2.4 Étude et caractérisation des microdiscontinuités des roches	18
2.4.1 Approche théorique	18
2.4.2 Mesure de la porosité par infiltration de fluide	20
2.4.3 Microscopie optique et électronique	21
2.4.4 Techniques de l'émission acoustique et ultrasonique	22
CHAPITRE 3 Caractérisation des matériaux	25
3.1 Pétrographie	26
3.1.1 Préparation des lames minces	26
3.1.2 Analyse pétrographique	27
3.2 Analyse par diffraction des rayons X (DRX)	29
3.2.1 Préparation de la poudre	29
3.2.2 Spectre de diffraction des rayons X	30
3.3 Microscopie électronique à balayage (MEB)	32
3.3.1 Préparation du granulats pour le MEB	32
3.3.2 Caractérisation des microdiscontinuités	33
3.4 Évaluation de la porosité du granulats	39
3.4.1 Porosité par absorption d'eau	39
3.4.2 Porosimétrie au mercure	39
3.4.3 Porosité théorique	40
3.5 Synthèse de la caractérisation	41

CHAPITRE 4	Analyse d'images et stéréologie	43
4.1	Acquisition d'une image	45
4.2	Traitement des images	49
4.3	Amélioration des images	52
4.3.1	Table de transcodage (LUT)	52
4.3.2	Filtrage	52
4.3.3	Seuillage	53
4.4	Méthodes de filtrage	53
4.4.1	Filtres linéaires	54
4.4.2	Filtres adaptatifs	57
4.5	Description de quelques filtres	61
4.5.1	Filtres de type gradient	61
4.5.2	Filtres de type laplacien	62
4.6	Méthodes de seuillage	62
4.6.1	Seuillage manuel	63
4.6.2	Seuillage automatique	63
4.7	Opérations sur les images binaires	68
4.7.1	Opérations manuelles	69
4.7.2	Opérations logiques	70
4.7.3	Opérations morphologiques	71
4.8	Mesures par analyse d'images	75
4.9	Stéréologie	76
4.9.1	Définition	76
4.9.2	Équations fondamentales de la stéréologie	77
4.9.3	Démonstration du premier principe de stéréologie	78
4.10	Documentation et logiciels d'analyse d'images	82
CHAPITRE 5	Étude de la structure du granulat	83
5.1	Logiciel d'analyse d'images	84
5.2	Acquisition et adaptation des images du granulat	85
5.2.1	Acquisition des images	85
5.2.2	Adaptation des images	86
5.2.3	Assemblage des images	88
5.3	Traitement des images du granulat	92
5.3.1	Algorithme de traitement des images	92
5.4	Mesures sur les images du granulat	98
5.5	Exploitation et analyse des résultats	100
5.5.1	Distribution de l'aire des pores	100
5.5.2	Calcul de la porosité	104
5.5.3	Densité surfacique des pores	108
5.5.4	Distribution des pores dans le granulat	110
5.5.5	Orientation des pores	117
5.5.6	Forme des pores	120

CONCLUSION	129
ANNEXE A Analyse des contraintes dans un solide élastique avec inclusion	133
ANNEXE B Résultats des mesures par analyse d'images	145
ANNEXE C Programmes TURBOPASCAL	157
BIBLIOGRAPHIE	165

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Les mécanismes lors de l'essai de flexion	9
Figure 2.2	Divers types de microdiscontinuités des roches	10
Figure 2.3	Influence de la porosité sur la résistance en compression de diverses roches	13
Figure 2.4	Influence de la porosité sur la résistance en compression d'un grès	14
Figure 2.5	Courbe σ - ϵ d'une roche sous contrainte hydrostatique	14
Figure 2.6	Courbe σ - ϵ d'une roche sous contrainte uniaxiale	14
Figure 2.7	Exemple de textures des roches ignées. A- Phanéritique hypidiomorphe, B- porphyrique, C- phanéritique allotriomorphe	16
Figure 2.8	Microfissures liées à la différence des propriétés mécaniques des minéraux et microfissures reliées à la déformation de minéraux secondaires	18
Figure 2.9	Comparaison schématique entre la mécanique de la rupture et la résistance des matériaux	19
Figure 3.1	Vue la carrière <i>Milton Quarry</i> en Ontario	26
Figure 3.2	La roche vue au microscope polarisant en lumière polarisée ($\times 40$)	28
Figure 3.3	La roche vue au microscope polarisant en lumière analysée ($\times 40$)	28
Figure 3.4	Spectre de diffraction des rayons X de la roche étudiée	30
Figure 3.5	Carte JCPDS de la dolomite	31
Figure 3.6	Microdiscontinuités dans le granulat de dolomie	34
Figure 3.7	Microdiscontinuités dans le granulat de dolomie	35
Figure 3.8	Vue agrandie d'une microdiscontinuité dans le granulat	36
Figure 3.9	Vue agrandie d'une microdiscontinuité dans le granulat	36
Figure 3.10	Clivage caractéristique de la dolomite	37
Figure 3.11	Microphotographie d'une section du granulat prise en électrons rétrodiffusés	38
Figure 3.12	Microphotographie d'une section du granulat prise en électrons rétrodiffusés	38
Figure 4.1	Les principales étapes de l'analyse d'images	44
Figure 4.2	Fonction continue représentant une image en niveaux de gris	45
Figure 4.3	Représentation d'une image dans l'espace discret	46
Figure 4.4	A- Signal à temps continu (analogique), B- signal à temps discret	47
Figure 4.5	Les trames les plus couramment utilisées en analyse d'images	48
Figure 4.6	Différents graphes pour le réseau carré et relation entre les objets dans chacun des graphes	48
Figure 4.7	A- Maillage carré et codage matriciel, B- maillage hexagonal et codage matriciel	50
Figure 4.8	A- Image en niveau de gris d'une partie du granulat où les zones foncées correspondent aux vides, B- image binaire de l'image A	51
Figure 4.9	Histogramme des niveaux de gris de l'image du granulat de la figure 4.8A	51

Figure 4.10	Définition d'une LUT	52
Figure 4.11	Image d'une partie du granulat à l'échelle $30 \times$ et l'histogramme des niveaux de gris de l'image	64
Figure 4.12	Fonction d'évaluation de l'entropie de l'histogramme de la figure 4.11	64
Figure 4.13	Histogramme multimodal des niveaux de gris d'une image	66
Figure 4.14	Les opérations logiques simples	70
Figure 4.15	Concept de l'élément structurant	71
Figure 4.16	Concept de l'érosion par un élément structurant	72
Figure 4.17	Les quatre opérations morphologiques binaires	73
Figure 4.18	Concept de la dilatation par un élément structurant	74
Figure 4.19	Vue d'une section d'aire $A(c)$ de matériau contenant une phase quelconque couvrant une aire plane $A(a)$	79
Figure 4.20	Démonstration du premier principe de stéréologie	79
Figure 5.1	Système d'analyse d'image du CDGA	84
Figure 5.2	Image de 512×512 pixels dont seulement le premier quart est occupé par une image acquise avec Digipad	86
Figure 5.3	Image d'une portion de la section du granulat avec la résine support et même image après l'application d'un masque binaire	87
Figure 5.4	Images G1 à G7 représentant une partie de la section du granulat	89
Figure 5.5	Image (mosaïque) à l'échelle $15 \times$, la section complète du granulat	91
Figure 5.6	Images illustrant les étapes de l'algorithme de traitement	95
Figure 5.7	Image du granulat à l'échelle $15 \times$ après traitement	97
Figure 5.8	Image binaire de la mosaïque du granulat après un seuillage par variance interclasse	99
Figure 5.9	Histogramme de la distribution de l'aire des pores à l'échelle $30 \times$	101
Figure 5.10	Histogramme de la distribution de l'aire des pores à l'échelle $15 \times$	101
Figure 5.11	Combinaison des histogrammes des distributions de l'aire des pores	103
Figure 5.12	Graphique de l'aire plane des pores du granulat en fonction de l'aire de l'image étudiée	108
Figure 5.13	Image montrant la position des centres de gravité des pores	113
Figure 5.14	Image montrant la position recalculée des centres de gravité des pores observés sur les images $30 \times$ du granulat	114
Figure 5.15	Image montrant la position recalculée des centres de gravité des pores observés sur les images $30 \times$ du granulat ainsi que le grillage type superposé à l'image	115
Figure 5.16	Histogramme de la distribution spatiale des centres de gravité des pores observés sur l'image $15 \times$	116
Figure 5.17	Histogramme de la distribution spatiale des centres de gravité des pores observés sur l'image $30 \times$	116
Figure 5.18	Représentation schématique du diamètre de Féret maximum et de son orientation	118
Figure 5.19	Rose du diamètre de Féret maximum des pores à l'échelle $30 \times$	119
Figure 5.20	Rose du diamètre de Féret maximum des pores à l'échelle $15 \times$	119
Figure 5.21	A- Objet convexe, B- Objet non convexe	121

Figure 5.22	Diagramme IA-CB montrant les indices de forme expérimentaux des pores du granulat à 15 ×	125
Figure 5.23	Diagramme IA-CB montrant les indices de forme expérimentaux des pores du granulat à 30 ×	125
Figure 5.24	Diagramme IA-CB montrant les indices de forme expérimentaux (pores du granulat à 15 ×) et les indices de forme théoriques (formes connues) ...	126
Figure 5.25	Diagramme IA-CB montrant les indices de forme expérimentaux (pores du granulat à 30 ×) et les indices de forme théoriques (formes connues) ...	126

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Paramètres mécaniques de bétons à très haute performance contenant divers types de granulats	3
Tableau 3.1	Propriétés optiques et morphologiques de la calcite et de la dolomite	27
Tableau 3.2	Paramètres utilisés pour la diffraction des rayons X	30
Tableau 3.3	Principales raies du spectres de diffraction des rayons X	31
Tableau 3.4	Paramètres du MEB pour l'étude des microdiscontinuités	33
Tableau 3.5	Densité et absorption du granulats grossier	39
Tableau 4.1	Exemples de filtres linéaires pour l'amélioration des images	58
Tableau 5.1	Algorithme de traitement des images	93
Tableau 5.2	Comparaison entre le seuillage par nuées dynamiques et entropie de l'histogramme	94
Tableau 5.3	Paramètres statistiques de la distribution de l'aire de pores dans la section du granulats	104
Tableau 5.4	Calcul de la porosité du granulats	105
Tableau 5.5	Porosité du granulats obtenue avec diverses méthodes de caractérisation ...	106
Tableau 5.6	Densité surfacique des pores en relation avec l'aire de la section observée à 30 ×	107
Tableau 5.7	Calcul de la densité surfacique des pores du granulats	109
Tableau 5.8	Paramètres statistiques de la distribution des périmètres des pores dans la section du granulats	109
Tableau 5.9	Résultats et paramètres du test du χ^2	117
Tableau 5.10	Coefficients de Blaschke 2D de quelques formes planes	123

CHAPITRE 1

Introduction

La fabrication de bétons à haute performance (BHP) nécessite l'utilisation de granulats grossiers ayant des paramètres mécaniques (module de Young, résistance à la compression, etc.) relativement élevés et choisis selon les propriétés mécaniques recherchées du béton. Dans les BHP, les granulats grossiers représentent environ 60% (en poids) du mélange; on entrevoit donc l'influence de ces derniers sur les propriétés mécaniques de tels bétons.

Les propriétés mécaniques du granulat peuvent être tributaires de nombreux facteurs tels la minéralogie de la roche-mère, le dynamitage de la roche, les procédés de concassage employés et l'anisotropie de la roche. Il existe probablement une corrélation entre la minéralogie, la texture, les microdiscontinuités des roches et le comportement mécanique des bétons à haute performance.

Les microdiscontinuités des roches et des granulats pour BHP ne semblent pas avoir fait l'objet d'une étude détaillée. Cependant, BAALBAKI (1990) mentionne que le plan de rupture d'un BHP est transgranulaire comparativement à celui d'un béton normal où les granulats sont plutôt déchaussés de la matrice. TIGHIOUART (1992), dont l'étude portait sur l'influence des granulats sur le comportement mécanique des BHP, mentionne dans ses conclusions qu'une étude de l'influence de la microfissuration des roches devrait être envisagée. Il en est de même pour DIATTA (1987), ce dernier indique dans ses recommandations que l'étude de la microfissuration

des roches pour bétons à haute résistance devrait être approfondie. Enfin, BÉDARD (1982) signale que les granulats ne doivent pas contribuer à la microfissuration du béton lorsque soumis à une charge de compression ou de tension.

1.1 Granulats et bétons à haute performance

Un article de AÏTCIN (1980), s'intitulant *How to produce high-strength concrete: it really takes the best of everything*, montre bien l'importance de la qualité et des propriétés des matériaux utilisés pour la confection de bétons à haute performance.

Les granulats doivent aussi satisfaire certaines caractéristiques physiques et mécaniques afin d'être sélectionnés pour la fabrication de bétons à haute performance. Selon EZELDIN & AÏTCIN (1991), dans les bétons normaux (< 40 MPa), des rapports eau/ciment (E/C) de l'ordre de 0,40 à 0,70 sont utilisés. Avec de tels rapports, l'influence des granulats sur la résistance à la compression du béton est négligeable, cette dernière étant plutôt contrôlée par la pâte de ciment et la zone de transition. Dans le cas des bétons à haute performance (> 40 MPa) et les bétons à très haute résistance (> 100 MPa), de très faibles rapports E/C sont utilisés. De ce fait, il résulte que la pâte de ciment et la zone de transition ne limitent plus la résistance à la compression du béton. La résistance du béton est à ce moment régie par la résistance à la compression du granulat grossier ainsi que par sa minéralogie.

Une étude réalisée par AÏTCIN & MEHTA (1990) montre l'influence de divers types de granulats sur la résistance en compression (f'_c) et sur le module d'élasticité (E'_c) d'un mélange de béton à très haute résistance. Le tableau 1.1 donne les résultats des essais mécaniques sur le béton à 56 jours. On remarque que la nature des granulats grossiers a effectivement un impact sur la résistance en compression du béton ainsi que sur son module d'élasticité.

TABLEAU 1.1
PARAMÈTRES MÉCANIQUES DE BÉTONS À TRÈS HAUTE
PERFORMANCE CONTENANT DIVERS TYPES DE GRANULATS
(d'après Aitcin et Mehta 1990)

Nature du granulat	f_c MPa	E_c GPa
Diabase	104,8	37,9
Calcaire	101,3	40,7
Gravier	95,9	33,8
Granite	88,6	33,8

(E/C = 0,28)

Théoriquement, dans un cylindre de béton ou de roche soumis à une compression uniaxiale ou triaxiale, la distribution des contraintes à l'intérieur du cylindre est homogène et de même nature que la contrainte appliquée. Cependant, par suite du frottement entre les plateaux de la presse et les extrémités du cylindre, la distribution des contraintes n'est plus homogène [GRAMBERG, 1989; AL-CHALABI & HUANG, 1974]. Dans le cas d'un cylindre de béton chargé uniaxialement, les granulats, dispersés dans la matrice, sont sollicités en compression ou en tension et à divers degrés selon leur position par rapport au point d'application de la contrainte principale. Par ailleurs, nous avons effectué une modélisation par la méthode des éléments finis d'un modèle simple cylindre-inclusion en assumant une adhérence parfaite (Annexe A). Cette modélisation montre que la contrainte axiale dans une inclusion rigide peut atteindre 180% de la contrainte appliquée sur le cylindre. Ce pourcentage est fonction de la différence des modules de Young des matériaux. Ceci laisse croire que les granulats dans les BHP sont, d'un point de vue mécanique, grandement sollicités. L'endommagement (présence de défauts) dans les granulats facilitera la rupture de ces derniers et, par le fait même, celle du béton.

1.2 Objectif de la recherche

Cette recherche s'inscrit dans le cadre d'un programme de recherche sur l'endommagement des granulats concassés. La mesure de paramètres tels la porosité et le degré de fissuration est difficile à réaliser sur de petits fragments de roche ou de granulat. Le fait que ces

particules soient de formes irrégulières et de dimension réduite rend difficile la réalisation d'essais de caractérisation physique et mécanique.

L'objectif poursuivi est donc de trouver et de vérifier l'applicabilité d'un processus de caractérisation permettant de quantifier l'endommagement de granulats ou de fragments de roche concassée. Le processus de caractérisation retenu, on le verra, est la microscopie électronique à balayage combinée aux techniques d'analyse d'images et de stéréologie.

1.3 Structure du mémoire et documentation

Le présent chapitre a exposé la problématique à laquelle la présente étude tente d'apporter un élément de réponse. Les études de l'influence des granulats sur le comportement mécanique des BHP de TIGHIOUART (1992), BAALBAKI (1990), AÏTCIN & MEHTA (1990), GRILLS & ALEXANDER (1989), DIATTA (1987), BÉDARD (1982), ont suscité un intérêt marqué pour la caractérisation des défauts dans les granulats.

Le chapitre 2 présente une recherche bibliographique traitant des microdiscontinuités, naturelles et induites, susceptibles d'être rencontrées dans les roches. L'essentiel de la documentation de ce chapitre provient du domaine de la mécanique des roches, de la géologie structurale et de la pétrologie.

Le chapitre 3 fait état de la caractérisation de la roche étudiée, en l'occurrence les granulats de dolomie de la *Milton Quarry* en Ontario. Les essais de caractérisation ont été réalisés dans le but d'avoir une étude complète permettant de bien connaître la nature et les caractéristiques du matériau. Dans cette étape de la recherche, les appareils de caractérisation des matériaux de la Faculté des sciences appliquées de l'Université de Sherbrooke ont été mis à profit.

Le chapitre 4 se veut une synthèse des diverses techniques d'analyse d'images et de stéréologie utiles au problème étudié. Il serait, à notre avis, hasardeux de faire usage de

telles techniques sans en connaître tout au moins les limites. Dans ce chapitre, les ouvrages d'analyse et de traitement des images, de stéréologie ainsi que de statistiques ont été consultés. De plus, un stage en analyse d'images au Centre de développement des géosciences appliquées (CDGA) de l'Université Bordeaux I en France a permis de s'initier et d'appliquer l'analyse d'images et la stéréologie.

Enfin, le chapitre 5 présente les étapes de l'étude d'une particule de dolomie concassée ainsi que les résultats obtenus à l'aide de l'analyse d'images et de la stéréologie. L'analyse des résultats est aussi faite dans ce chapitre.

Please Note

**Page(s) missing in number only; text follows.
Filmed as received.**

6

UMI

CHAPITRE 2

Microdiscontinuités des roches

Actuellement, la sélection des roches pour confectionner des BHP est réalisée à l'aide des essais de mécanique des roches. Afin de caractériser la roche, on détermine son module d'élasticité (E), sa résistance à la compression (C_0) et à la traction (T_0). Cette caractérisation est faite à partir d'éprouvettes de roche saine, la plupart du temps prélevées par forage, dont les dimensions sont d'un ordre de grandeur supérieur aux dimensions d'une particule de granulat. De plus, bien que la roche, soumise aux divers essais, satisfasse à tous les critères mécaniques de sélection, le granulat, lui, subit divers processus de fragmentation comme le dynamitage et le concassage. Lors des essais mécaniques, pratiqués sur des éprouvettes de roc, les discontinuités (fractures par exemple) présentes dans la roche affectent inévitablement le comportement mécanique de celle-ci. Cependant, l'endommagement (microdiscontinuités) créé lors des processus de fragmentation afin que la roche atteigne la taille du granulat ne peut être pris en compte. De plus, à l'échelle du granulat, la structure (pores et microfissures) doit sûrement influencer le comportement du granulat. L'effet de l'endommagement et de la structure sur le comportement mécanique de la roche à l'échelle du granulat ainsi que du béton contenant ce granulat semble actuellement mal connu.

2.1 Endommagement des roches

Lorsqu'un matériau fragile est soumis à une charge, et cela jusqu'à la rupture, celle-ci survient à cause du développement et de la propagation de fissures dans le matériau. Les fissures prennent naissance et se propagent à partir de défauts préexistants dans le matériau. Les cavités, inclusions, microfissures, particules mal liées ou encore la présence de phases ayant des propriétés mécaniques différentes de la matrice sont des exemples de défauts des matériaux [AHSBY & SAMMIS, 1990]. Les défauts énumérés ci-dessus constituent l'endommagement initial ou naturel du matériau. Dans le cas des roches, cet endommagement naturel est représenté par les pores, les microfissures, les clivages des minéraux, les types de minéraux (propriétés mécaniques différentes), etc. BALLIVY et coll. (1988) mentionnent que des essais de chargements répétés sur divers matériaux, entre autres les roches, montrent qu'à partir de certains niveaux de chargement, il y a endommagement du matériau. Celui-ci se manifeste par une détérioration des propriétés mécaniques due aux modifications internes de la structure. En ce qui concerne les roches qui serviront de granulat, l'endommagement initial peut être accentué, lors du concassage, par le développement de microdiscontinuités dans le granulat modifiant ainsi ses propriétés mécaniques.

L'excavation met à profit diverses méthodes permettant de briser la roche en fragments. Par ailleurs, le broyage englobe les processus permettant de réduire la taille des fragments de roche issus de l'excavation [JAEGER & COOK, 1979]. Le concassage est un processus de broyage permettant de réduire la dimension des fragments de roche et d'atteindre celle requise pour servir de granulats grossiers, soit généralement de 5 à 50 mm environ.

Il existe plusieurs types de concasseurs, mais il n'y a que deux modes d'action qui rendent possible la fragmentation, à savoir, l'écrasement entre des pièces métalliques ainsi que la projection et l'impact sur des enclumes fixes [AÏTCIN et coll., 1983]. WEICHERT (1991) mentionne que, dans le cas des matériaux fragiles, l'initiation des fissures et la rupture résultant de la propagation de ces mêmes fissures sont généralement dues à des contraintes de tension. SIRIEYS (1966) associe les mécanismes de rupture, lors du concassage, à ceux qui se produisent dans un essai de flexion. Un prisme de roche, soumis à un effort de flexion dans le plan médian, se rompt par extension, la rupture en traction prenant naissance sur la fibre externe. Dans le cas d'une particule, la

fragmentation s'effectue aussi par extension, la surface de rupture étant dirigée dans le sens de l'effort de compression (Fig. 2.1).

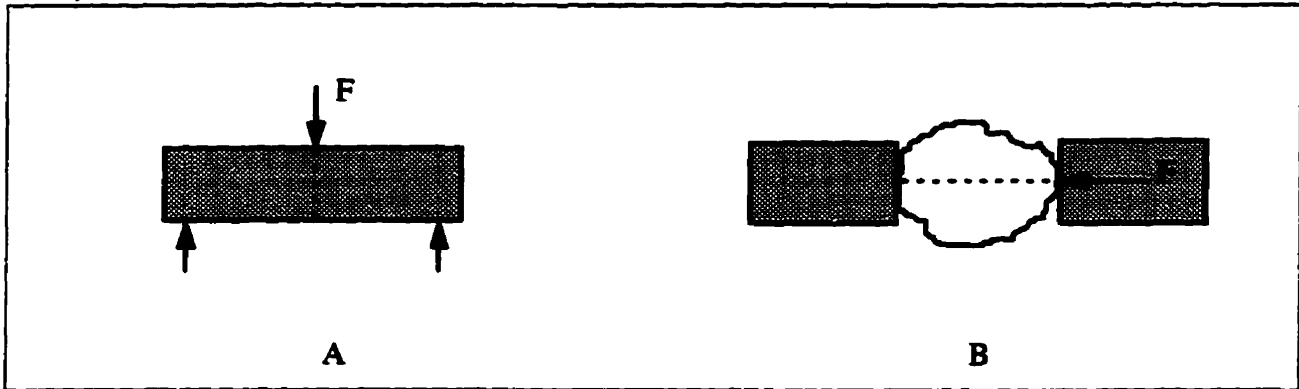


Figure 2.1 A- mécanisme de rupture lors de l'essai de flexion B- rupture par concassage (d'après Sirieys. 1966)

Bref, le concassage induit dans les particules de roche de fortes tensions qui autorisent l'initiation et la propagation de fissures. Une fois le concassage terminé, les particules de roche ont atteint les dimensions voulues, mais elles ont aussi subi de nombreux chocs qui ont endommagé, voire fissuré, les particules. Étant donné que les granulats participent grandement à la résistance des BHP, le fait d'introduire des éléments endommagés (granulats) limitera probablement la résistance de ces bétons. D'autre part, la porosité des roches constitue un dommage que l'on peut qualifier d'endommagement naturel. Comme on le verra plus loin (sect. 2.2), selon leur nature, les roches présentent des valeurs de porosité différentes autant en ce qui a trait à la quantité de pores qu'à la forme de ces derniers.

2.2 Types de microdiscontinuités

Dans une roche, il est possible d'observer divers types de discontinuités, soit celles liées à la texture de la roche et celles issues d'actions mécaniques postérieures à sa formation. PÉRAMI (1971) a fait, dans sa thèse de doctorat, une synthèse des diverses discontinuités rencontrées dans les roches. Dans un premier temps, il distingue la **fragmentation** qui correspond à une dissociation complète de la roche en plusieurs éléments distincts (fragments) complètement séparés les uns des autres. La **fissuration** est une dissociation incomplète de la roche qui est séparée par des ouvertures qui peuvent apparaître à différentes échelles soit la fissuration

microscopique ou microfissuration et la fissuration macroscopique ou macrofissuration. Les principaux types de microdiscontinuités sont:

- les microcraquelures;
- les microfissures:
 - intercrystallines ou microfissures de joints;
 - intracrystallines ou microfissures de clivage;
- les microfractures.

La porosité est aussi un type de discontinuité important; lors de la caractérisation des roches, cette propriété doit être considérée. La figure 2.2 illustre divers types de microdiscontinuités.

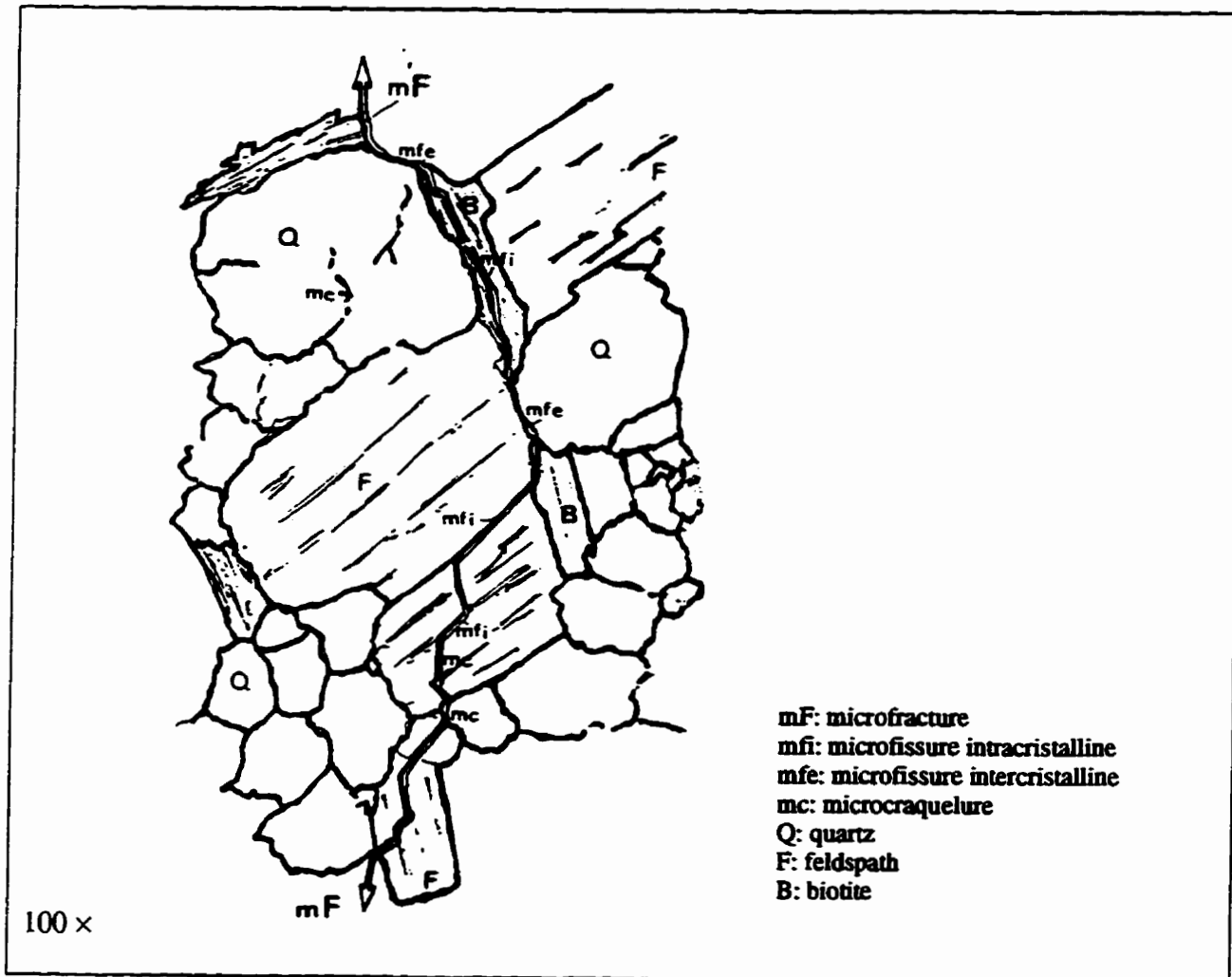


Figure 2.2 Divers types de microdiscontinuités des roches (d'après Pérami, 1971).

2.2.1 Microcraquelures

Les microcraquelures se retrouvent à l'intérieur d'un seul cristal et elles ne le traversent pas. Ce type de discontinuité est lié aux défauts dans la structure des cristaux, aux diverses impuretés et inclusions. Les microcraquelures sont à l'origine de concentrations locales de contraintes et elles sont dues à des inégalités de déformation entre diverses zones d'un cristal.

2.2.2 Microfissures

Les microfissures sont de deux types, les microfissures de joint et les microfissures de clivages. Ces dernières traversent les cristaux en suivant des zones de cohésion minimum tels les clivages. Les microfissures de joint sont en fait des joints de grains. Ces joints sont très résistants et ils se brisent sous des conditions spécifiques:

- lorsque la soudure des cristaux est imparfaite, par exemple à la suite de défauts de la structure cristalline;
- lors d'une dilatation thermique des cristaux, les joints de grains sont le siège de fortes tensions;
- lorsque les sollicitations imposées sont supérieures aux forces de cohésion des joints.

2.2.3 Microfractures

Les microfractures sont le résultat de deux processus distincts. Dans le premier cas, elles sont issues de la combinaison d'une multitude de microfissures orientées suivant une direction préférentielle. Ce type de microfractures se rencontre surtout dans les roches dont la minéralogie est hétérogène, les granites par exemple. Dans le second cas, les microfractures se forment sans qu'il n'y ait de microfissuration préalable de la roche. Les microfractures se produisent dans les roches peu hétérogènes, mais ayant des irrégularités minéralogiques (présence de minéraux accessoires). Ces irrégularités peuvent entraîner d'inégales déformations et ainsi provoquer la microfracturation de la roche.

2.2.4 Porosité

WALSH & BRACE (1966) mentionnent que toutes les roches sont poreuses, mais que la valeur de la porosité varie grandement pour chaque type de roche. On trouve souvent, pour un même type de roche, des valeurs de porosité différentes. Lors de la formation d'une roche, de nombreuses variations de l'environnement de formation peuvent affecter sa structure.

La porosité est liée à la nature de la roche. Dans le cas des grès et des conglomérats, les interstices entre les grains forment la porosité de ces roches sédimentaires détritiques; quant aux roches sédimentaires chimiques (calcaires, dolomies), la porosité provient de la dissolution de ces roches par les eaux souterraines. Pour ce qui est des roches ignées extrusives, la porosité est formée par la présence de cavités causés par l'expulsion des fluides lors de leur formation. Enfin, pour ce qui est des roches ignées intrusives et des roches métamorphiques, la porosité est liée à la présence de microfissures situées aux joints des grains. Notons que, selon le type de roche, non seulement la porosité varie, mais aussi la forme des pores. Les roches très poreuses, roches sédimentaires surtout, renferment des pores équidimensionnels (formes arrondies) tandis que les roches peu poreuses, les granites et les gneiss par exemple, montrent une porosité de type fissures. Les granites et les gneiss se forment dans des conditions données et les minéraux constituant ces roches sont tous bien accolés les uns aux autres. Toutefois, lorsque les conditions changent et que la roche est soumise à de nouvelles conditions de pression et de température différentes de l'environnement de formation, alors un nouvel état de contraintes se développe dans la roche. En réponse à ce changement, les minéraux se brisent et se déplacent les uns par rapport aux autres. Cette réponse des minéraux se traduit par l'apparition d'une porosité de type fissure. Ces microfissures montrent un rapport longueur sur largeur d'environ 10^3 .

La porosité des roches peut donc être formée de vides de forme granulaire, on dira alors une porosité de type **pore**, et les vides de forme aplatie constituent la porosité de type **fissure**. Entre ces deux extrêmes, il existe une autre catégorie, les **interstices entre grains**. Bien que tous les types de porosité puissent coexister, la porosité de type pore est celle qui contribue le plus à la porosité totale.

La porosité totale d'une roche semble avoir un effet considérable sur son comportement mécanique. Selon DUFFAUT et coll. (1979), le vide est l'élément le plus important à décrire dans une roche. Ils recommandent formellement, à tous les mécaniciens, de commencer la description d'une roche par celle de ses vides et de fournir des valeurs de la porosité. Selon eux, l'influence de la porosité sur la résistance à la compression est de la forme:

$$C_0 = \alpha e^{-\beta n} \quad (2-1)$$

α et β : constantes

n : porosité

C_0 : résistance à la compression (MPa)

DUNN et coll. (1973) proposent aussi un modèle décrivant l'influence de la porosité sur la résistance à la compression de grès. L'équation qu'ils proposent est la suivante:

$$\sigma_d = an^b \quad (2-2)$$

σ_d : contrainte différentielle ($\sigma_1 - \sigma_3$)

n : porosité

a et b : constantes telles que $a < 0 < b$

Les figures 2.3 et 2.4 mettent en relation la porosité et la résistance en compression pour différentes roches.

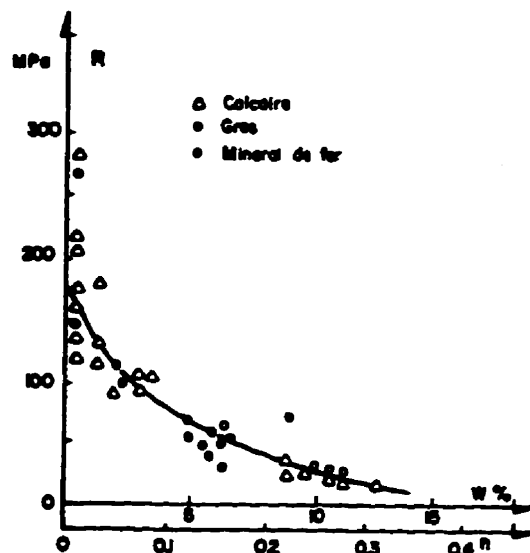


Figure 2.3 Influence de la porosité sur la résistance à la compression de diverses roches (d'après Duffaut et coll., 1979)

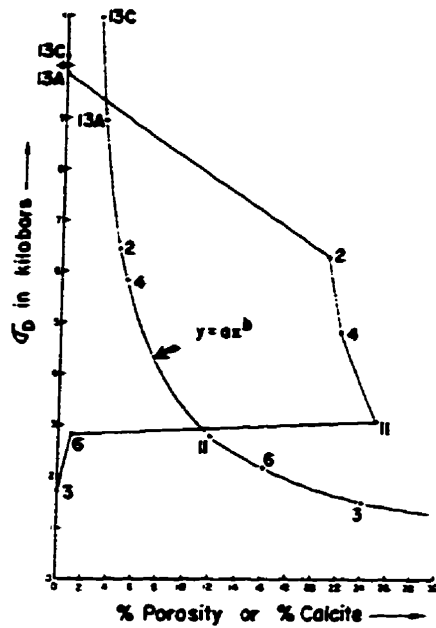


Figure 2.4 Influence de la porosité sur la résistance à la compression d'un grès (d'après Dunn et coll., 1973).

En ce qui à trait à la déformation, WALSH & BRACE (1966) indiquent que la porosité de type fissure est celle qui influence le plus la déformation. La figure 2.5 montre la courbe contrainte-déformation (σ - ϵ) d'une roche soumise à une contrainte hydrostatique ($\sigma_1 = \sigma_3$). La figure 2.6 montre la courbe contrainte-déformation de la même roche mais soumise seulement à une contrainte uniaxiale.

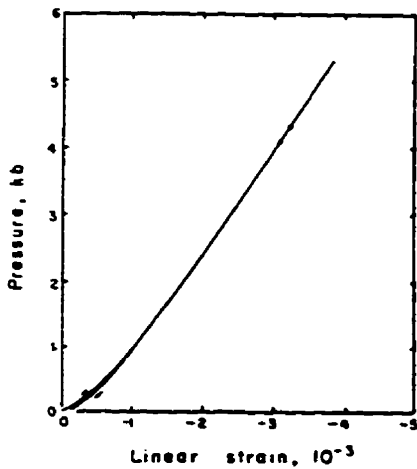


Figure 2.5 Courbe σ - ϵ d'une roche sous contrainte hydrostatique (d'après Walsh et Brace, 1966)

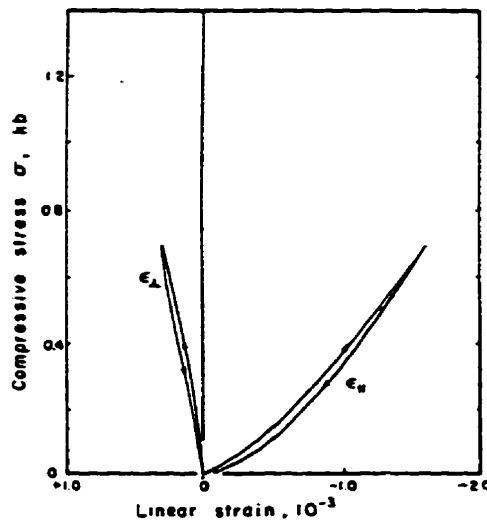


Figure 2.6 Courbe σ - ϵ d'une roche sous contrainte uniaxiale (d'après Walsh et Brace, 1966)

L'analyse de la figure 2.5, soit le cas hydrostatique, indique que la courbe σ - ϵ du cycle de chargement suit sensiblement le même chemin que la courbe σ - ϵ du cycle de déchargement. Cependant, il n'en est pas de même pour la courbe σ - ϵ du cas uniaxial (Fig. 2.6). En effet, le cheminement des courbes du cycle de chargement et de déchargement n'est pas le même, cette différence est une hystérésis indiquant qu'il y a perte d'énergie dans le système.

La contrainte exercée sur la roche entraîne la fermeture des microfissures. Lorsque les faces d'une fissure sont accolées et que la contrainte exercée n'est pas hydrostatique, il peut alors y avoir mouvement des faces. La friction ainsi créée génère une perte d'énergie provoquant l'hystérésis. Dans le cas hydrostatique, le libre mouvement des faces d'une microfissure n'est pas possible, on n'observe donc pas l'hystérésis. La porosité de type pore (vides équidimensionnels) ne contribue pas à l'hystérésis puisque ces derniers ne se ferment pas complètement. De ce fait, il ne peut y avoir accolement des parois des pores. Les pores ont donc moins d'influence sur le module d'élasticité.

2.3 Minéralogie et texture des roches

Les caractéristiques des granulats grossiers, par exemple la minéralogie, la porosité, les paramètres mécaniques, constituent l'héritage laissé par le massif rocheux d'où ils proviennent. La nature du massif rocheux est régie par l'environnement géodynamique dans lequel ce dernier s'est formé ainsi que par les divers processus de météorisation auxquels il fut soumis. Les roches sont des assemblages de minéraux et elles présentent différentes textures et structures. Il s'agit là d'aspects importants des roches qui auront une incidence sur la qualité et le comportement des granulats. On distingue trois ensembles de roches, les roches ignées, les roches sédimentaires et les roches métamorphiques, chacun étant caractérisé par son mode de formation.

2.3.1 Texture des roches

La texture d'une roche est intimement liée à son mode de formation. HOUPERT (1979) définit la texture comme suit:

« La forme, les dimensions, l'orientation morphologique et la distribution dimensionnelle des grains, ainsi que la répartition des espèces minérales déterminent la texture des roches ».

La texture d'une roche a une grande influence sur son comportement mécanique. Dans une roche, la limite entre deux grains (joint de grains) est une zone de faible épaisseur constituant une surface de discontinuité. Une roche à texture phanéritique, c'est-à-dire dont les minéraux sont perceptibles à l'œil nu, avec des minéraux idiomorphes présentera de nombreuses surfaces de discontinuité puisqu'elle est essentiellement composée de grains grossiers bien formés. Les roches à texture aphanitique, c'est-à-dire celles dont les grains ne sont pas discernables à l'œil, sont beaucoup plus homogènes; les minéraux étant très petits, les joints de grains le sont d'autant plus. Ces textures sont observées dans les roches ignées, la texture phanéritique est caractéristique des roches intrusives (granite par exemple) tandis que la texture aphanitique est associée aux roches effusives (Fig. 2.7). Selon SARKAR & AÏTCIN (1990), les roches à texture phanéritique présentent de nombreuses microfissures intra- ou transgranulaires, créant ainsi des zones de faiblesse dans la roche. Les granulats provenant de telles roches peuvent nuire à la résistance des BHP.

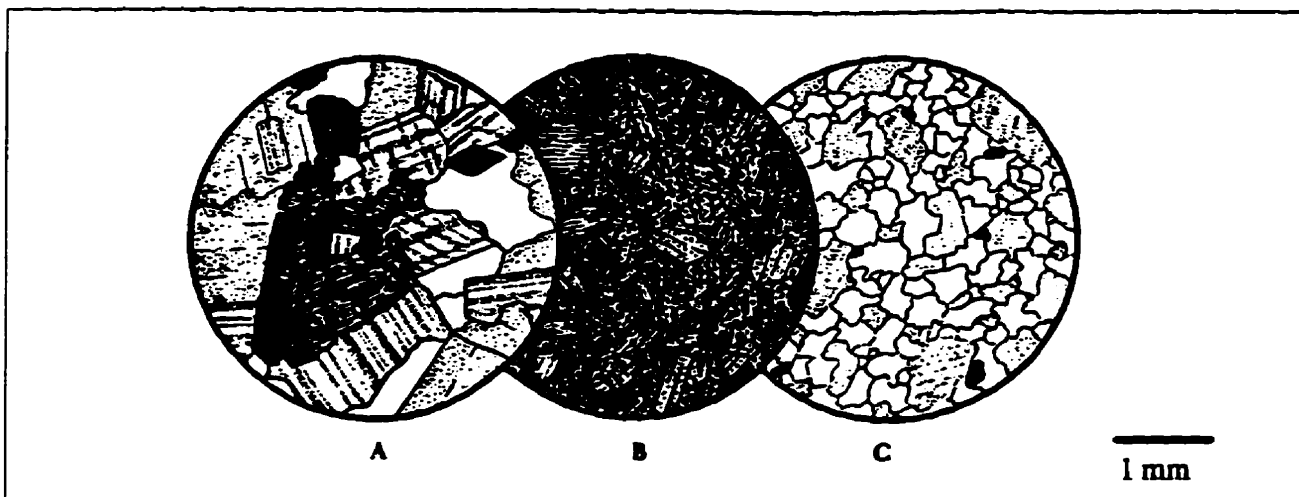


Figure 2.7 Exemple de textures des roches ignées. A- Phanéritique hypidiomorphe, B- Porphyrique et C-Phanéritique allotriomorphe (d'après Williams et coll., 1982)

Les roches sédimentaires résultent d'une accumulation de divers éléments (fragments de minéraux ou de roches) ou de la précipitation à partir de solutions. Selon leur composition, ces roches sont divisées en deux grandes catégories: les roches sédimentaires d'origine *détritique* (grès, conglomérats, etc.) et les roches sédimentaires d'origine *chimique* (calcaires, dolomies). De telles roches montrent souvent des textures à grains fins (calcaires, siltstones) et sont donc très homogènes, cependant elles sont souvent stratifiées et poreuses, donc mécaniquement anisotropes.

Les roches métamorphiques sont issues de la recristallisation de roches préexistantes (ignées, sédimentaires ou métamorphiques) due à des augmentations de pression et de température dans les zones de subduction ou lors des orogénèses par exemple. Les roches métamorphiques sont la plupart du temps foliées ou rubanées. Les fortes pressions subies lors de leur formation provoquent la concentration et l'alignement de minéraux suivant une direction préférentielle souvent perpendiculaire à la direction de la pression. On parlera alors de texture lépidoblastique et nématoblastique [BARD, 1990]. De telles concentrations de minéraux engendrent des plans de faiblesse dans la roche et, à plus forte raison, s'il s'agit de minéraux du groupe des micas. Ces minéraux, à cause de leur clivage, ont la particularité de se débiter en feuillets très facilement. On comprend que la présence en quantité appréciable de tels minéraux ait une sérieuse influence sur le comportement mécanique de la roche et, par le fait même, sur celui des granulats.

2.3.2 Minéralogie

On doit accorder une attention particulière à la minéralogie des roches utilisées comme granulats. Les diverses espèces minérales présentes dans une roche n'ont pas toutes les mêmes propriétés mécaniques. Lorsqu'une roche est soumise à un effort de compression, une contrainte de cisaillement se développe au joint de grains pouvant atteindre jusqu'à 30% de la contrainte normale (Fig. 2.8A). Cette contrainte de cisaillement, due aux paramètres élastiques différents des minéraux en contact, peut être insuffisante pour initier le glissement des grains, mais elle peut contribuer à l'ouverture de microfissures préexistantes [TAPPONNIER & BRACE, 1976]. L'étude d'un granite (*Westerly Granite*) par TAPPONNIER & BRACE (1976) montre que les minéraux secondaires ne composant que 5 à 10% de la roche peuvent limiter la résistance de celle-

ci. Dans le cas du granite étudié, la biotite est, la plupart du temps, à proximité des zones fortement fracturées. De plus, des *kinks* (plis en genou) sont observés, à l'échelle microscopique, dans les minéraux de biotite; la déformation associée à cet élément structural entraîne celle des minéraux juxtaposés (Fig. 2.8B).

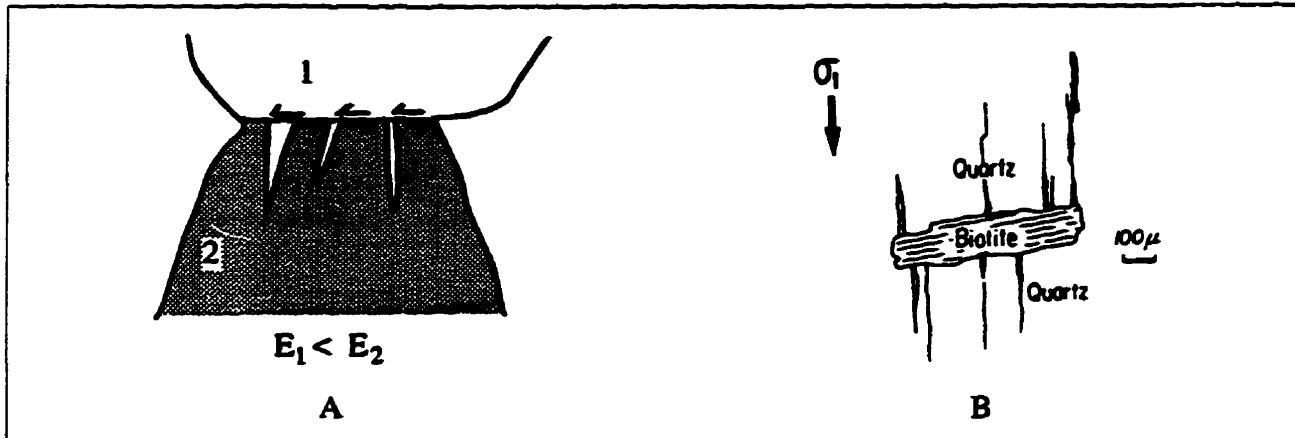


Figure 2.8 A- Microfissures liées à la différence des propriétés mécaniques des minéraux et B- Microfissures reliées à la déformation de minéraux secondaires (d'après Tapponnier et Brace, 1976)

Notons que certains cristaux, notamment les feldspaths sont très souvent maclés, par exemple la sanidine présente la macle de Carlsbad et les plagioclases les macles polysynthétiques. Il s'agit là d'hétérogénéités dans les minéraux qui peuvent influencer le comportement mécanique de la roche. Enfin, le clivage est une propriété des minéraux qui fait que ceux-ci se brisent suivant des plans parallèles, ce sont en fait des zones de faiblesse dans la structure des minéraux. Inévitablement, les clivages des minéraux ont un impact sur le comportement des roches.

2.4 Étude et caractérisation des microdiscontinuités des roches

2.4.1 Approche théorique

La mécanique de la rupture (*fracture mechanics*) est une approche qui permet l'étude de l'influence des défauts, plus particulièrement des fissures, sur le comportement et la résistance des matériaux. La mécanique de la rupture fait intervenir trois éléments de base dans l'analyse d'un matériau: la dimension du défaut, la résistance à la propagation des fissures (*fracture toughness*) et

la contrainte appliquée (Fig. 2.9). Comparativement, la résistance des matériaux fait intervenir deux concepts: la contrainte appliquée et la limite élastique combinée avec la résistance à la traction [ANDERSON, 1991].

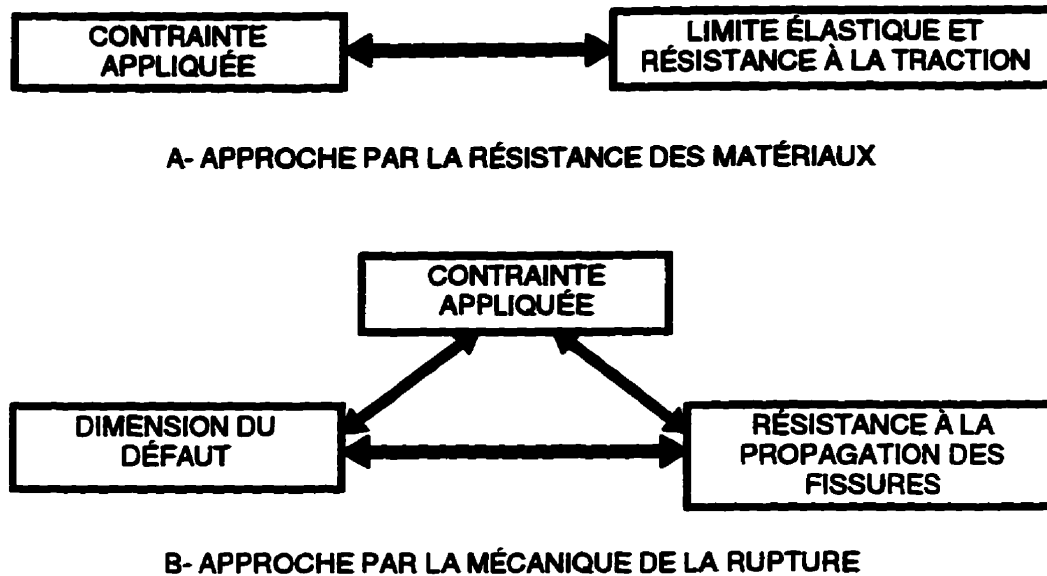


Figure 2.9 Comparaison schématique entre la mécanique de la rupture et la résistance des matériaux (d'après Anderson, 1991)

La mécanique de la rupture s'est développée autour de la théorie de GRIFFITH (1920; 1924) qui fut le premier à proposer un critère énergétique pour la rupture des matériaux. L'intérêt de sa théorie réside dans le fait qu'elle tient compte de la dimension de la fissure dans l'analyse de la rupture:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma_c}{\pi a}} \quad (2-3)$$

γ_c : énergie de surface
 a : demi-longueur de la fissure
 E : module d'élasticité du matériau
 σ : contrainte critique de rupture

Cette approche fut l'objet d'intenses recherches et est maintenant d'application courante dans l'étude des matériaux homogènes et isotropes ayant un comportement élastique linéaire, les céramiques par exemple. Les roches ne se comportent pas de façon linéaire, il s'agit plutôt d'une

combinaison de comportements idéalisés (élastique + viscoélastique). De plus, ce matériau est généralement hétérogène et anisotrope. L'adaptation des théories de la mécanique de la rupture au comportement de tels matériaux est maintenant très avancée, ce qui permet d'utiliser cette approche lors de l'étude du comportement de roches et bétons fissurés.

En ce qui a trait à l'endommagement, il existe pour les matériaux isotrope une théorie de l'endommagement [BOURNAZEL, 1994]. Une relation relie le module d'élasticité à l'endommagement (éq. 2-4).

$$E = E_0(1 - D) \quad (2-4)$$

Dans l'équation 2-4, E_0 représente le module d'élasticité initial du matériau et D est une valeur de l'endommagement variant de 0 à 1. L'endommagement peut être le résultat d'efforts de compression et de traction; on partage l'endommagement selon ces deux effets selon diverses lois d'évolution.

2.4.2 Mesure de la porosité par infiltration de fluides

a) Porosimétrie par infiltration d'eau

La façon la plus simple d'obtenir une mesure de la porosité d'un matériau est de mesurer le volume d'eau qui occupe ses pores. Cependant, cette technique présente de nombreux inconvénients qui rendent impossible la mesure exacte de la porosité d'une roche. En fait, la dimension des molécules d'eau peut être plus grande que les pores, ne pouvant ainsi atteindre tous les pores. De plus, il arrive que l'air, piégé dans les pores, empêche l'eau de pénétrer et de combler les pores [WINSLOW, 1994]. L'essai ASTM C127 (*Test method for specific gravity and absorption of coarse aggregate*) permet d'obtenir les diverses valeurs de densité permettant de calculer la porosité. Selon WINSLOW (1994), les valeurs de porosité obtenues par cette méthode sont, la plupart du temps, incorrectes puisque seulement 50 à 80% de la porosité est comblée par l'eau.

b) Porosimétrie au mercure

L'essai porosimétrique par injection de mercure est une méthode permettant de quantifier la porosité des roches. Il existe divers types d'appareil mais le principe reste le même. L'appareil permet d'injecter du mercure sous pression afin qu'il atteigne tous les pores du matériau. L'utilisation de tels appareils nécessite que l'on assume un modèle théorique du milieu poreux et, bien qu'il existe quelques modèles, aucun ne présente une description conforme aux milieux naturels [BOUSQUIE et coll., 1980].

SHAKOOR & SCHOLER (1985) donnent quelques limitations concernant la mesure de la porosité par porosimétrie au mercure:

- il est nécessaire de faire une correction des données de pression en fonction du diamètre des pores. Ceci est dû à l'effet de la compression de l'air piégé dans les pores. Il faut aussi tenir compte de l'expansion du mercure liée à la chaleur générée à pression élevée;
- on assume que le système poreux est tubulaire, ce qui est généralement faux dans le cas des roches. Si un vide présente une entrée plus petite que le pore lui-même, alors la dimension du pore sera enregistrée comme étant celle de l'entrée;
- les éprouvettes soumises à l'essai sont de petite taille (mm^3). Les roches sont des matériaux hétérogènes, on peut observer une variation de la porosité d'un échantillon à l'autre.

2.4.3 Microscopie optique et électronique

Le microscope polarisant et le microscope électronique à balayage (MEB) permettent de caractériser les microfissures en termes d'orientation, de forme et de dimensions. SARKAR & AİTCIN (1990) ont mis en évidence, à l'aide du microscope polarisant, la texture et la minéralogie des roches utilisées pour la confection de BHP. De plus, ils ont observé des fissures ainsi que des veines recoupant les minéraux.

SPRUNT & BRACE (1974) ont observé les microdiscontinuités (pores et microfissures) de diverses roches (granite, gabbro, diabase) telles qu'elles existent à l'intérieur même de la roche. Leur technique par amincissement ionique (*ion thinning*) permet d'éliminer la microfissuration

induite par le polissage et surtout le sciage de l'éprouvette. Des microfissures aussi petites que 0,02 μm ont été observées au MEB. DARWIN & DEWEY (1989) mentionnent qu'il est possible, à l'aide du MEB utilisé conjointement avec un analyseur d'images, d'effectuer une cartographie automatisée des microfissures d'éprouvettes de béton ou de roche. Selon eux, les instruments actuels, scie à diamants à haute vitesse par exemple, permettent de préparer les éprouvettes sans les endommager. Selon WINSLOW (1994), l'analyse d'images constitue une approche totalement différente permettant de mesurer la porosité des granulats. L'analyse d'images élimine les problèmes liés à l'infiltration de fluides dans les pores. Toutefois, puisque l'on étudie une section de la roche, on doit assumer que la distribution des pores est aléatoire. La méthode utilisée dérive de l'essai normalisé C457 de l'ASTM (*Microscopical determination of parameters in the air-void system in hardened concrete*).

La grande utilité du MEB dans l'étude des matériaux n'est plus à démontrer. Cependant, il est difficile, voire impossible, de quantifier la microfissuration d'un matériau dans un volume donné (dans une particule de granulat par exemple). SPRUNT & BRACE (1974) ont tenté de suivre les microfissures d'une roche dans les trois dimensions de l'espace à partir de sections multiples dans un même échantillon. Cette méthode ne fut pas concluante.

2.4.4 Techniques de l'émission acoustique et ultrasonique

La technique d'émission acoustique (ÉA) permet de suivre l'évolution de la microfissuration dans un solide. Le phénomène d'émission acoustique correspond au relâchement de l'énergie accumulée dans un matériau soumis à une déformation. Le relâchement d'énergie, lié à la rupture locale du matériau, provoque une arrivée d'ondes élastiques de hautes fréquences pouvant être détectées par divers capteurs placés sur l'échantillon. En fait, le développement et la propagation de microfissures amènent une modification du milieu solide et ainsi l'émission d'ondes [LI & NORDLUND, 1993].

ZERGUA (1988) a étudié la microfissuration des roches à l'aide de l'ÉA. Selon lui, cette technique peut être efficace pour la détection et la localisation d'un défaut quelconque ainsi que

pour l'étude de la dégradation d'un matériau. Il mentionne aussi que, malgré la diversité minéralogique des roches, un comportement mécanique particulier à chaque type de roche et les limites des appareils utilisés, il est possible de suivre l'évolution des défauts à l'intérieur d'un échantillon. L'ÉA permet aussi de caractériser le milieu dans lequel se propagent les ondes. TOURENQ et coll. (1971) proposent l'étude de la fissuration des roches à partir des vitesses de propagation des ondes élastiques. Selon eux, cette méthode permet de faire la part entre la porosité et la fissuration dans une roche. L'élaboration d'un abaque, qui met en relation le pourcentage de vide de la roche, l'indice de qualité, la porosité de fissure et la porosité de pore, permet de déterminer la proportion de fissures et de pores dans une roche. L'émission acoustique nécessite toutefois que l'on ait des éprouvettes de dimensions beaucoup plus grandes que celles d'un granulat.

CHAPITRE 3

Caractérisation des matériaux

La roche, faisant l'objet de la présente caractérisation, provient de la carrière *Milton Quarry* située à Milton en Ontario (Fig. 3.1). Il s'agit d'une roche sédimentaire, de la Formation d'Amabel, datant du Silurien (environ 420 Ma). Il s'agit probablement d'une dolomie. La roche, de couleur grise (N7 selon la charte des couleurs de la GSA), est à grain moyen et est relativement poreuse. La roche est essentiellement composée de dolomite ou calcite; l'examen mégascopique ne permet pas de confirmer s'il s'agit bien de dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ou de calcite (CaCO_3). Cependant, la réaction mitigée au HCl dilué milite en faveur d'une minéralogie essentiellement dolomitique.

Une caractérisation mécanique de la roche et des granulats a déjà été réalisé au Laboratoire de mécanique des roches, cela dans le but d'utiliser cette roche dans les BHP. Par ailleurs, l'étude microstructurale des granulats n'a pas été approfondie. L'objectif de cette caractérisation est de connaître la minéralogie de la roche à l'étude afin de s'assurer qu'il s'agit bien d'une dolomie. D'autres informations importantes telles la dimension des minéraux, la présence de clivages, ainsi que la porosité de la roche seront dégagées. Les analyses sont effectuées sur des fragments de roche, c'est-à-dire des granulats d'environ 12,5 mm de diamètre (97% passant le tamis 12,5 mm et 0,1% passant le tamis 6,3 mm). Les éprouvettes de roche saine proviennent de carottes prélevées dans un bloc de roche tandis que les granulats proviennent de piles de réserve. Les éprouvettes de roche servent pour l'analyse pétrographique. Les granulats seront utilisés pour l'étude des microdiscontinuités. Une poudre de roche est aussi utilisée lors de l'analyse par diffraction des rayons X (DRX).

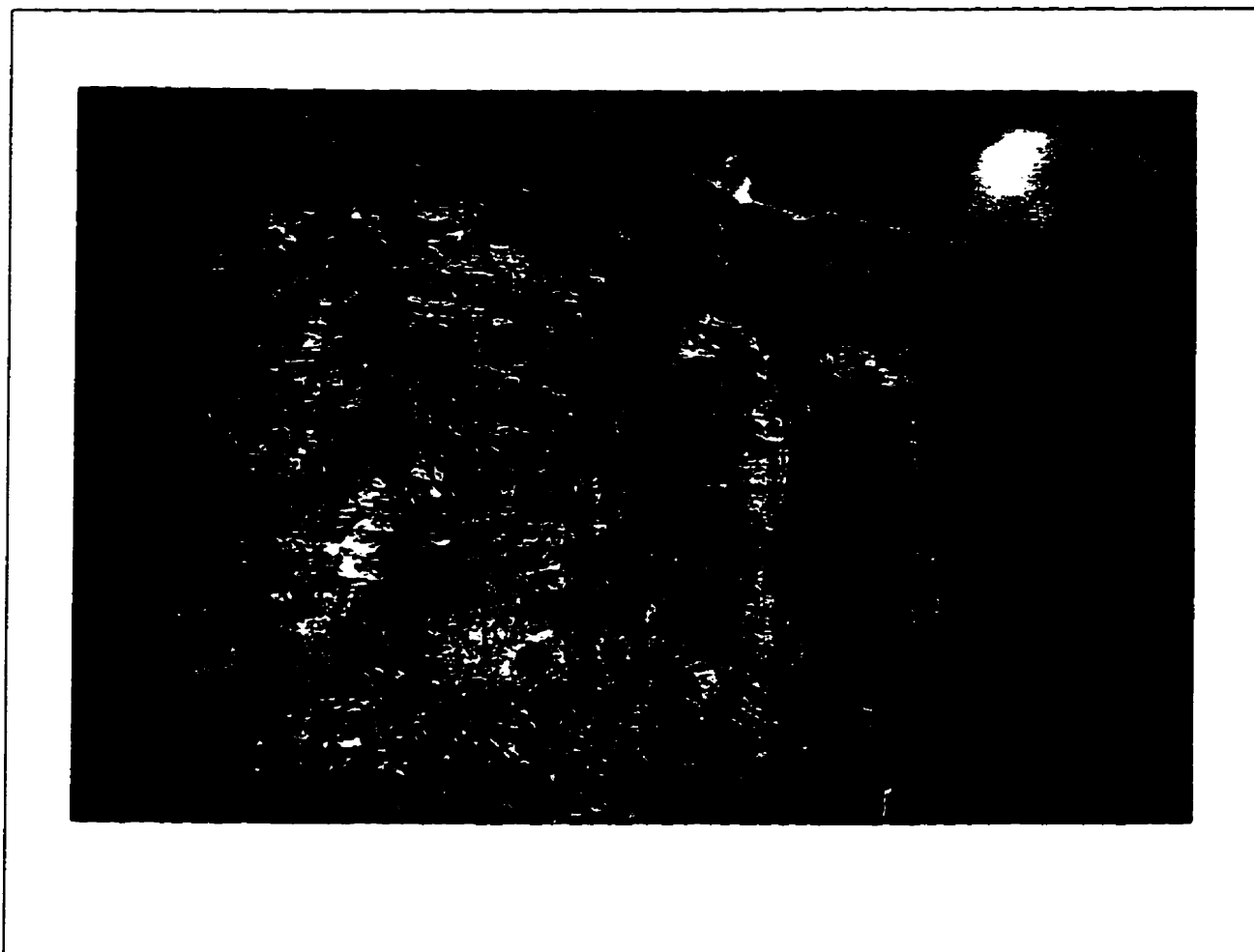


Figure 3.1 La roche étudiée provient de la carrière *Milton Quarry*, en Ontario

3.1 Pétrographie

3.1.1 Préparation des lames minces

La préparation des lames minces pour le microscope polarisant consiste à scier un morceau de la roche et de le polir jusqu'à l'obtention d'une mince section de 0,03 mm d'épaisseur. Il s'agit de l'épaisseur adoptée conventionnellement pour les lames pétrographiques [FABRIÈS et coll., 1982]; cela permet d'atteindre la transparence en lumière polarisée analysée pour la plupart des minéraux à l'exception des minéraux isotropes. En tout, deux lames minces ont été préparées à l'Université du Québec à Chicoutimi.

3.1.2 Analyse pétrographique

La roche est constituée d'environ 95% de dolomite ou calcite. Ces deux minéraux présentent des propriétés optiques très semblables (Tab. 3.1). Il est difficile, voire impossible, de les distinguer catégoriquement sans effectuer de mesures précises (indice, biréfringence). Pour cette raison, la diffraction des rayons X sur une poudre de roche est mise à profit (sect. 3.2) et permettra d'identifier ce minéral.

TABLEAU 3.1
PROPRIÉTÉS OPTIQUES ET MORPHOLOGIQUES
DE LA CALCITE ET DE LA DOLOMITE
(d'après Fabriès & coll., 1982)

Nom	Angle entre 2 faces clivage (1011)	Indices principaux de réfringence	
		N_g	N_p
Calcite	74°55'	1,658	1,486
Dolomite	73°45'	1,679	1,502

La dimension des minéraux varie de 0,02 à 0,5 mm; le clivage mesuré de 73,5° en moyenne (n = 6) est caractéristique ainsi que les teintes de biréfringence (rose, bleu et vert) observées en lumière analysée. Certains des minéraux de dolomite (ou calcite), incolores en lumière polarisée, sont allotriomorphes (faces mal développées) et d'autres hypidiomorphes (quelques faces bien développées). On note environ 1% de minéraux isotropes. On détecte un peu de quartz, grâce à sa teinte grise caractéristique, en lumière analysée. Ce dernier est difficile à distinguer, car les minéraux sont plutôt nébuleux. Il est à remarquer qu'aucune observation en conoscopie, pour l'obtention de figures d'interférences, n'a été faite. Les figures 3.2 et 3.3 montrent la roche telle que vue au microscope polarisant. La porosité de la roche a été examinée; les pores ont un diamètre variant de 0,05 à 0,5 mm.

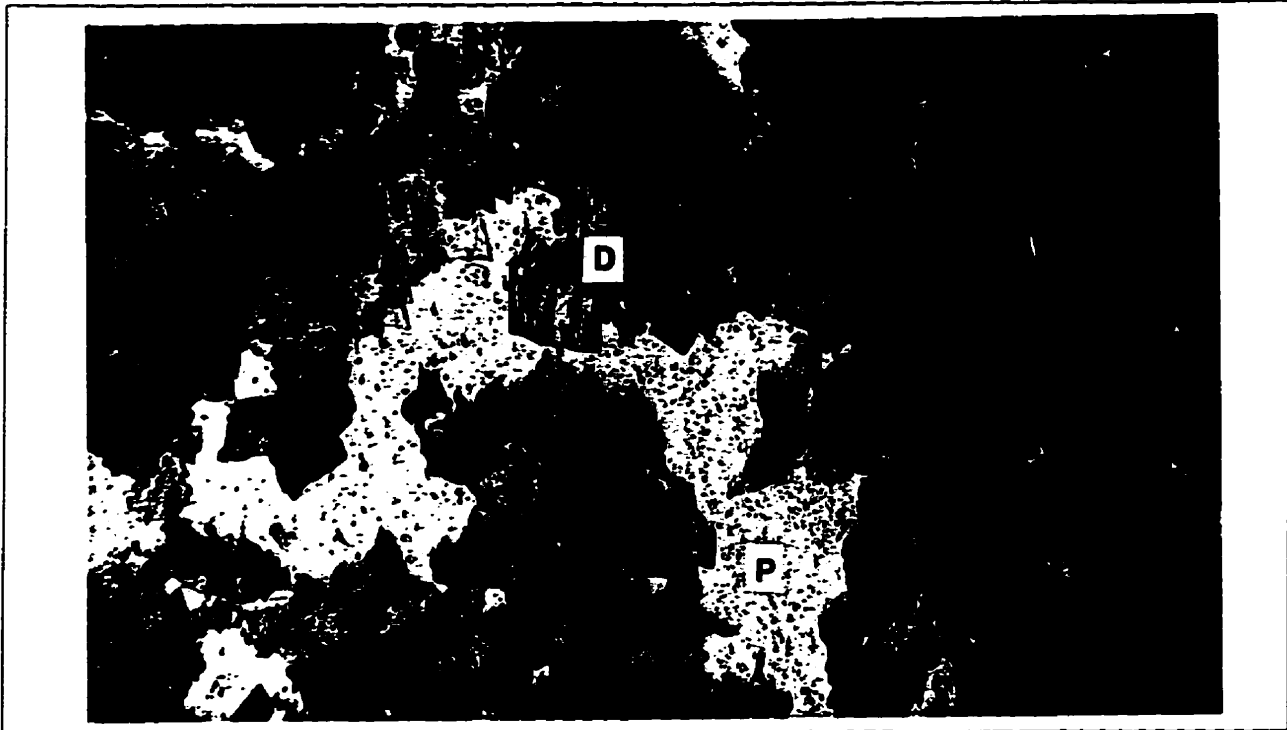


Figure 3.2 La roche vue au microscope polarisant en lumière polarisée (D: Dolomite, P: pore) (×40)



Figure 3.3 La roche vue au microscope polarisant en lumière analysée (D: Dolomite, P: pore) (×40)

L'analyse pétrographique au microscope polarisant indique qu'il s'agit d'une roche carbonatée, probablement une dolomie. La présence de minéraux avec un clivage bien défini a été notée; ceci est important en vue de l'analyse des propriétés mécaniques de la roche.

3.2 Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X, sur une poudre de la roche, permet de déterminer la nature exacte des minéraux observés au microscope polarisant. Bien qu'ayant des propriétés optiques semblables, la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) et la calcite (CaCO_3) affichent des compositions chimiques différentes. La dolomite a une structure similaire à celle de la calcite, mais elle contient, dans sa structure atomique, du magnésium. Les couches de Ca et de Mg sont en alternance suivant l'axe c de la dolomite. La dimension des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} n'est pas la même, soit des rayons ioniques de 0,99 et 0,66 Å respectivement; cela se traduit par une différence des distances interréticulaires des plans cristallographiques de ces minéraux. La dolomite devrait donc produire un spectre de diffraction différent de celui de la calcite, ce qui permettra de l'identifier.

3.2.1 Préparation de la poudre

La poudre soumise aux rayons X est obtenue par le broyage de fragments de la roche étudiée. En fait, quelques granulats ont été sélectionnés par quartage afin d'obtenir un échantillon représentatif, soit environ cinq particules de granulats. Un premier broyage a été fait à l'aide d'un marteau et d'une plaque d'acier tandis que la pulvérisation finale a été réalisée avec un mortier en agate. La première étape fournit des particules de 1 à 2 mm de diamètre. Le résultat du broyage avec le mortier est une fine poudre de roche dont la granulométrie varie de 5 à 30 μm selon le temps de broyage. Finalement, la poudre est placée dans un porte-échantillon en aluminium (ouverture de 18 mm \times 20 mm). Afin d'éviter une orientation préférentielle des cristaux, une lamelle dépolie (rugueuse) est disposée sous le porte-échantillon. La poudre est alors déposée dans l'ouverture du porte-échantillon et sur cette lamelle dépolie. Enfin, on appuie vigoureusement sur la poudre avec

une petite presse. La poudre tient seule en raison de sa finesse qui lui confère une forte cohésion interne.

3.2.2 Spectre de diffraction des rayons X

Le spectre de diffraction obtenu est montré à la figure 3.4. L'analyse a été faite sur un appareil de marque *RIGAKU Geigerflex* et les paramètres d'analyse sont donnés dans le tableau 3.2.

TABLEAU 3.2
PARAMÈTRES UTILISÉS POUR LA DIFFRACTION DES RAYONS X

Source des rayons X:	Cathode de cuivre
Filtre:	Nickel
Plage de balayage (2θ):	5° à 100°
Tension d'accélération:	40 kV
Courant de chauffage:	30 mA
Vitesse de balayage:	2°/min

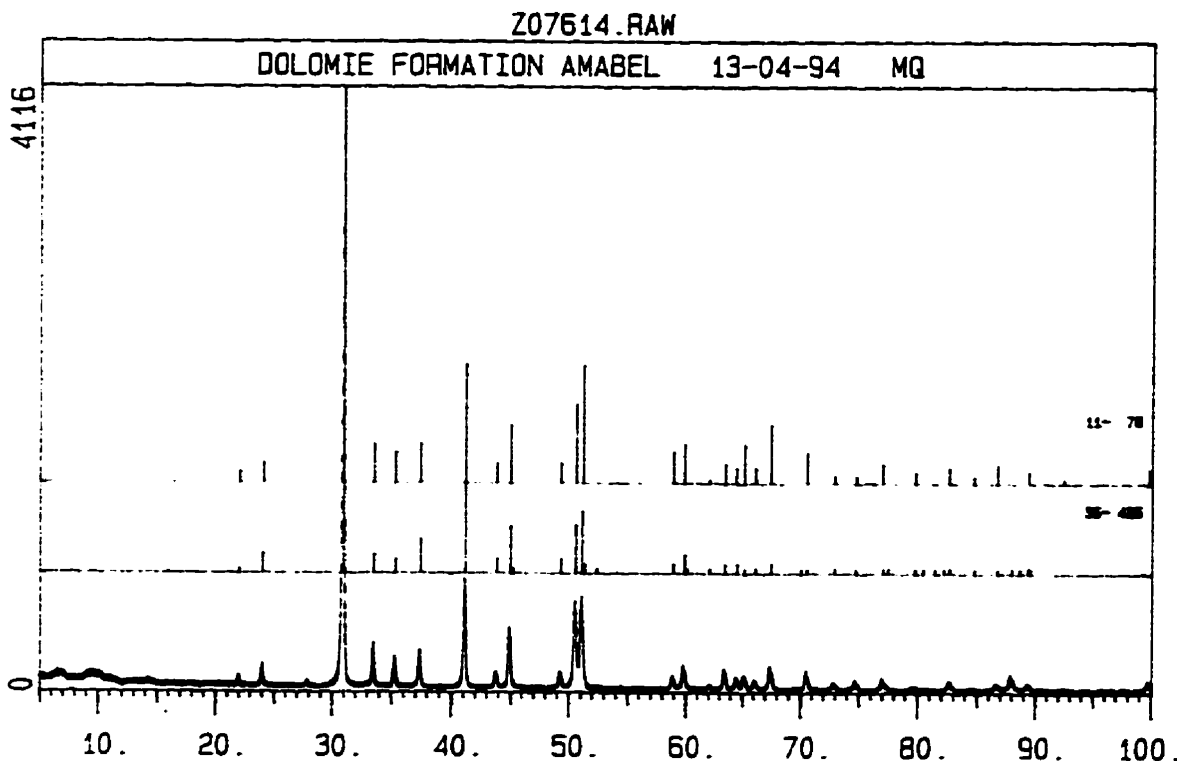


Figure 3.4 Spectre de diffraction des rayons X de la roche étudiée

Le spectre présente très peu de bruit de fond et les raies sont très bien définies. Les caractéristiques des diverses raies ont été obtenues à l'aide du *Peak finding program*. Le tableau 3.3 montre les paramètres des principales raies du spectre.

TABLEAU 3.3
PRINCIPALES RAIES DU SPECTRE DE DIFFRACTION DES RAYONS X

Raie #	2 θ degré	d Å	Intensité relative %
5	30.950	2.8870	100.0
10	41.150	2.1919	17.57
14	50.570	1.8035	14.82
15	51.120	1.7853	13.93
12	44.960	2.0146	9.80

L'étude des valeurs des distances interréticulaires et des intensités relatives a mené à l'identification de la substance, soit de la dolomite. La carte JCPDS correspondant à ce minéral est montrée à la figure 3.5.

36-426		★					
CaMg(CO ₃) ₂		d Å	Int	hkl	d Å	Int	hkl
Calcium Magnesium Carbonate Dolomite		4.033	1	101	1.3350	1	0012
		3.699	4	012	1.2970	1	217
		2.888	100	104	1.2698	1	0210
		2.670	4	006	1.2374	1	128
		2.539	3	015	1.2318	<1	306
Rad. CuK α λ 1.54178 Filter Mono. θ - ω Diff.		2.404	7	110	1.2022	1	220
Cut off Int. Diffractometer I/I_{002}		2.193	19	113	1.1935	<1	2011
Ref. Keller, L., McCarthy, G., North Dakota State University, Fargo, North Dakota, USA., JCPDS Grant-in-Aid Report, (1985)		2.065	3	021	1.1817	<1	1013
Sys. Rhombohedral (Hex) S.G. R $\bar{3}$ (148)		2.015	10	202	1.1729	<1	223
a 4.8052(2) b c 16.020(5) A C 3.3311		2.006	1	107	1.1672	1	1112
Ref. Ibid. α β γ Z 3		1.8473	3	024	1.1453	<1	312
D ₂ 2.86 D ₀₀₁ mp		1.8049	10	018	1.1228	1	2110
Color Tan		1.7870	13	116	1.1099	<1	134
Specimen from Baxter Springs, Arkansas, USA. Chemical analysis (by EDX at University of North Dakota) (wt.%): CaO 30.18, MgO 21.10, FeO 0.44, MnO 0.11, CO ₂ 47.18, Na ₂ O 0.17, Al ₂ O ₃ 0.13, SiO ₂ 0.47 (chiefly from traces of quartz and plagioclase). Structural formula: Ca(Mg _{0.977} Fe _{0.011} Ni _{0.003} Mn _{0.003} Ca _{0.004})(CO ₃) ₂ . Calcite group, dolomite subgroup. F ₀₀ = 148.1(.0063,32). Silicon used as internal standard. PSC: hR10. To replace 11-78.		1.7800	2	009	1.1034	<1	0114
		1.7461	<1	205	1.0963	1	226
		1.5667	2	211	1.0947	<1	309
		1.5446	4	122			
		1.5403	<1	027			
		1.4955	<1	1010			
		1.4652	2	214			
		1.4435	2	208			
		1.4308	1	119			
		1.4129	1	125			
		1.3885	2	300			
		1.3436	<1	303			

© JCPDS 1986 480

Figure 3.5 Carte JCPDS de la dolomite

Notons que l'intensité du pic #14 est de 14,82% tandis que la carte JCPDS présente pour un d de 1,8049 Å une intensité de 10%. La finesse de la poudre peut servir à expliquer cet écart dans les intensités relatives. KLUG & ALEXANDER (1974) ont observé que la granulométrie de la poudre a une grande influence sur les intensités mesurées. Pour une poudre de quartz de 15 à 50 μm , un écart maximum de 5,35% entre deux mesures a été observé comparativement à 0,42% pour une poudre de 5 μm . Un broyage prolongé peut réduire considérablement la dimension des particules, mais, dans la plupart des cas, il reste quelques particules plus grossières qui provoqueront une fluctuation des intensités. Enfin, dans le cas des matériaux cristallins mous, un broyage prolongé peut donner lieu à une déformation du réseau cristallin. La dolomite se place à 3,5 sur l'échelle de dureté de Mohs, ce qui représente un minéral relativement mou. Ce phénomène, combiné à l'erreur d'instrumentation, peut expliquer les légères différences observées au niveau des distances interréticulaires. Finalement, l'analyse permet de conclure que le minéral constituant la roche étudiée est de la dolomite.

3.3 Microscopie électronique à balayage (MEB)

Pour la caractérisation des microdiscontinuités de la dolomie étudiée, les possibilités d'un microscope électronique à balayage *JEOL JSM-840A* ont été exploitées. En plus d'atteindre un grossissement maximal de 300 000 fois, ce microscope permet de travailler à une tension d'accélération de 40 kV et est équipé de nombreux détecteurs. Toutefois, cette étude s'est limitée à des grossissements de 1 200 fois. Le MEB autorise des grossissements plus élevés que le microscope optique et, par sa profondeur de champ qui est de 30 à 40 fois supérieure à ce dernier, il offre donc une excellente résolution.

3.3.1 Préparation du granulat pour le MEB

Le granulat étudié au MEB est une particule d'environ 12 mm de diamètre. On l'a placé dans un moule, dans lequel on a versé de la résine époxyde. Après une période de séchage d'environ 24 heures, la pastille de résine a été sciée pour obtenir une section plane du granulat. Par la suite, le

polissage a été fait avec diverses solutions contenant de fines particules de diamant ainsi que différents tissus et papiers abrasifs. La procédure de polissage utilisée est celle mise en application au Département de génie chimique de l'Université de Sherbrooke.

Puisqu'il s'agit d'une substance non métallique, la surface du granulat a été métallisée afin de la rendre conductrice. Une mince couche d'un alliage d'or et de palladium (Au-Pd), d'environ 150 à 200 Å d'épaisseur, est évaporée à la surface de la section de granulat à l'aide d'un évaporateur *ANATECH Hummer-IV*. L'alliage est constitué de 80% d'or et 20% de palladium.

3.3.2 Caractérisation des microdiscontinuités

Le MEB offre, entre autres, la possibilité d'étudier les matériaux à partir de la détection d'électrons secondaires ou rétrodiffusés. Les électrons qui frappent la surface d'un échantillon interagissent avec la matière. En fait, deux types d'interactions peuvent se produire, soit des interactions élastiques ou des interactions inélastiques. L'excitation des atomes de la matière par un faisceau d'électrons donne lieu à l'émission d'électrons secondaires qui peuvent être facilement détectés et ainsi fournir une « image » du matériau. Lorsque les électrons du faisceau incident pénètrent un peu plus profondément dans la matière, cela donne lieu aux interactions inélastiques. Puisque les électrons incidents vont plus profondément, ils sont pour ainsi dire déviés par les électrons du matériau et suivent alors un trajet en zigzag dans le matériau. Certains seront absorbés, d'autres réussiront à traverser le matériau et certains vont s'échapper par la surface. Ces derniers sont des électrons rétrodiffusés (*backscattered electrons*).

Les paramètres indiqués dans le tableau 3.4 sont ceux utilisés pour l'observation des granulats. Ces paramètres ont permis d'obtenir des images nettes permettant l'étude des microdiscontinuités.

TABLEAU 3.4	
PARAMÈTRES DU MEB POUR L'ÉTUDE DES MICRODISCONTINUITÉS	
Électrons	Secondaires et rétrodiffusés
Tension d'accélération	20 kV
Courant de sonde	3×10^{-9} A
Distance de travail (<i>WD</i>)	35 à 39 mm

a) Observation en électrons secondaires

Il est relativement aisé, à partir d'images ou microphotographies obtenues à l'aide du MEB, de localiser les microdiscontinuités. Le contour des cavités et les changements abrupts de la topographie de la surface du matériau apparaissent généralement en blanc ou gris pâle. Dans ces zones, les électrons secondaires ont une plus grande surface pour s'échapper, ce qui donne cette « brillance » aux contours des microdiscontinuités. Le centre des fissures et des pores est souvent plus foncé puisque les électrons secondaires ne peuvent sortir des cavités pour atteindre le détecteur.

En ce qui a trait au granulat, ce dernier présente beaucoup de microdiscontinuités. On observe, à partir de la bordure du granulat, des ouvertures radiales (partant du bord vers le centre). À faible grossissement, les microdiscontinuités sont facilement détectées. En bordure du granulat, les microfissures peuvent atteindre 0,3 mm de largeur et cette largeur diminue à 0,1 mm en allant vers le centre. Quant à la longueur, celle-ci est variable (jusqu'à 2 mm à certains endroits). Les figures 3.6 et 3.7 montrent les microfissures observées dans le granulat. Sur les microphotographies, la résine servant de support est en gris plus foncé.

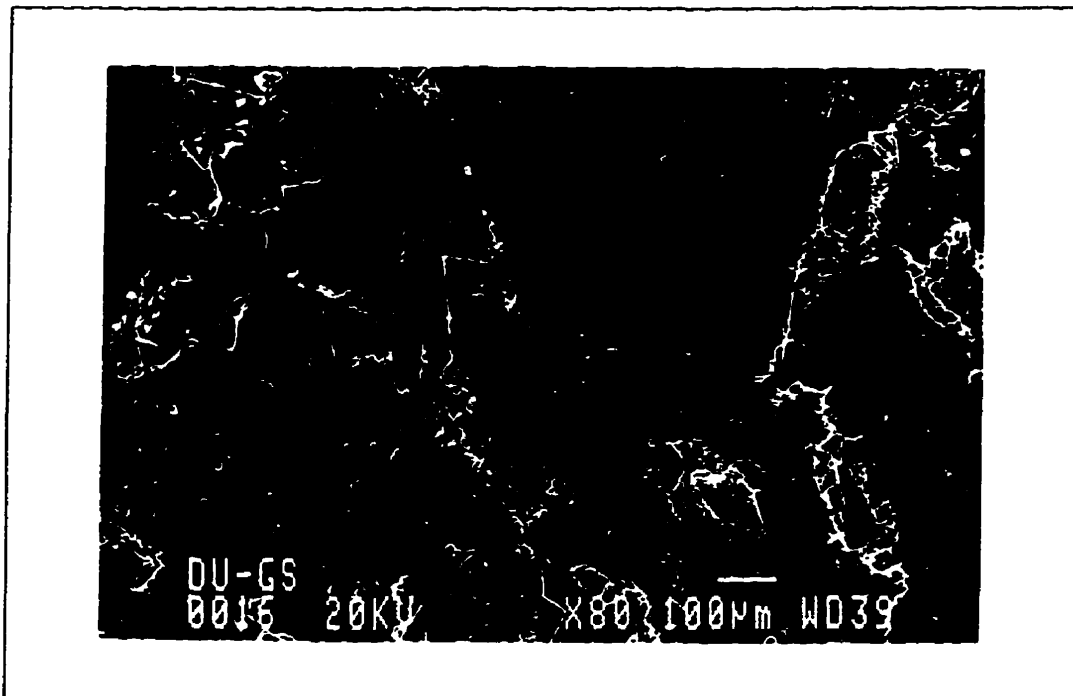


Figure 3.6 Microdiscontinuités dans le granulat de dolomie

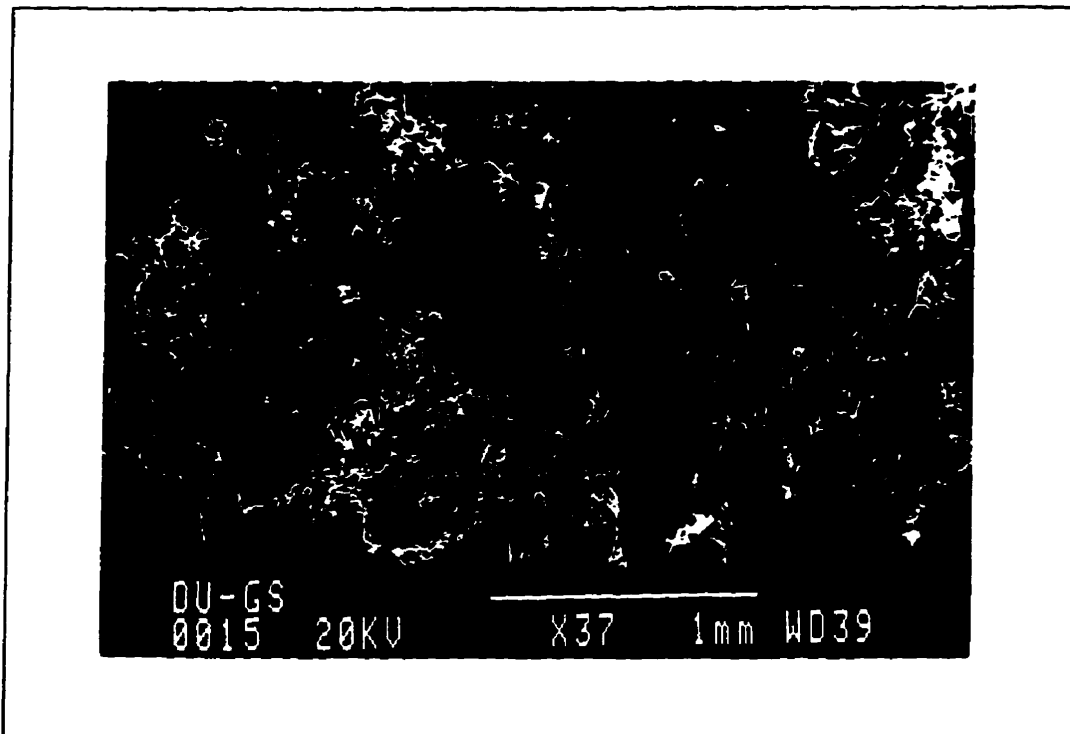


Figure 3.7 Microdiscontinuités dans le granulats de dolomie

L'étude des microdiscontinuités des granulats, à un grossissement un peu plus élevé (approx. $150\times$), révèle que leur trajet est dicté par le clivage des minéraux de dolomite. Les figures 3.8 et 3.9 montrent des fissures dont la direction est gouvernée par le clivage des minéraux.

La figure 3.10 montre, à un grossissement de $1200\times$, des cristaux de dolomite avec son clivage caractéristique. Il est possible de mesurer, directement sur la microphotographie, un angle de 108° (complément 72°). Ces clivages constituent des plans de moindre résistance dans la roche et c'est pourquoi les microdiscontinuités tendent à suivre ces directions préférentielles.

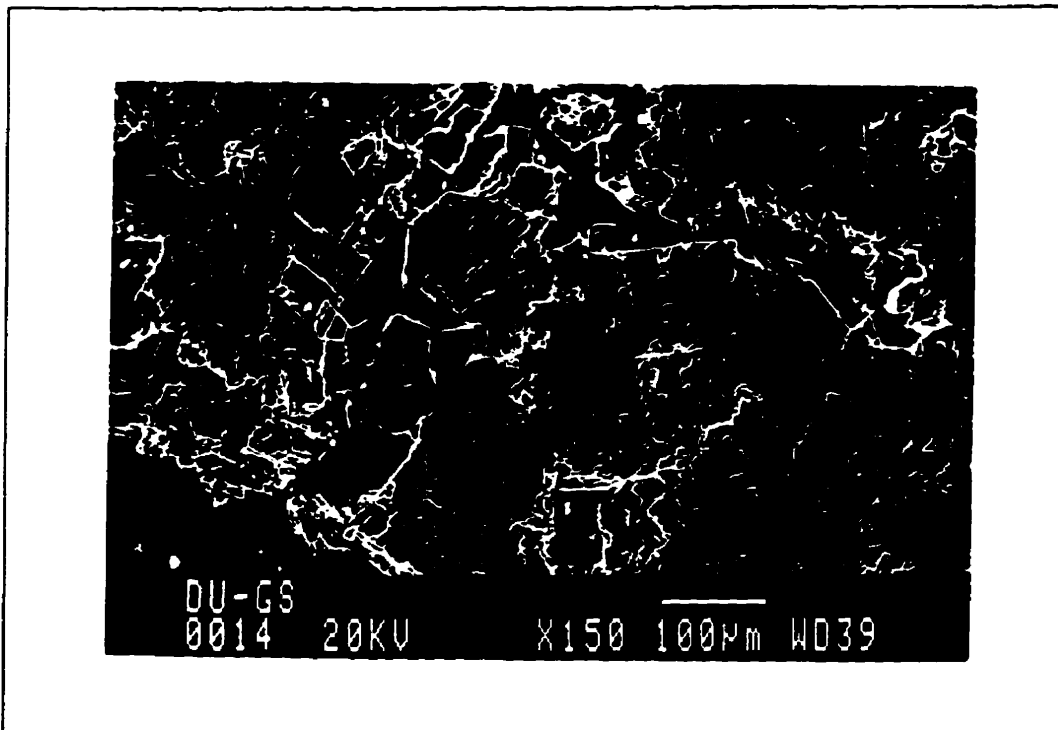


Figure 3.8 Vue agrandie d'une microdiscontinuité dans le granulat

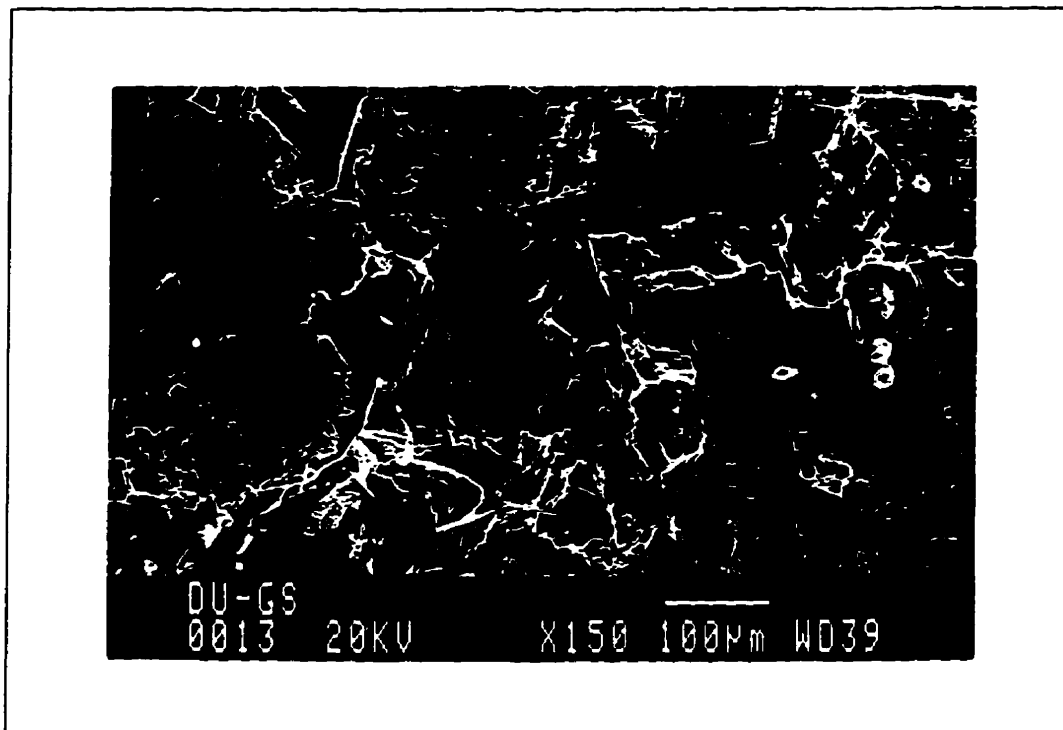


Figure 3.9 Vue agrandie d'une microdiscontinuité dans le granulat.

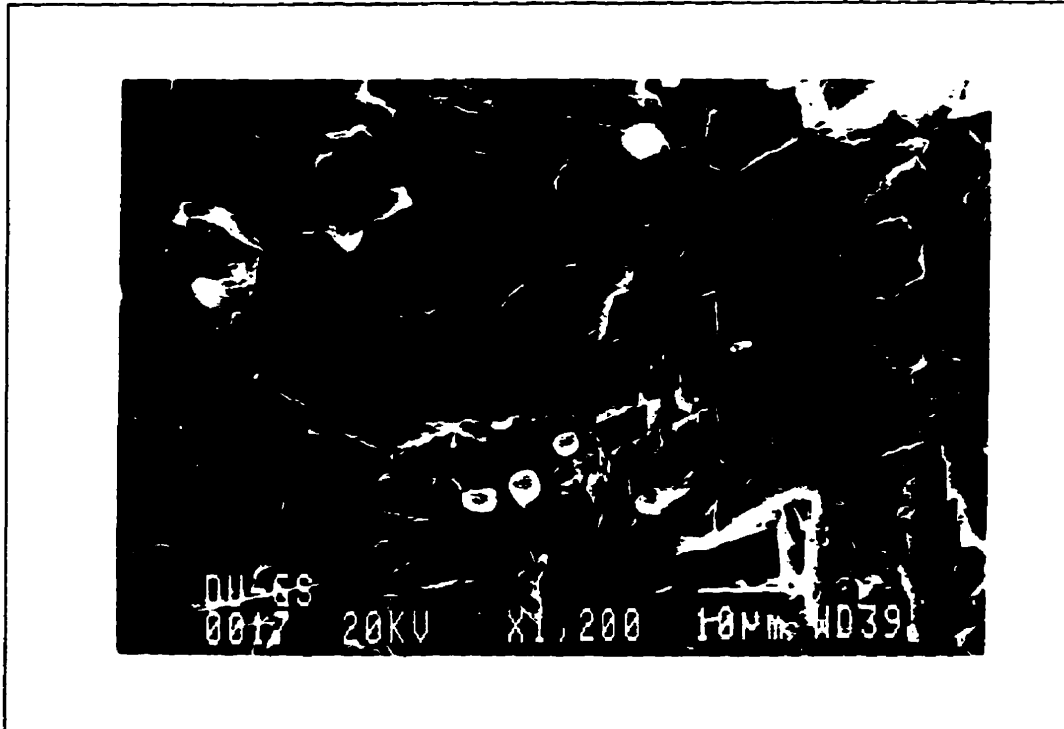


Figure 3.10 Clivage caractéristique de la dolomite

b) Observation en électrons rétrodiffusés

L'avantage de travailler avec les électrons rétrodiffusés est qu'ils permettent de bien distinguer les phases présentes dans un matériau. Les diverses phases composant un matériau sont généralement de composition chimique différente; par le fait même, chaque phase a un numéro atomique moyen qui la caractérise. Un matériau avec un numéro atomique élevé contient, dans sa structure atomique, un grand nombre d'électrons. Cela se traduit par la présence d'un fort champ électrostatique autour du noyau des atomes. Plus le nombre d'électrons dans le matériau est grand, plus la possibilité d'interactions inélastiques, avec les électrons du faisceau incident, est grande. Ainsi plus la proportion d'électrons rétrodiffusés par la matière sera élevée.

Dans le cas du granulat, on observe un excellent contraste entre les vides et la matrice carbonatée. Les photomicrographies des figures 3.11 et 3.12 montrent des parties du granulat observé en électrons rétrodiffusés. Notons que les vides n'ont pas été imprégnés d'un matériau quelconque et que le contraste est tout de même excellent.

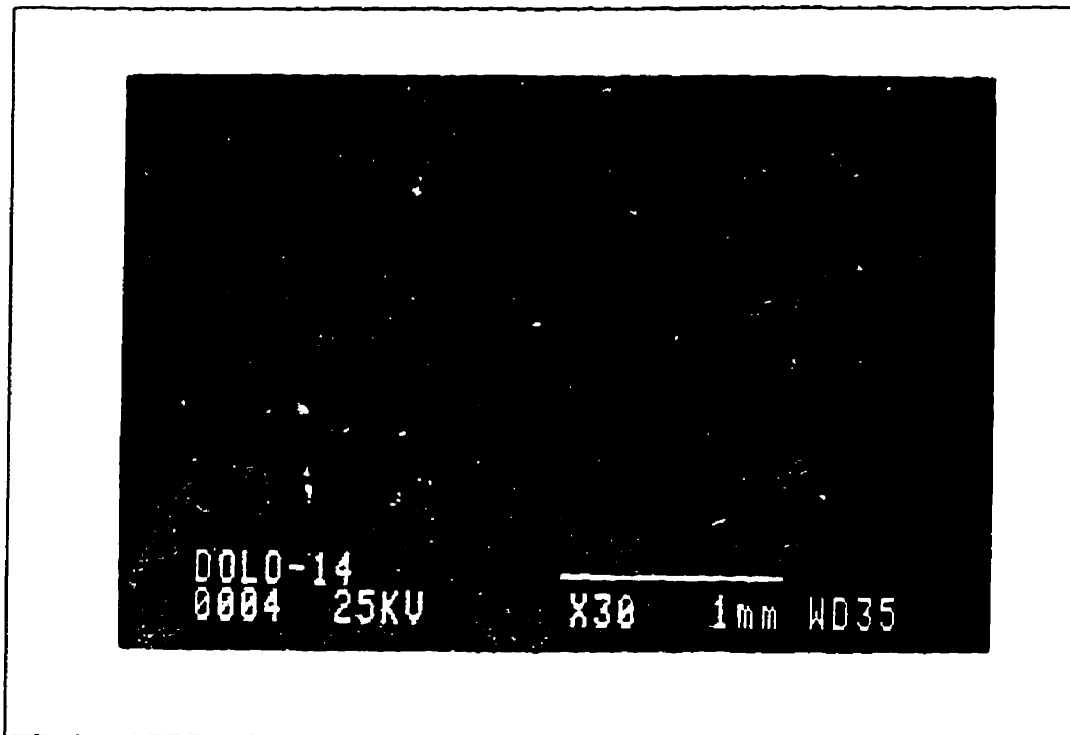


Figure 3.11 Microphotographie d'une section du granulat prise en électrons rétrodiffusés

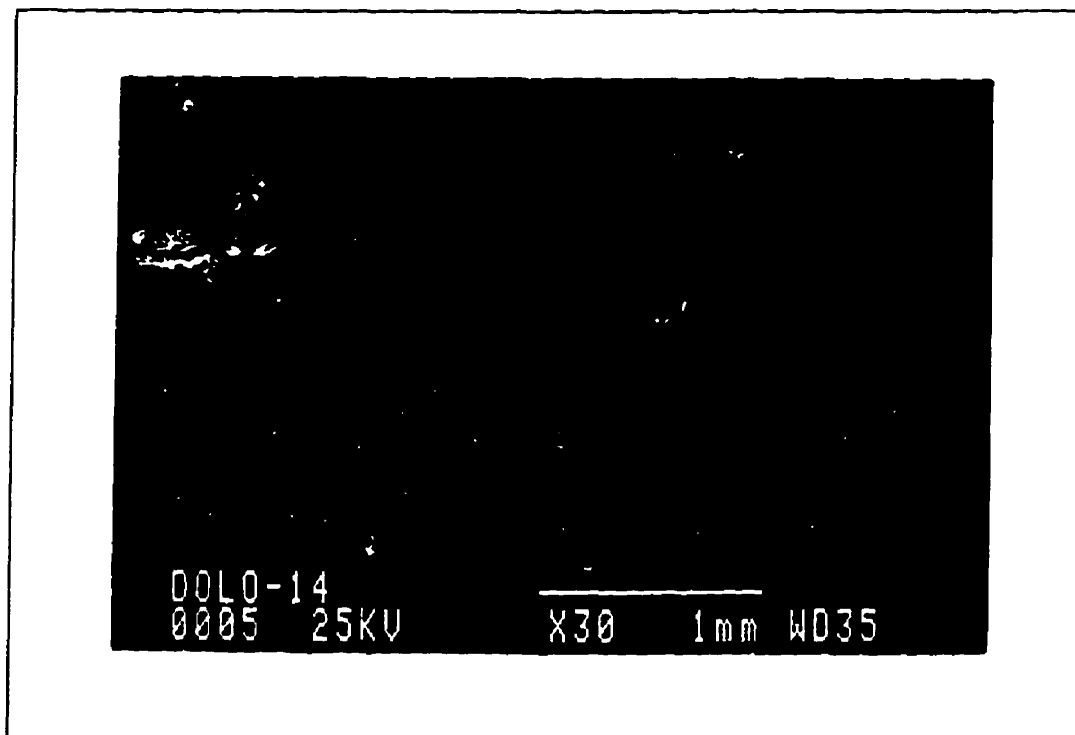


Figure 3.12 Microphotographie d'une section du granulat prise en électrons rétrodiffusés

3.4 Évaluation de la porosité du granulat

Dans le chapitre 2, diverses méthodes de mesure de la porosité des roches ont été définies. La présente section fait état des mesures de porosité par absorption d'eau et de porosimétrie au mercure.

3.4.1 Porosité par absorption d'eau

Un rapport publié par le Réseau de centres d'excellence sur les bétons à haute performance [BICKLEY, 1994] présente les résultats de divers essais effectués sur le granulat grossier de la *Milton Quarry*. L'étude présente, entre autres, les résultats de l'essai ASTM C127 - *Specific gravity and absorption of coarse aggregate*. Cet essai permet d'obtenir les différentes densités utiles au calcul de la porosité. Le tableau 3.5 présente les densités des granulats grossiers.

Densité brute (solide + vides)	2,68
Densité apparente (solide)	2,70
Densité sss	2,75
Absorption	1,04%

La porosité (n) peut être calculée à l'aide de l'équation 3-1, on obtient une porosité de 2,8%.

$$n = 1 - \left(\frac{\text{densité brute}}{\text{densité apparente}} \right) \quad (3-1)$$

3.4.2 Porosimétrie au mercure

Les essais de porosimétrie au mercure ont été effectués avec l'appareil du Département de génie civil de l'Université de Sherbrooke. Cet appareil permet de déterminer la granulométrie des pores

ainsi que le volume poreux. Toutefois, cet appareil est limité à une pression d'injection de 150 MPa, donc certains vides ne peuvent être détectés.

L'essai a été réalisé sur cinq particules de granulat d'environ 12 mm de diamètre, ce qui représente une masse de près de 20 g. L'essai donne un volume poreux de 10,3 mm³/g. On connaît la densité brute du granulat soit 2,67, ce chiffre représente aussi la masse volumique en g/cm³ si on assume que la masse volumique de l'eau est égale à 1,0 g/cm³. Il est possible de convertir le volume poreux de mm³/g à mm³/mm³ et ainsi obtenir une valeur de la porosité en pourcentage. Le calcul donne une porosité de 2,75%. En ce qui a trait à la dimension des pores, l'essai indique que ceux-ci ont des rayons variant de 0,01 µm à 6 µm.

Le rapport réalisé par le Réseau de centres d'excellence sur les BHP présente aussi des résultats de porosimétrie au mercure sur ce même granulat. La porosité des particules est de 3,5% et le diamètre des pores varie de 0,01 à 100 µm [BICKLEY, 1994]. Un appareil avec lequel on peut injecter le mercure à plus grande pression a probablement été utilisé, ce qui explique que les plus petits pores ont été comblés par le mercure, ce qui se reflète dans la valeur de la porosité.

3.4.3 Porosité théorique

GROLIER et coll. (1991) indiquent que l'on peut, pour une roche, déterminer une valeur théorique de la porosité. La porosité théorique est obtenue à partir de la masse volumique théorique de la partie solide (ρ_{th}) et de la masse volumique brute de la roche. L'équation 3-2 permet de calculer la porosité théorique:

$$n_{th} = \frac{\rho_{th} - \rho_{obs}}{\rho_{th}} \quad (3-2)$$

n_{th} : porosité théorique

ρ_{th} : masse volumique théorique

ρ_{obs} : masse volumique observée ou brute

En admettant que la masse volumique de l'eau est égale à l'unité, les valeurs de densité du tableau 3.5 sont aisément converties en masses volumiques; la masse volumique observée est donc de $2,67 \text{ g/cm}^3$. Pour ce qui est de la masse volumique théorique de la portion solide de la roche, on trouve celle-ci dans la plupart des livres traitant de minéralogie. Le granulat étudié est essentiellement composé de dolomite dont la masse volumique est de $2,85 \text{ g/cm}^3$ [HURLBUT et coll, 1985]. On obtient, d'après l'équation 3-2, une porosité théorique de 6,3%.

3.5 Synthèse de la caractérisation

Les résultats des diverses étapes de cette étude ont permis de déterminer la nature de la roche analysée et de montrer la présence de microdiscontinuités dans une particule de granulat concassé. La roche examinée est une dolomie poreuse, à grains fins à moyens. Le clivage des cristaux de dolomite fut nettement observé. Par ailleurs, le granulat observé au MEB est poreux et contient de nombreuses microdiscontinuités dont le cheminement semble souvent imposé par le clivage. Les analyses montrent que les granulats ont une porosité de 3,5% et que la porosité théorique est plus élevée soit environ de 6%. Puisque cette dernière est calculée à partir de la masse volumique brute, basée sur l'infiltration de l'eau dans les pores, il est possible que la porosité réelle soit plus élevée.

Les limites des diverses méthodes de mesures ont été mentionnées au chapitre 2. De plus, on a indiqué que l'analyse d'images constitue une méthode dont l'approche est très différente de celle des méthodes par infiltration de fluides. Les chapitres qui suivent sont consacrés à l'étude et à l'application des techniques d'analyse d'images dans l'étude de la structure du granulat dolomitique concassé.

CHAPITRE 4

Analyse d'images et stéréologie

L'analyse d'images trouve ses fondements dans les diverses théories mathématiques telles la géométrie intégrale, les probabilités géométriques et la morphologie mathématique. L'application des diverses notions de ces concepts mathématiques permet de décrire quantitativement des images de toutes sortes. En fait, il existe deux catégories d'analyse d'images, soit la reconnaissance de formes et l'analyse quantitative d'images. La première catégorie consiste en une simple identification des formes observées dans un but souvent purement décisionnel. La seconde catégorie s'intéresse cependant à la morphologie des structures et, plus encore, elle trouve sa finalité dans la quantification de cette morphologie par divers paramètres. Ces derniers pourront être corrélés avec les propriétés de la structure.

Les applications de l'analyse d'images sont nombreuses. COSTER & CHERMANT (1989) citent plusieurs disciplines utilisant l'analyse d'images, en voici quelques-unes:

- science des matériaux: métallurgie, céramique, ...;
- sciences de la Terre: texture des roches, géologie structurale, ...;
- sciences de la vie: biologie, botanique, ...;
- géographie: télédétection, géomorphologie, cartographie, ...

L'analyse d'images comprend trois étapes qui sont l'acquisition, le traitement et l'analyse de l'image. Les premières étapes doivent évidemment être faites avec grands soins, car en dépend la qualité et la justesse de l'analyse ultérieure.

À chacune de ces étapes est associée une séquence d'opérations ou de transformations; celles-ci sont indiquées à la figure 4.1 et seront décrites plus en détail dans les sections suivantes.

Quelle que soit l'image observée, l'analyse se fera toujours dans un espace à deux dimensions R^2 . Pour ce qui est de l'analyse quantitative d'image, l'intérêt de l'utilisateur sera porté vers une quantification des structures observées dans le plan R^2 , mais aussi vers une extrapolation des mesures dans l'espace R^3 . Notons bien que l'image d'un matériau est une projection sur un plan ou l'intersection par un plan d'une structure tridimensionnelle; seuls les paramètres morphologiques définis dans R^3 ont un sens physique. La stéréologie, qui sera abordée dans la section suivante, donne, entre autres, les relations entre les paramètres mesurés dans un sous-espace de R^3 et les paramètres de R^3 [CHERMANT & COSTER, 1987].

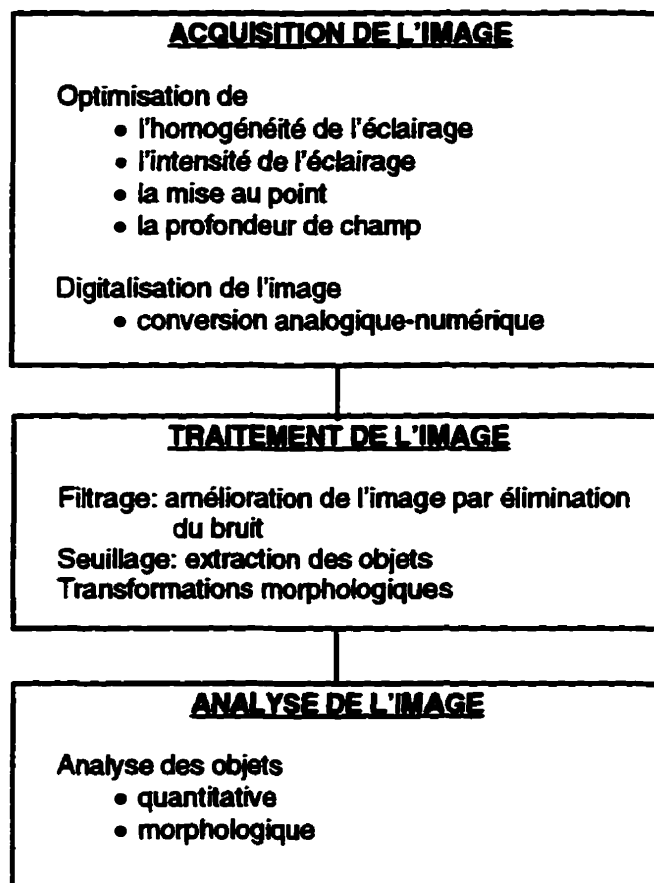


Figure 4.1 Les principales étapes de l'analyse d'images

4.1 Acquisition d'une image

Les images peuvent être classées en deux groupes, soit les images obtenues avec une caméra photonique et les images issues de sources diverses telles les microscopes électroniques à balayage, les images acoustiques, etc. Dans tous les cas, l'image doit être convertie; les systèmes d'acquisition fournissent une image analogique qui, afin d'être enregistrée dans la mémoire du système d'analyse d'images, doit être numérisée.

Pour effectuer l'acquisition d'une image, on dispose l'image réelle sous une caméra à transfert de charge dite caméra CCD (*Charge Coupled Device*). La caméra est en fait un système de vision artificielle qui capte l'intensité lumineuse émise en tout point de l'espace. Ce capteur possède une certaine sensibilité et il ne relève pas toute l'information présentée par l'image; l'intensité lumineuse doit être supérieure à un seuil minimum et inférieure à la saturation de la caméra pour que l'information soit détectée [LAFON, 1989]. Le capteur est en fait un condensateur et les photons génèrent des charges lorsqu'ils frappent ce condensateur. Le transfert de charge, proportionnel à l'intensité lumineuse, est détecté et transformé en énergie électrique [COSTER & CHERMANT, 1989]. On obtient un signal analogique, à la sortie du capteur, qui est une représentation simplifiée de l'image sous la forme d'une fonction de deux variables, soit l'intensité lumineuse en fonction de la position dans l'espace (Fig. 4.2). Le signal est acheminé vers un écran qui fournit une image où les intensités lumineuses sont représentées par des teintes de gris.

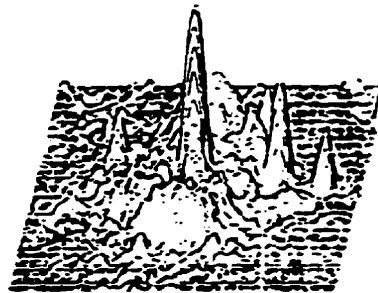


Figure 4.2 Fonction continue représentant une image en niveaux de gris

Les systèmes de traitement d'images, en fait les analyseurs d'images, ne peuvent faire d'opérations sur des fonctions continues, mais sur des tableaux de nombres. La numérisation d'une image consiste à convertir l'image analogique en image numérique [LAFON, 1989]. Pour ce faire, on utilise un convertisseur analogique-numérique qui transforme l'image analogique en image numérique. Généralement, la numérisation en tons de gris s'évalue en bits, c'est-à-dire en puissance de 2; les images en 256 niveaux de gris sont codées sur 8 bits ($2^8 = 256$). Afin d'obtenir un ensemble discret (tableau de nombres), qui représente l'image, on doit diviser le plan image. Chaque ligne balayée par le capteur est séparée en segments d'égale longueur appelés pixels.

Une image est une structure continue de variation locale de luminance. Cependant, il est possible d'obtenir une image visuellement équivalente en la considérant comme la juxtaposition de petites surfaces lumineuses sur chacune desquelles la luminance est constante. Étant donné que ces surfaces sont très petites, l'oeil ne les distingue pas individuellement, il effectue un lissage des discontinuités [GOUSSOT, 1987]. Chacune des petites surfaces qui forment l'image s'appelle un point image ou un *pixel* (*PIC*ture *E*LEMENT). Chaque pixel est caractérisé par trois valeurs entières soit la position (i, j) et la valeur du niveau de gris, valeur qui varie de 0 à 255 (Fig. 4.3).

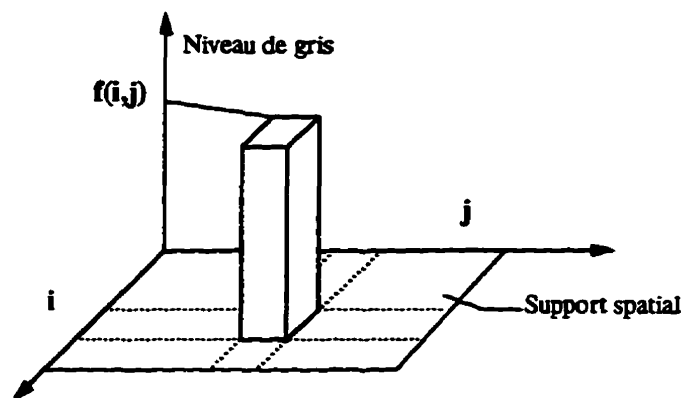


Figure 4.3 Représentation d'une image dans l'espace discret (d'après MISIS)

Notons que, lors de la numérisation, les pixels peuvent être disposés selon une trame carrée ou hexagonale. Afin d'expliquer cette notion de trame, on prendra comme exemple un signal physique quelconque tel qu'illustré à la figure 4.4. Un signal physique peut être défini par une fonction du temps. La variable temps varie de façon continue. Le signal est dit analogique [BEAUFILS & RAMI, 1988].

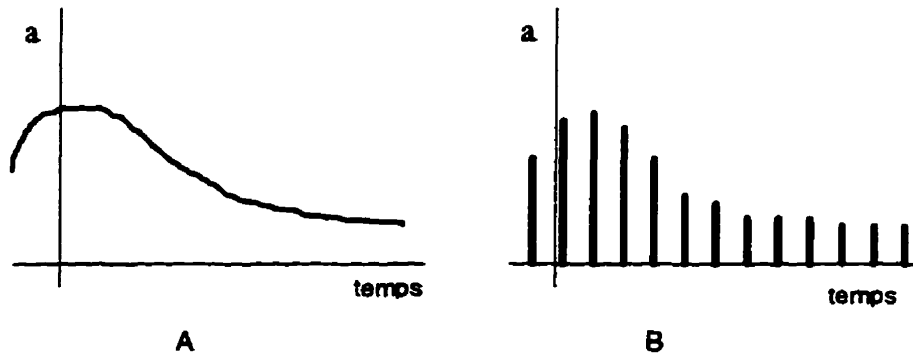


Figure 4.4 A- signal à temps continu (analogique); B- signal à temps discret

Ce signal analogique peut être traité de deux façons:

- par un système de traitement analogique qui opère directement sur le signal;
- par un système de traitement numérique qui travaille sur des nombres.

Dans le second cas, on utilise un convertisseur qui transforme les données d'entrée en une suite de nombres. Le convertisseur ne conservera que quelques valeurs du signal d'entrée (Fig. 4.4b) et cela pour un pas de temps donné. Ce découpage permet la transformation du signal continu en une série de valeurs discrètes: c'est l'opération d'*échantillonnage*.

Dans le cas d'une image, on réalise une partition du plan image en superposant une grille de points dont la trame sera carrée ou hexagonale (Fig. 4.5). Cette partition du plan est en fait un échantillonnage.

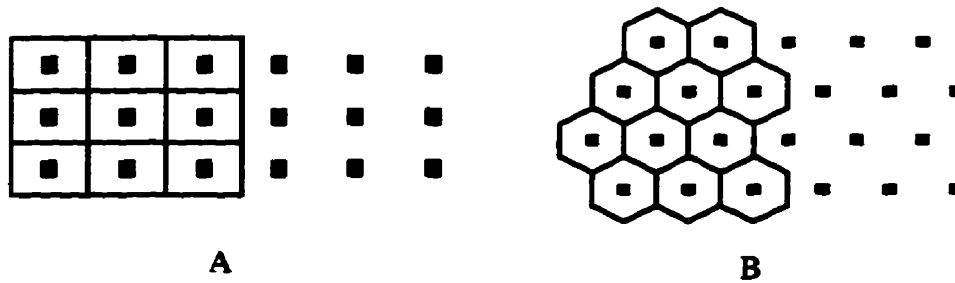


Figure 4.5 Les trames les plus couramment utilisées en analyse d'images A- trame carrée B- trame hexagonale (d'après Lafon, 1989)

Selon l'analyse effectuée, ces trames présenteront certains avantages et inconvénients qui devront être évalués par l'utilisateur. Ces trames nous amènent à considérer la notion de graphe. NIORTHE (1994) indique que le graphe donne, non seulement la position des points de la trame, mais il définit aussi les règles de voisinage des pixels entre eux. Cela permet de savoir si les objets d'une image sont en contact ou non. En ce qui a trait à la maille carrée, les graphes les plus communément employés sont le graphe carré (connexité 4), dans ce graphe, les quatre pixels les plus proches sont pris en compte. Pour le graphe octogonal (connexité 8), tous les pixels entourant le pixel choisi sont pris en compte (Fig. 4.6). Il existe, bien sûr, des graphes pour le réseau hexagonal.

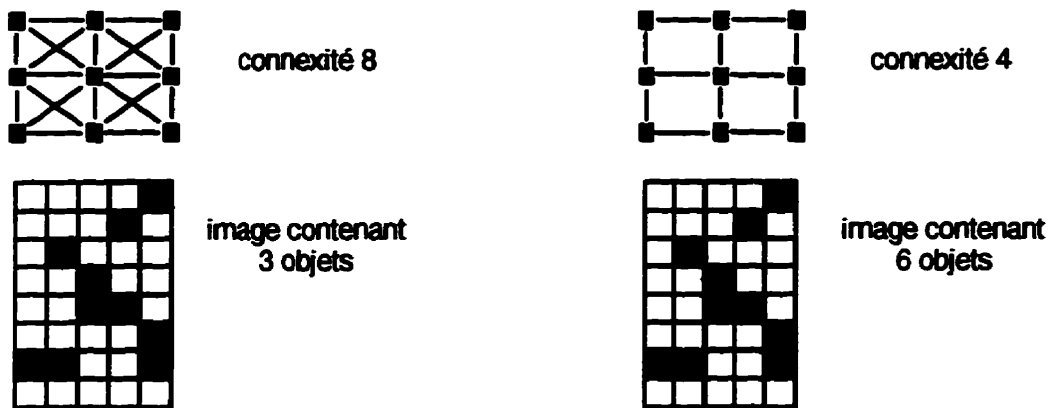


Figure 4.6 Différents graphes pour le réseau carré et relation entre les objets dans chacun des graphes (d'après Niorthe, 1994). En connexité 8, les pixels ayant un sommet en commun sont connexes tandis qu'en connexité 4, les pixels ayant un sommet en commun ne sont pas connexes.

Une fois les points disposés sur le plan, ils devront être codés pour que l'ordinateur puisse manipuler les données associées à chaque pixel. L'accès aux voisins d'un point donné doit se faire implicitement, c'est-à-dire par le biais d'une structure de données sous forme matricielle et non pas explicitement en spécifiant l'adresse de chaque voisin [CHASSERY & MONTANVERT, 1991]. La trame carrée et la trame hexagonale permettent d'utiliser une structure matricielle. Dans le cas de la trame carrée, le codage est assez facile puisque la structure est identique à celle de la matrice. L'image discrète de taille $N \times N$ pixels est codée par une matrice de même taille où i est l'indice de ligne et j est l'indice de colonne. Pour un point (i, j) , en connexité 4, ses voisins ont pour coordonnées: $(i-1, j)$, $(i+1, j)$, $(i, j-1)$ et $(i, j+1)$.

En ce qui a trait à la trame hexagonale, on fait la translation d'une ligne sur deux sur une distance égale à un demi-côté d'hexagone vers la droite. On obtient, grâce à cette translation, une structure matricielle. Toutefois, les voisins sont les mêmes qu'avant la translation. Pour les lignes d'indice pair, le point P de coordonnées (i, j) a pour voisins les points $(i, j+1)$, $(i, j-1)$, $(i-1, j)$, $(i+1, j)$, $(i-1, j-1)$ et $(i+1, j-1)$; pour les lignes d'indice impair, P a pour voisins les points de coordonnées $(i, j+1)$, $(i, j-1)$, $(i-1, j)$, $(i+1, j)$, $(i-1, j+1)$ et $(i+1, j+1)$. La figure 4.7 montre le codage pour le maillage carré et hexagonal.

4.2 Traitement des images

Les images contiennent généralement beaucoup de détails et d'informations qui ne seront pas toutes utiles lors de l'analyse; l'image doit en quelque sorte être simplifiée afin de ne présenter ou de ne mettre en évidence que les éléments pertinents pour l'analyse. CHERMANT & COSTER (1987) signalent qu'on ne peut généralement extraire directement les objets à analyser soit parce que:

- l'objet est perçu à travers un bruit assez important;
- le contraste est insuffisant;
- l'éclairement de l'objet ou son attaque n'est pas uniforme.

Il serait bon, à ce stade, de distinguer les deux types d'images sur lesquelles on travaille en analyse d'images soit les *images en niveaux de gris* et les *images binaires*. Comme on l'a vu, une image numérique est formée de pixels dont on connaît la position et auxquels on associe une valeur de niveau de gris; c'est ce qu'on appelle une image en niveaux de gris. Ce type d'image doit, en général, être filtré afin de l'améliorer et cela pour les quelques raisons mentionnées plus haut.

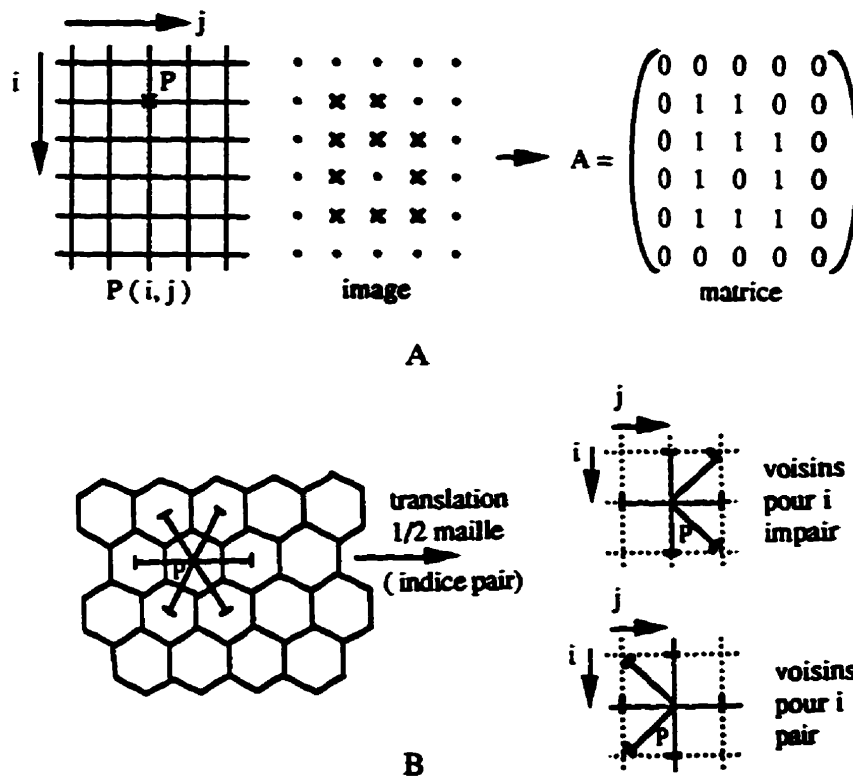


Figure 4.7 A- Maillage carré et codage matriciel, B- Maillage hexagonal et codage matriciel (d'après Chassery et Montanvert, 1991).

Cependant, les images en niveaux de gris, bien qu'elles aient subi un *filtrage*, ne peuvent être exploitées directement puisqu'elles contiennent encore trop d'information. Il faut effectuer un *seuillage* qui transforme celles-ci en des images binaires. L'image binaire n'est constituée que de deux niveaux soit, 0 (noir) et 1 (blanc) et les pixels de valeur 1 correspondent aux objets et ceux de valeur 0 au fond (il n'y a pas de convention à ce sujet, cela dépend des analyseurs d'images). Le seuillage permet donc de mettre en évidence les éléments d'une image qui intéressent l'utilisateur et sur lesquels il veut effectuer diverses mesures (Fig. 4.8).

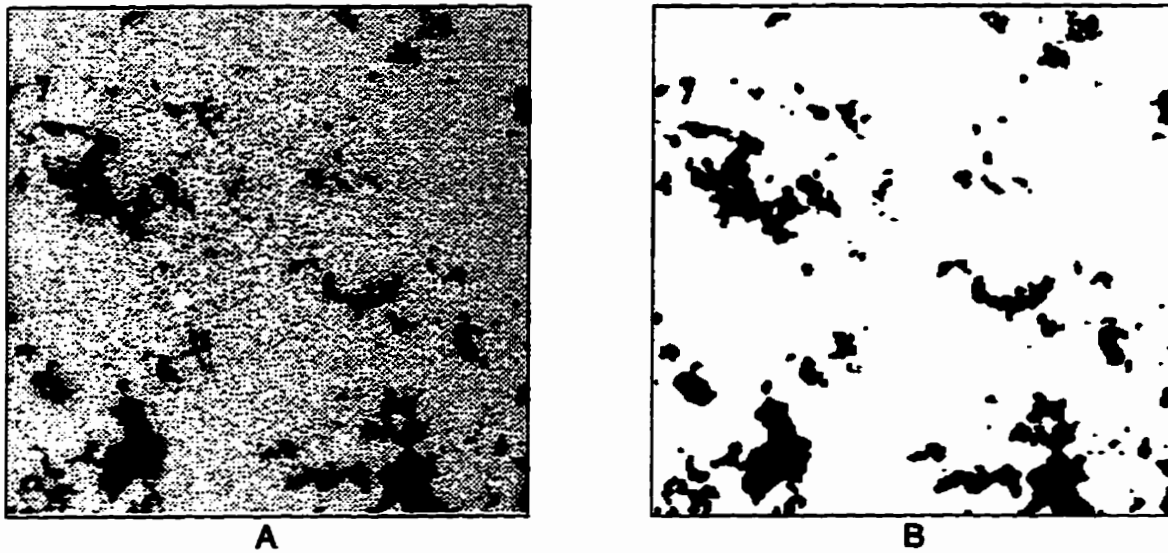


Figure 4.8 A- Image en niveaux de gris d'une partie du granulat où les zones foncées correspondent aux vides, B- Image binaire de l'image A (seuls les pores sont visibles sur l'image binaire)

Les figures ci-dessus sont des représentations qui se rapprochent beaucoup de l'image d'origine, du moins pour ce qui est de l'image en niveaux de gris. Une image numérisée est une série de valeurs, variant de 0 à 255, distribuées dans le plan; il est alors possible de représenter l'image par un *histogramme des niveaux de gris*. Un tel histogramme (Fig. 4.9) donne la fréquence de chaque niveau de gris d'une image. Dans le cas d'une image binaire, l'histogramme ne donne que le nombre de pixels allumés (1) ou éteints (0).

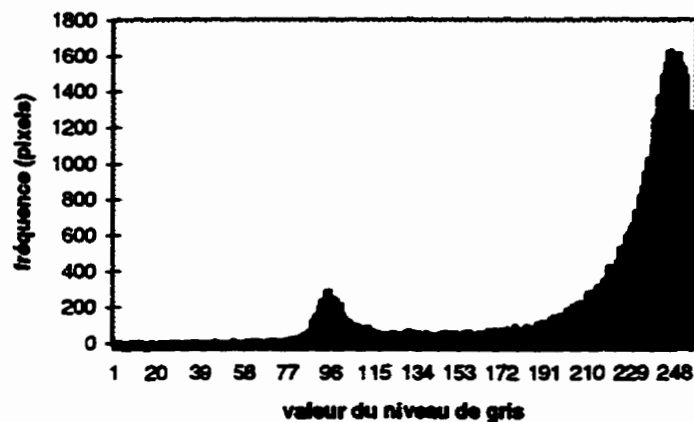


Figure 4.9 Histogramme des niveaux de gris de l'image du granulat de la figure 4.8A

4.3 Amélioration des images

4.3.1 Table de transcodage (LUT)

Une LUT (*Look Up Table*) est une fonction qui transforme un niveau de gris i en niveau de gris j (Fig. 4.10). Il s'agit simplement d'établir une correspondance entre un niveau de gris initial et un niveau de gris final; cette correspondance est faite en utilisant une fonction f que l'on appelle une LUT. Cette transformation du niveau de gris d'un pixel donné ne fait pas intervenir les pixels voisins, il s'agit là d'une transformation ponctuelle [TOUMAZET, 1987].

Une LUT transforme l'histogramme des niveaux de gris et permet, par exemple, de mettre en évidence les niveaux de gris d'un intervalle donné ou encore d'éliminer certaines classes de niveaux de gris. La fonction qui permet d'établir la correspondance entre le niveau de gris initial et le niveau de gris final peut prendre diverses formes soit exponentielle, inverse, logarithmique, etc. Cette transformation est appelée une *anamorphose* [COSTER & CHERMANT, 1989].

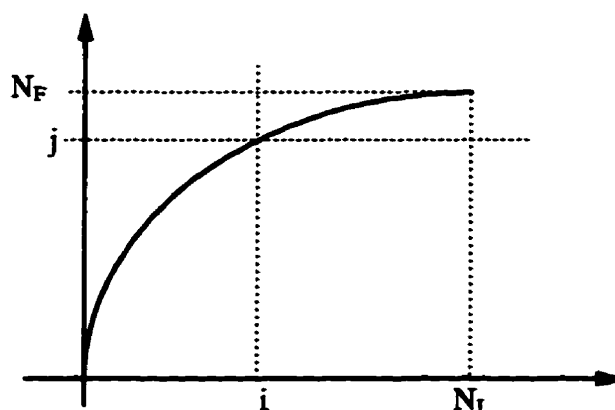


Figure 4.10 Définition d'une LUT (d'après Toumazet, 1987)

4.3.2 Filtrage

L'acquisition d'une image se fait à l'aide d'un capteur (caméra) et la numérisation est effectuée par un convertisseur. Ces appareils sont des assemblages de composants électroniques qui altèrent généralement l'image par un bruit. Ce bruit électronique va se manifester par une variation

des niveaux de gris de certains pixels qui seront plus ou moins éloignés de la valeur du gris réel. Généralement, dans une image, la variation des niveaux de gris d'un pixel à un autre est progressive, c'est-à-dire que l'environnement d'un pixel donné est relativement homogène en termes de niveaux de gris. Selon TOUMAZET (1987), on peut associer le bruit à une impulsion, soit un bruit affectant de brusques variations à des pixels isolés. Fort de ces observations, on arrive à dire que, pour contrer le bruit, il faut effectuer la correction des pixels affectés en tenant compte de leurs voisins. Les méthodes permettant d'atténuer le bruit sont les techniques dites de *filtrage*.

4.3.3 Seuillage

Le seuillage est une méthode qui permet de transformer une image en niveaux de gris en une image binaire. Cette étape est essentielle en analyse d'images, car elle permet de mettre en évidence les objets sur lesquels les mesures seront effectuées. Étant donné l'importance du seuillage, celui-ci a été étudié plus en détail à la section 4.6.

4.4 Méthodes de filtrage

COSTER & CHERMANT (1989) mentionnent qu'il existe trois catégories de filtres:

- les filtres linéaires;
- les filtres morphologiques;
- les filtres adaptatifs.

Seuls les filtres linéaires et adaptatifs seront décrits dans cette section. Les filtres morphologiques consistent en des opérations d'érosion et de dilatation sur des images en niveaux de gris. Ces opérations morphologiques seront définies pour les images binaires (section 4.7.3).

4.4.1 Filtrés linéaires

Il existe deux types de filtres linéaires soit le filtrage par transformée de Fourier et le filtrage par produit de convolution. Ces filtres sont grandement utilisés en traitement du signal ils ont d'ailleurs été développés pour des applications dans ce domaine.

La transformation d'un pixel par filtrage linéaire est le résultat d'une combinaison linéaire des pixels voisins. Une caractéristique importante des filtres linéaires est qu'ils sont des produits de convolution. Soit une fonction f , il existe une fonction h permettant de calculer la fonction transformée Tf . Le produit de convolution de deux fonctions est noté de la façon suivante:

$$Tf = f \otimes h \quad (4-1)$$

Ce produit de convolution peut être écrit:

$$f(x) \otimes h(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x+y)h(y)dy \quad (4-2)$$

Dans le cas où l'on travaille sur une image, qui est un espace discret, on peut réécrire ce produit en une somme discrète, soit:

$$\sum_{l=-n}^n \sum_{k=-n}^n f(i+k, j+l)h(k,l) \quad (4-3)$$

où on associe à x la position (i, j) qui est fixe et à y la position (k, l) qui varie selon le voisinage considéré et pratiquement $n = [1, 2, \text{ou } 3]$.

a) Filtrage par transformée de Fourier

La transformée de Fourier est bien connue dans le domaine du traitement du signal. L'application d'une telle méthode de calcul en analyse d'images n'est peut-être pas aussi évidente que dans le

cas d'un signal à une dimension (variation avec le temps). Ce dernier type de signal est utilisé dans la plupart des appareils électroniques modernes.

La transformée de Fourier est utilisée pour montrer des structures périodiques présentes dans les images. L'algorithme utilisé pour le calcul de la transformée de Fourier est appelé transformée de Fourier rapide (ou FFT pour *Fast Fourier Transform*). Lorsque l'on effectue la transformée de Fourier rapide d'une image, l'image transformée qui en résulte est un spectre de puissance (*power spectrum*). L'interprétation des spectres de puissance est assez complexe et, surtout, il faut être familier avec ce type de traitement pour réussir à bien interpréter les spectres obtenus. La présence de structures périodiques dans une image se traduira par des points ou concentrations de point sur le spectre de puissance. Quant au filtrage, puisque les FFT permettent de détecter les structures périodiques (souvent imperceptibles à l'oeil), les bruits de fond de nature périodique pourront être mis en évidence et soustraits de l'image d'origine. Les notions mathématiques sur la transformée de Fourier et de nombreux exemples d'images et de leurs spectres de puissance sont exposés dans le chapitre 5 de l'ouvrage de RUSS (1995).

b) Filtrage et fonction de voisinage

Comme mentionné plus haut, le filtrage linéaire se fait par produit de convolution. En présence d'une image en niveaux de gris $f(x)$, on peut choisir une fonction de voisinage $V(x)$, centrée en un point x , qui permettra de calculer $g(x)$ le résultat du filtrage:

$$g(x) = f(x) \otimes V(x) \quad (4-4)$$

Dans une image, un pixel donné (noté x_0) possède plusieurs voisins. On note les pixels voisins x_i et la valeur de la fonction est $f(x_i)$. Le produit de convolution se calcule comme suit:

$$g(x) = \sum_{i=0}^n f(x_i) V(x_i) \quad (4-5)$$

Dans le cas de la trame carrée en connexité 8, on a:

x_4	x_3	x_2
x_5	x_0	x_1
x_6	x_7	x_8

Par exemple, pour le cas suivant où:

$$f(x) = \begin{bmatrix} 3 & 5 & 9 & 5 & 2 \\ 5 & 4 & 8 & 1 & 6 \\ 4 & 5 & 3 & 5 & 3 \\ 8 & 7 & 1 & 6 & 5 \end{bmatrix}$$

et la fonction de voisinage:

$$V(x) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

on obtient le produit de convolution après normalisation:

$$g(x) = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 5 & 5 & 5 & \cdot \\ \cdot & 5 & 4 & 4 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix}$$

Puisque la convolution résulte ici d'une sommation de valeurs, on obtient alors des valeurs relativement élevées. On effectue alors une pondération par l'inverse de la somme des coefficients de la fonction de voisinage, lorsque cette somme est différente de zéro, d'où:

$$g(x) = \frac{\sum_{i=0}^n f(x_i) V(x_i)}{\sum_{i=0}^n V(x_i)} \tag{4-6}$$

Il y a quelques fonctions types de voisinages qui sont communément utilisées pour le filtrage des images. Le tableau 4.1 présente une synthèse de ces fonctions.

4.4.2 Filtres adaptatifs

Il existe divers types de filtre adaptatif soit le filtrage par la médiane et le filtrage par le plus proche voisin radiométrique. Ces derniers constituent ce qu'on appelle des filtres d'ordre.

a) Filtrage par la médiane

Soit le voisinage suivant:

avant filtrage médian

$$\begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 4 & 2 & 1 \\ 3 & 2 & 5 \end{bmatrix}$$

après filtrage médian

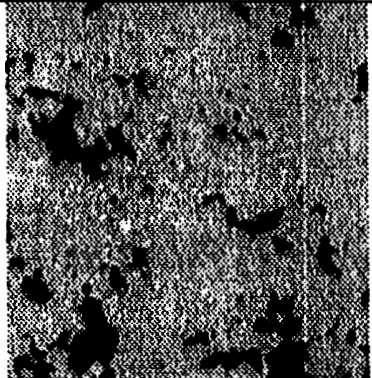
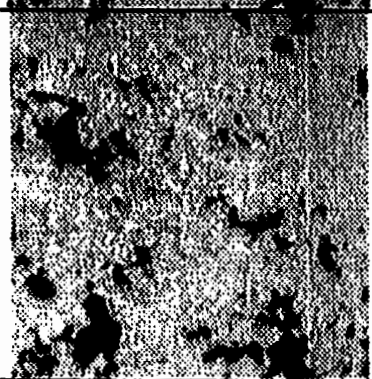
$$\begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 3 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix}$$

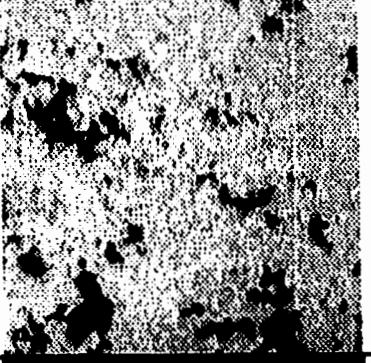
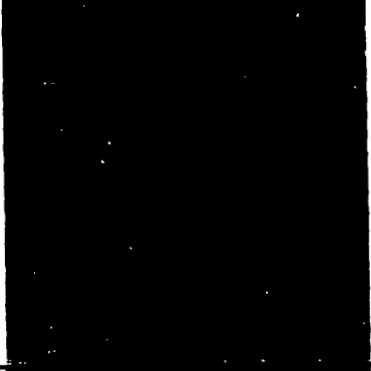
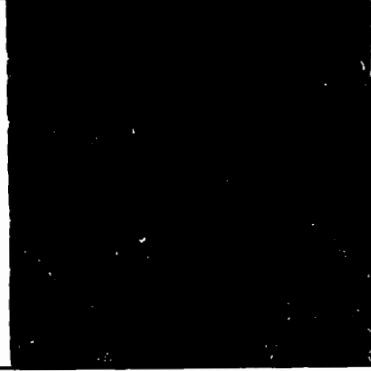
On classe par ordre croissant les valeurs du voisinage, 1, 1, 2, 2, 3, 3, 4, 5, 5 et on affecte au pixel central du voisinage la valeur médiane, soit 3. Il est à noter que ce type de filtrage a été utilisé pour le traitement des images du granulat.




b) Filtrage par le plus proche voisin radiométrique

Soit le même voisinage que ci-dessus, on doit tout d'abord choisir un nombre k de pixels qui servira à modifier le pixel central. Par exemple, si $k = 5$, on doit prendre cinq pixels voisins du pixel central et dont les valeurs se rapprochent le plus de celle de ce pixel central. On aura donc $(1+1+2+3+3)/5 = 2$, on affectera la valeur 2 au pixel central. Dans ce cas, la valeur reste la même.

TABLEAU 4.1
EXEMPLES DE FILTRES LINÉAIRES POUR L'AMÉLIORATION DES IMAGES

Filtre	V(x)	Description	Résultat du filtrage
Moyen	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	<ul style="list-style-type: none"> • filtre de type passe-bas • permet de diminuer le bruit sur une image • le pixel central est pris avec le même poids que les pixels voisins 	
Moyen	$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$	<ul style="list-style-type: none"> • filtre de type passe-bas • permet de diminuer le bruit sur une image • le poids des pixels voisins est inversement proportionnel à leur distance du pixel central 	

Médian	voir sect. 4.4.3	<ul style="list-style-type: none"> • Filtre d'ordre • Permet de diminuer le bruit de fond • Conserve la qualité du contraste entre les objets et le fond • Utilise la valeur médiane du voisinage et non la moyenne 	
Gradient vertical	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$	<ul style="list-style-type: none"> • filtre de type passe-haut • met en évidence les gradients de gris positifs suivant l'axe des y • permet l'extraction des contours des objets 	
Gradient horizontal	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$	<ul style="list-style-type: none"> • filtre de type passe-haut • met en évidence les gradients de gris négatif suivant l'axe des x • permet l'extraction des contours des objets 	

<p>Laplacien en connexité 4</p>	$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & -4 & 1 \\ 1 & 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	<ul style="list-style-type: none"> • filtre de type passe-haut • permet l'extraction des frontières d'objets • invariant par rotation • favorise les points isolés provenant du bruit 	
<p>Laplacien en connexité 8</p>	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	<p><i>idem</i></p> <p>Laplacien en connexité 4</p>	
<p>Sobel</p>	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$	<ul style="list-style-type: none"> • filtre de type passe-haut • filtre de type gradient • calcule le gradient dans les 2 directions (x, y) • donne un effet de lissage • rotation possible des matrices 	

4.5 Description de quelques filtres

4.5.1 Filtres de type gradient

Le filtre gradient permet d'accentuer le contour des objets d'une image. Dans une image en niveaux de gris, on remarque les contours grâce à la transition entre les niveaux de gris (de pâle à foncé ou vice-versa). L'application d'un filtre gradient a pour effet de mettre à noir les zones à niveau de gris constant et de mettre à blanc les zones à fort contraste soit les contours des objets d'une image. L'image obtenue à la suite d'un tel filtrage ne présente que le contour des objets dans une direction donnée, ces filtres sont dits directionnels, car ils peuvent être appliqués dans les 8 directions de la trame carrée.

Ces filtres sont reliés à des fonctions dérivées de la fonction de gris $f(x)$ [COSTER & CHERMANT, 1989]. Dans le cas d'une fonction continue bidimensionnelle, le gradient est donné par:

$$\nabla f(x, y) = \frac{\partial f}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial f}{\partial y} \vec{j} \quad (4-7)$$

Dans le cas discret, pour une image par exemple, le gradient peut être obtenu par la convolution d'un masque, c'est-à-dire d'une fonction de voisinage. Le filtre gradient est directionnel, on peut obtenir, entre autres, le gradient horizontal et le gradient vertical. Les fonctions de voisinage sont les suivantes:

gradient horizontal

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

gradient vertical

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Il existe d'autres filtres gradients qui font intervenir diverses fonctions de voisinage lors du filtrage par convolution. Notons, entre autres, les filtres Sobel, Prewitt et Kirsch. Tous ces filtres gradients ne seront pas présentés dans ce document, le lecteur est invité à consulter l'ouvrage de PRATT (1991) et de COSTER & CHERMANT (1989).

4.5.2 Filtres de type laplacien

Le filtre laplacien permet d'accentuer les contours des objets d'une image en niveaux de gris. Tout comme le filtre gradient, les contours sont détectés grâce à la transition entre des zones pâles et foncées. Toutefois, le laplacien n'est pas directionnel, on dira qu'il est invariant par rotation. Dans le cas d'une fonction continue, le laplacien est défini par:

$$\Delta f(x, y) = \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} \quad (4-8)$$

Pour ce qui est du cas discret, les fonctions de voisinage qui permettent de calculer le laplacien sur une image sont indiquées dans le tableau 4.1. La dérivation de ces fonctions de voisinage s'inspire de celle du gradient.

4.6 Méthodes de seuillage

Le seuillage est une étape nécessaire dans tout processus d'analyse d'images. Le seuillage consiste simplement à classer les pixels d'une image en deux groupes. L'un des groupes contiendra les pixels appartenant aux objets de l'image et l'autre groupe les pixels constituant le fond de l'image. Les groupes de pixels sont formés en se basant sur la valeur des niveaux de gris de chaque pixel; l'un des groupes contiendra les pixels ayant des valeurs de niveau de gris supérieures à un niveau donné. Ce niveau est appelé **seuil**. Quant à l'autre groupe, il renferme les pixels dont la valeur de niveau de gris est égale ou inférieure au seuil. Remarquons que c'est grâce au seuillage que l'on obtient les images binaires.

La plupart des méthodes de seuillage exploitent l'histogramme des niveaux de gris de l'image afin d'établir le seuil. Le cas idéal, est celui d'une image ayant un fort contraste entre le fond et les objets de l'image. Une telle image présentera un histogramme bimodal, c'est-à-dire que l'on détectera deux pics, que l'on appelle modes, sur l'histogramme.

L'un des modes représente les objets de l'image et l'autre le fond. La petite image de la figure 4.11 est une partie du granulat de la *Milton Quarry*, on montre aussi l'histogramme des niveaux de gris de cette image.

Sur un tel histogramme, le seuil est choisi au point le plus bas entre les modes (« vallée »). Il s'agit là d'un cas simple, toutefois les histogrammes des niveaux de gris ne sont pas toujours aussi bien définis [TSAÏ, 1985]. Dans l'histogramme de la figure 4.11, le seuil peut être choisi à n'importe quel endroit entre les niveaux de gris 115 et 170. Si l'on fait l'étude de plusieurs images et que le choix du seuil est fait de façon arbitraire, il se peut que le résultat du seuillage soit un peu différent pour chaque image. Dans ce cas, il est difficile de faire des comparaisons ou corrélations entre les images. Si le seuillage est différent, les images n'ont alors pas subi un traitement équivalent. Il existe des méthodes de seuillage, basées sur les statistiques, appelées méthodes de seuillage automatique. Ces méthodes permettent de réaliser le seuillage d'une image à l'aide d'un algorithme qui sera le même pour toutes les images seuillées avec la méthode statistique choisie. L'avantage d'utiliser le seuillage automatique est que les images sont toutes traitées de la même façon. La figure 4.12 est une fonction d'évaluation de l'histogramme, elle sera expliquée plus loin.

4.6.1 Seuillage manuel

Le seuillage peut se faire de manière interactive, c'est-à-dire que l'utilisateur regarde l'image en même temps qu'il fait varier la valeur du seuil. De cette manière, il voit immédiatement, à l'écran, le résultat du seuillage de l'image pour la valeur du seuil donnée. Cette façon de faire est très subjective.

4.6.2 Seuillage automatique

Comme mentionné auparavant, le seuillage automatique est basé sur les méthodes de classification statistique. Le seuil n'est donc plus choisi par l'utilisateur, mais il est plutôt le résultat d'un calcul statistique fait à l'aide de divers algorithmes. Ces derniers utilisent l'histogramme des niveaux de gris de l'image.

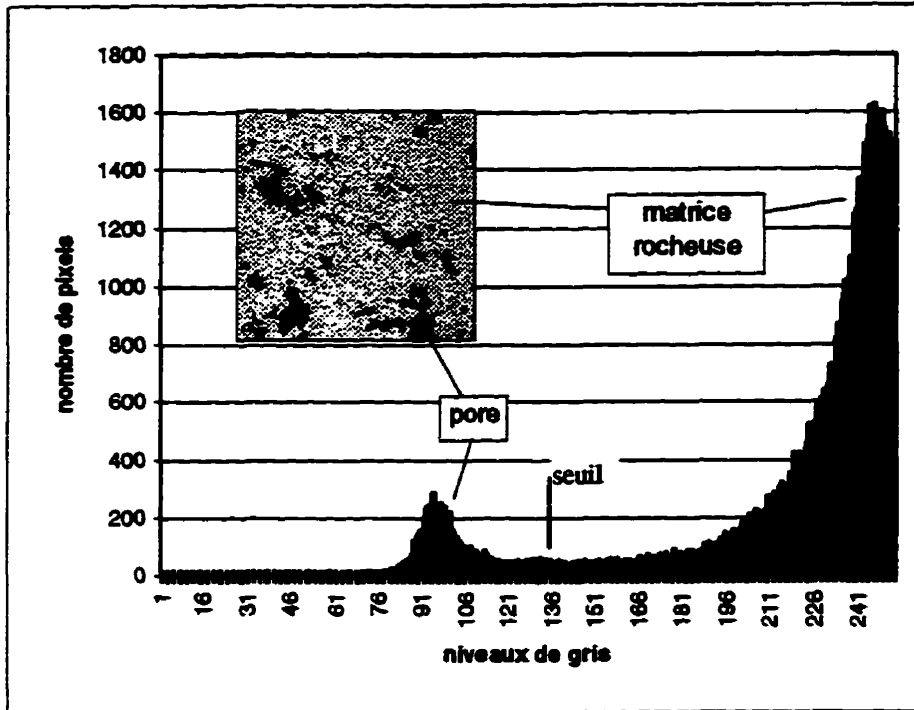


Figure 4.11 Image d'une partie du granulat à l'échelle 30 × et l'histogramme des niveaux de gris de l'image

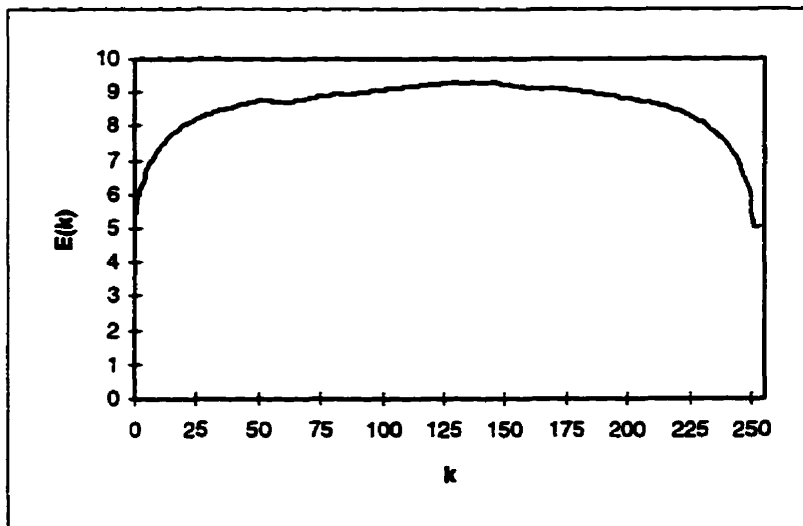


Figure 4.12 Fonction d'évaluation de l'entropie de l'histogramme de la figure 4.11

Il existe actuellement plusieurs méthodes de seuillage automatique et l'utilisateur doit maintenant faire le choix d'une méthode de seuillage qui sera efficace pour le cas étudié. Toutes les méthodes de seuillage automatique ne sont pas applicables à un cas donné; de plus, le seuillage automatique peut tout simplement ne pas être applicable.

Les méthodes de seuillage automatique les plus utilisées actuellement sont les suivantes:

- variance interclasse;
- entropie;
- nuées dynamiques;
- préservation des moments;
- métrique.

Selon le cas étudié, c'est-à-dire l'image étudiée, le seuillage pourra être effectué à l'aide de l'une de ces méthodes. De toutes les méthodes mentionnées ci-haut, une seule sera décrite en détail soit l'entropie. L'objectif ici est de décrire une méthode relativement simple afin de montrer le concept du seuillage automatique. Le lecteur est invité à consulter l'ouvrage de COSTER & CHERMANT (1989), thèse de PINOLI (1987) ainsi que divers livres de statistique pour obtenir plus de détails concernant les autres méthodes de seuillage.

a) Seuillage par entropie

Le lecteur sait maintenant que l'histogramme des niveaux de gris n'est pas toujours bimodal. La recherche de « vallées » dans l'histogramme peut ne pas être fructueuse. Il existe donc d'autres méthodes pour résoudre le problème du seuillage lorsque l'on fait face à un histogramme comme celui de la figure 4.13.

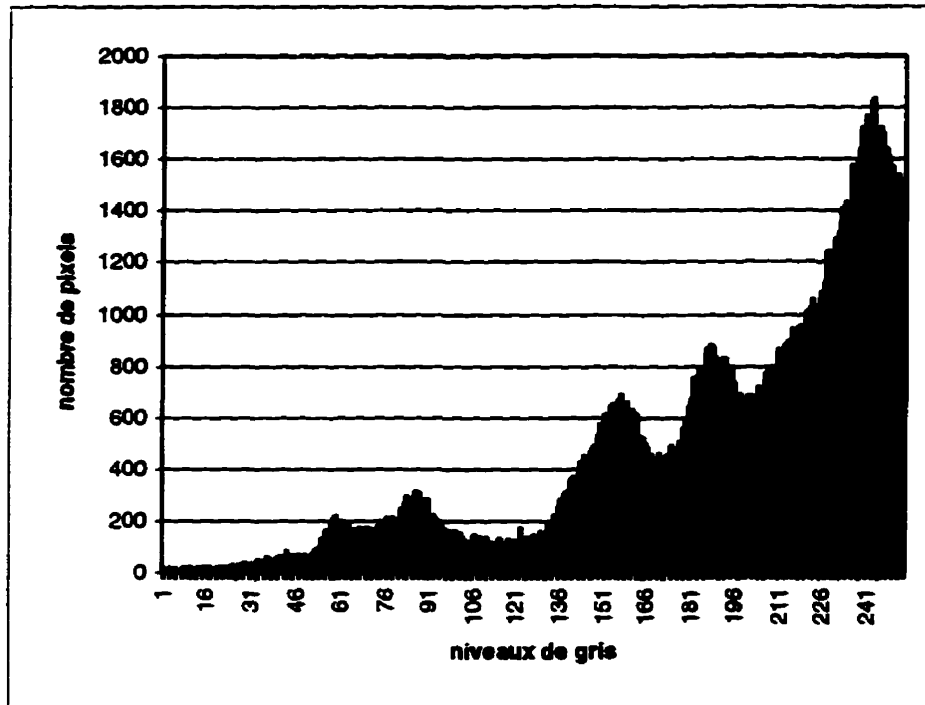


Figure 4.13 Histogramme multimodal des niveaux de gris d'une image

L'entropie de l'histogramme constitue une méthode qui peut être efficace pour le seuillage d'une telle image. Les formules statistiques de base, utilisées pour le seuillage par entropie de l'histogramme, sont décrites ci dessous [PINOLI, 1987; KAPUR et coll., 1985].

Soit une image formée de N pixels, elle peut être représentée par un histogramme des fréquences (f) des niveaux de gris (i). Ceci signifie donc que $f(i)$ est le nombre de pixels ayant le niveau de gris (i). La probabilité qu'un pixel a d'avoir le niveau de gris (i) est donc donnée par:

$$p_i = \frac{f_i}{N} \quad (4-9)$$

Supposons que les pixels d'une image soient divisés en deux classes C_0 et C_1 séparées par un seuil k . La classe C_0 contient alors les pixels dont le niveau de gris est compris dans l'intervalle $[0, k]$ tandis que la classe C_1 renferme les pixels compris dans l'intervalle $[k+1, n]$. La probabilité qu'un pixel donné appartienne à C_0 ou à C_1 est donnée par:

$$p(C_0) = \sum_{i=0}^k p_i \quad (4-10)$$

$$p(C_1) = \sum_{i=k+1}^n p_i \quad (4-11)$$

Deux distributions, $p(C_0)$ et $p(C_1)$, ont donc été définies (éq. 4-10 et 4-11). L'entropie de ces distributions est alors donnée par les équations 4-12 et 4-13. On notera la forme de ces équations qui s'apparente bien à celle de l'entropie telle que définie en thermodynamique.

$$H(C_0) = - \sum_{i=0}^k p(i/C_0) \ln[p(i/C_0)] \quad (4-12)$$

et

$$H(C_1) = - \sum_{i=k+1}^n p(i/C_1) \ln[p(i/C_1)] \quad (4-13)$$

Notons aussi que $p(i/C_j)$ représente la probabilité conditionnelle $p_i / p(C_j)$ [$j= 1, 2$].

$$E(k) = H(C_0) + H(C_1) \quad (4-14)$$

Toutes ces équations permettent de calculer la fonction $E(k)$ (éq. 4-14) dont le maximum constituera la valeur du seuil, on maximise donc l'entropie. On ne fera pas ici la démonstration de ces équations. Le lecteur, dont l'intérêt se porte plus particulièrement sur l'algorithme du seuillage par entropie, pourra consulter divers ouvrages de statistiques ainsi que les ouvrages traitant de la théorie de l'information exposée par SHANNON¹.

Afin de vérifier l'algorithme de seuillage par entropie, un programme, en langage TURBOPASCAL, a été élaboré. Ce programme s'appelle Entropie (Annexe C). Ce programme permet de calculer les valeurs de la fonction $E(k)$ et ainsi de déterminer la valeur k pour laquelle la fonction est maximum (soit le seuil). Afin d'utiliser le programme Entropie, il faut une image et les valeurs de niveaux de gris de cette image; l'image d'une partie du granulat a donc été utilisée (voir l'image de la figure

¹ Voir *Encyclopaedia Universalis* sous la rubrique Information

4.11). À partir des valeurs de niveau de gris de l'image (histogramme), le programme calcule la fonction $E(k)$. La mise en graphique de cette fonction, à la figure 4.12, permet de voir le maximum de cette fonction ($k=135$), c'est-à-dire l'entropie maximale. La valeur de k pour laquelle $E(k)$ est maximum constitue le seuil et il a été reporté à la figure 4.11. On remarque qu'il se situe bien dans la « vallée » de l'histogramme bimodal. En résumé, le seuil obtenu par seuillage par l'entropie de l'image étudiée est 135. Les pixels ayant un niveau de gris inférieur à 135 seront forcés à prendre une valeur 0 (noir) et ceux ayant une valeur supérieure à 135 prendront la valeur 1 (blanc). Cette opération conduit à la formation de ce qu'on appelle l'image binaire ou encore l'image « seuillée ». Le résultat du seuillage est l'image binaire de la figure 4.8.

Dans le cas des images de la dolomie concassée (image complète du granulat), la méthode de seuillage automatique utilisée est appelée méthode des nuées dynamiques. Cette méthode statistique est fondée sur la recherche de centre de gravité de groupes de points d'un nuage de points. Les résultats obtenus avec cette méthode se rapprochent beaucoup de ceux obtenus avec l'entropie. La méthode des nuées dynamiques permet d'obtenir un meilleur seuillage des images du granulat surtout en ce qui a trait à l'élimination des points isolés. Une comparaison des valeurs de seuil obtenues entre l'entropie et les nuées dynamiques sera présentée au chapitre 5.

4.7 Opérations sur les images binaires

Le résultat du seuillage d'une image en niveaux de gris est l'image binaire. Comme on l'a vu précédemment, l'image binaire se présente en deux niveaux, soit noir et blanc. Généralement, l'image binaire fait ressortir en blanc (ou noir) les objets sur lesquels les mesures seront effectuées. Sur ce type d'image, il est possible de réaliser diverses opérations qui vont améliorer l'image. Il faut bien noter que le filtrage et le seuillage peuvent ne pas éliminer tout le bruit de fond présent sur l'image initiale. Certains objets indésirables peuvent alors être éliminés afin de corriger l'image. Les opérations sur les images binaires permettent, entre autres, d'effectuer les opérations suivantes:

- opérations manuelles (ajouter ou éliminer des pixels);
- opérations logiques sur les images afin de combiner les images;
- opérations morphologiques telles l'érosion, la dilatation l'ouverture et la fermeture.

Les opérations usuelles, sur les images binaires, sont de type morphologique, c'est-à-dire qu'elles modifient la forme de l'objet, soit afin de l'homogénéiser ou encore pour éliminer certains objets indésirables. La dilatation, l'érosion, sont des transformations fondamentales qui trouvent leurs racines dans les théories de la morphologie mathématique et la théorie des ensembles. Disons simplement que la morphologie mathématique repose sur le principe consistant à comparer la structure inconnue, soit l'objet étudié (forme quelconque), à une forme, l'**élément structurant**, dont toutes les caractéristiques sont bien connues (carré, cercle). Les objets de l'image et les éléments structurants sont donc des ensembles que l'on comparera à l'aide d'opérations ensemblistes telles l'inclusion, l'intersection. Ces fondements théoriques ne seront pas abordés en détail, le lecteur est invité à consulter l'ouvrage de SERRA (1982) et de l'ouvrage de SCHMITT & MATTIOLI (1994). Les sections suivantes seront plutôt vouées à la description des opérations morphologiques sur les images binaires.

4.7.1 Opérations manuelles

La façon la plus simple de modifier une image binaire est d'aller directement sur l'image et d'activer ou de désactiver (mettre à blanc ou à noir) des pixels de l'image. Cela est possible avec la « souris » sur l'analyseur d'images. Ce type d'opération sera utile pour connecter ou déconnecter les objets. Il est à noter que l'altération ou la transformation manuelle des images n'est pas efficace pour modifier un grand nombre de pixels, il s'agit là d'un traitement qui nécessiterait beaucoup trop de temps.

4.7.2 Opérations logiques

Les opérations logiques permettent de combiner les images. Les opérateurs logiques sont le ET, le OU, le OU-EXclusif et le NON (en anglais: AND, OR, EX-OR, NOT).

- Le NON a pour effet de désactiver les pixels actifs et vice versa. Il est souvent combiné à d'autres opérateurs.
- Le ET permet de combiner deux images en affichant seulement les pixels actifs et communs aux deux images initiales; c'est l'équivalent de l'intersection.
- Le OU est l'équivalent de l'union; le résultat est la combinaison des deux images initiales complètes.
- Le OU-EX permet de combiner les deux images, mais les pixels communs aux deux images seront inactifs.

La figure 4.14 permet de voir le résultat de ces opérations logiques.

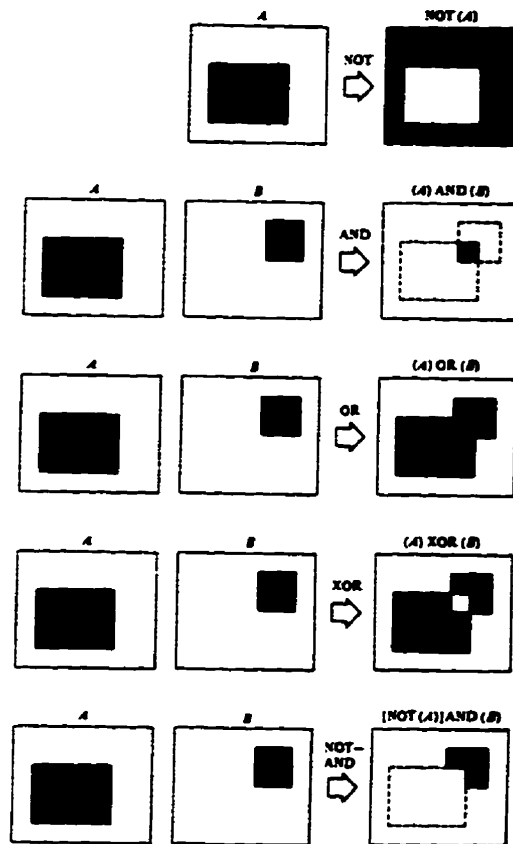


Figure 4.14 Les opérations logiques simples (d'après Gonzales et Woods, 1992)

4.7.3 Opérations morphologiques

Les principales transformations morphologiques seront abordées dans cette section, soit:

- l'érosion et la dilatation;
- l'ouverture et la fermeture.

Afin de transformer les images, on doit comparer les objets de l'image à une forme géométrique connue que l'on appelle élément structurant. En morphologie mathématique, on utilise souvent le cercle à titre d'élément structurant, toutefois les logiciels d'application feront plutôt appel à des éléments structurants carrés ou en croix.

L'image transformée est obtenue en déplaçant l'élément structurant de manière à ce que son centre passe par toutes les positions de l'espace. Pour chaque position on pose une question à savoir si l'élément structurant est complètement inclus, exclus ou s'il intersecte un objet de l'image (Fig. 4.15).

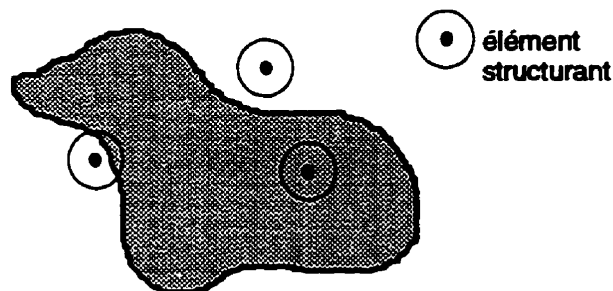


Figure 4.15 Concept de l'élément structurant

Selon que la réponse sera positive ou négative, on obtiendra une image transformée: l'image sera érodée ou dilatée. Les sections suivantes donneront plus de détails sur ces opérations morphologiques.

a) L'érosion

Pour définir l'érosion, choisissons un espace \mathbb{R}^2 dans lequel est situé un ensemble X . À l'aide d'un élément structurant circulaire E de centre c , placé dans l'ensemble X , on parcourt l'ensemble X de façon à ce que le centre c , de l'élément structurant, occupe toutes les positions de l'ensemble X . À chaque position, la question suivante est posée: est-ce que l'élément structurant E est entièrement inclus dans X . Chacune des positions de c où la réponse est positive forme un nouvel ensemble appelé l'érodé de X (Fig. 4.16).

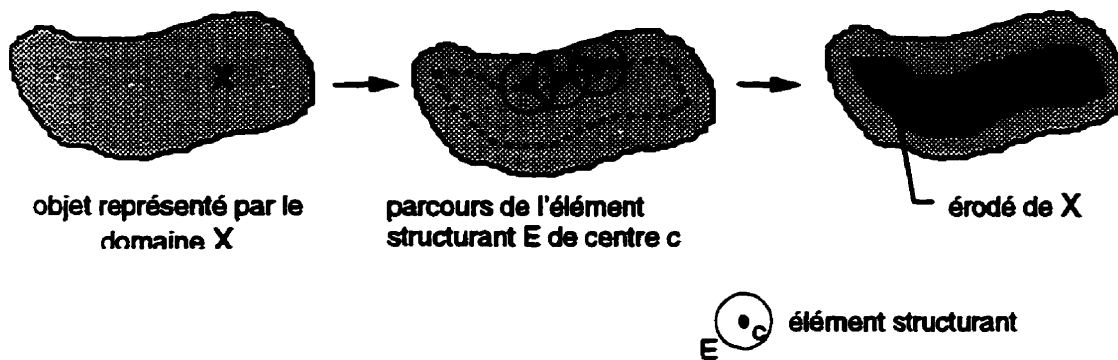


Figure 4.16 Concept de l'érosion par un élément structurant

L'érosion a pour effet de [SCHMITT & MATTIOLI, 1994]:

- séparer les objets au niveau de leur étranglement;
- éliminer les objets trop étroits ne contenant pas l'élément structurant;
- rétrécir les objets d'une taille correspondant au rayon du cercle.

La définition précédente de l'érosion en est une plutôt conceptuelle, en pratique sur les analyseurs d'images, les éléments structurants sont carrés, généralement 3×3 . La figure 4.17 montre le résultat de l'érosion.

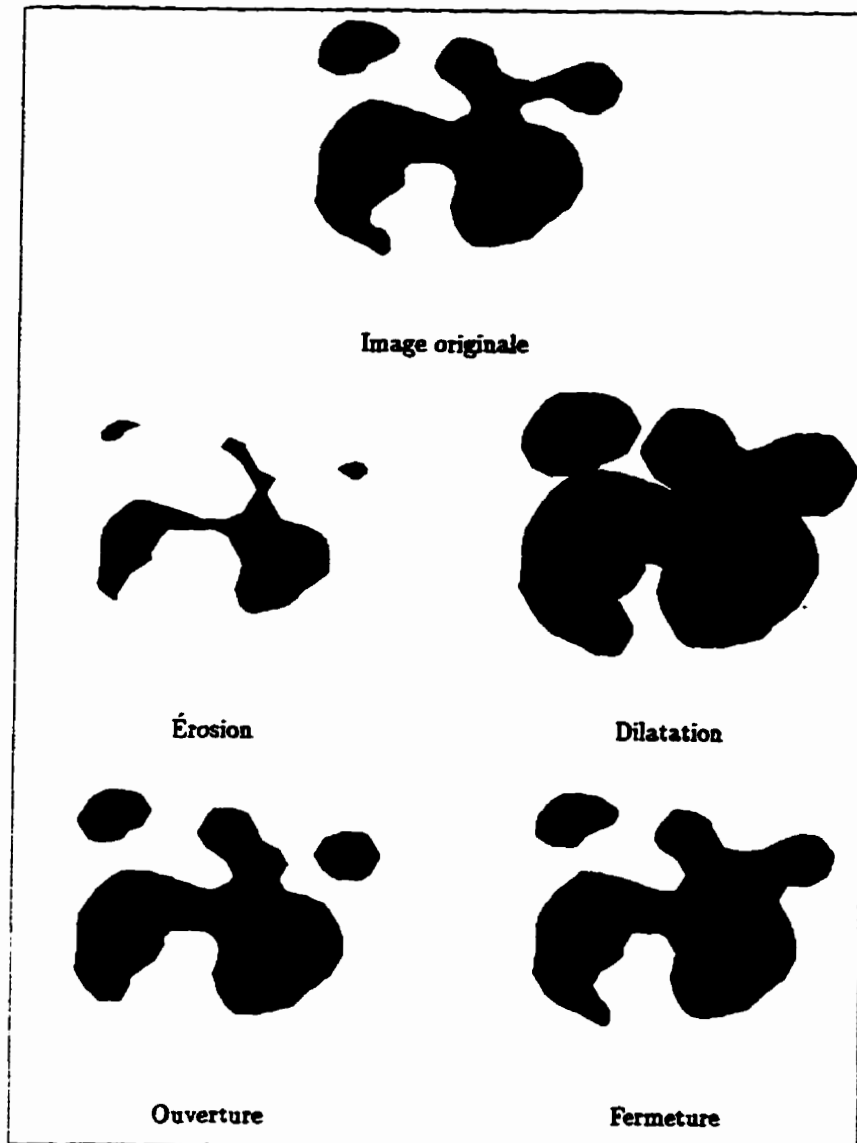


Figure 4.17 Les quatre opérations morphologiques binaires (d'après Schmitt et Mattioli, 1994)

b) La dilatation

La dilatation fait aussi intervenir un élément structurant E qui se déplace sur un domaine (objet) X d'une image. Pour chaque point du domaine, on pose la question à savoir si E touche l'ensemble X . L'ensemble des positions du centre c de E , pour lesquelles la réponse est positive, servira à délimiter le nouveau domaine. Ce nouveau domaine est l'objet dilaté (Fig. 4.18).

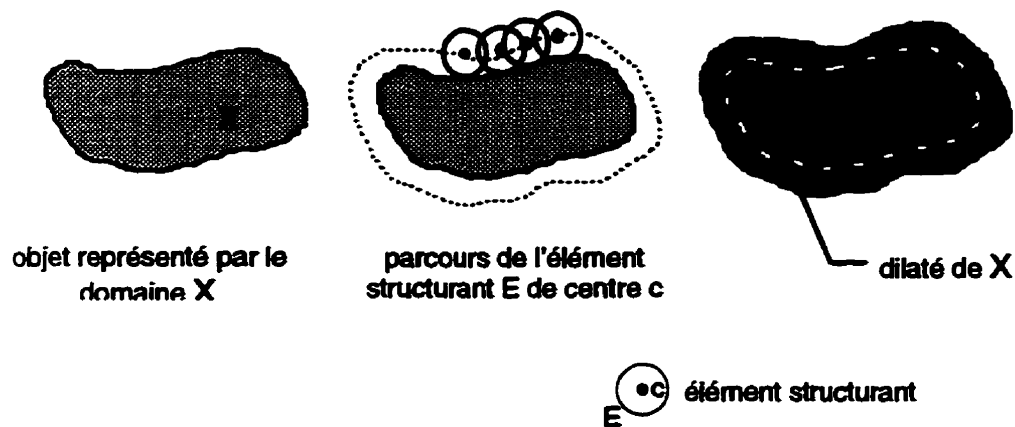


Figure 4.18 Concept de la dilatation par un élément structurant

La dilatation a pour effet de [SCHMITT & MATTIOLI, 1994]:

- connecter les objets quand ils sont proches;
- combler les trous étroits présents dans les objets;
- élargir les objets d'une taille correspondant à la largeur de l'élément structurant.

Tout comme pour l'érosion, les analyseurs d'images vont plutôt utiliser des éléments structurants carrés. La figure 4.17 donne un exemple de dilatation d'un objet.

Notons que les opérations, d'érosion et de dilatation, tiennent compte de la connectivité 4 ou 8. Selon le cas, les résultats de ces opérations morphologiques seront différents puisque le voisinage considéré sera différent. De plus, il faut mentionner que les opérations d'érosion et de dilatation peuvent être utilisées de façon itérative. Cela permet d'obtenir une érosion ou une dilatation plus importante des objets de l'image.

c) L'ouverture

L'érosion et la dilatation sont des opérations qui peuvent être utilisées conjointement. L'ouverture consiste à faire une érosion suivie d'une dilatation par un même élément structurant.

L'ouverture a trois effets sur les images [SCHMITT & MATTIOLI, 1994]:

- filtrage des contours, éliminant les petites convexités, mais pas les concavités;
- élimination des particules trop étroites;
- séparation en plusieurs composantes connexes des particules présentant un étranglement assez long et étroit.

d) La fermeture

La fermeture utilise aussi la combinaison des opérations d'érosion et de dilatation par un même élément structurant, cette fois cependant, on effectue premièrement une dilatation suivie d'une érosion. La fermeture a pour effet de [COSTER & CHERMANT, 1989]:

- boucher les canaux étroits;
- supprimer les vides trop étroits;
- supprimer les « golfes » étroits.

La figure 4.17 permet de comparer l'ouverture et la fermeture sur une image binaire.

Notons que l'ouverture et la fermeture sont aussi des opérations pouvant être utilisées de façon itérative. On parle alors de « taille » d'ouverture et de fermeture, il en est de même pour l'érosion et la dilatation.

4.8 Mesures par analyse d'images

Le but de l'analyse d'images étant souvent la quantification, les analyseurs d'images offrent donc la possibilité d'effectuer une mise à l'échelle des images, permettant ainsi de procéder à diverses mesures sur les images. La plupart des analyseurs d'images permettent, entre autres, de mesurer

l'aire, le périmètre, la position des centres de gravité des objets, les rayons inscrits et circonscrits aux objets (min. et max.) et enfin le diamètre de Féret maximal. Nul besoin de définir les paramètres ci-dessus à l'exception du diamètre de Féret qui est un paramètre souvent utilisé en analyse d'images. Le diamètre de Féret peut être défini comme étant la distance entre deux tangentes parallèles (à un objet) d'orientation arbitraire. Le diamètre de Féret maximal correspond donc à la distance maximale entre deux tangentes parallèles à un objet. Notons que l'orientation du diamètre de Féret maximal donne une indication quant à la direction d'allongement de l'objet.

4.9 Stéréologie

L'analyse d'image permet de mettre en évidence et même de mesurer de nombreuses caractéristiques à partir de l'image d'une section d'un matériau. Cependant, cette seule analyse des images (images 2D) du matériau ne donne aucun renseignement sur sa structure tridimensionnelle. L'application des principes de stéréologie constitue souvent l'étape finale d'un processus d'analyse d'images. Ceux-ci permettent d'exploiter les mesures obtenues et d'inférer les paramètres tridimensionnels de la structure du matériau.

4.9.1 Définition

La stéréologie est une science qui est issue de deux branches des mathématiques, soit les probabilités géométriques et la géométrie intégrale. Une définition générale de la stéréologie est donnée par RISS (1988):

« La stéréologie s'occupe de l'étude des structures spatiales d'objets opaques et souvent irréguliers à partir des données observables sur des sections planes, sur des sections lamellaires fines ou épaisses, sur des coupes sériées ou sur des projections des objets sur un plan et à partir de celles déduites de toute autre exploration géométrique des objets. »

Une définition plus restrictive de la stéréologie a été donnée par les fondateurs de la Société internationale de stéréologie [RISS, 1988]:

« La stéréologie est un ensemble de méthodes mathématiques reliant entre elles des paramètres tridimensionnels d'une structure et des mesures bidimensionnelles réalisées sur des plans de coupe de la structure. »

Cette définition est restrictive puisqu'elle supporte le fait que la stéréologie ne permet que l'induction de paramètres tridimensionnels à partir de mesures bidimensionnelles, ce qui n'est pas le cas. La stéréologie permet d'étudier les objets d'une image dans l'espace de dimension s et d'estimer, à partir de cette étude, des paramètres dans l'espace $n > s$, où s et n peuvent être supérieurs à trois.

Une condition essentielle à respecter pour utiliser les principes de la stéréologie est que les objets étudiés soient distribués au hasard dans le matériau. Si tel n'était pas le cas, il faudrait alors faire l'étude des éléments en prenant plusieurs sections aléatoires dans le matériau. Donc, si les objets analysés ne sont pas distribués au hasard dans le matériau, alors les sections étudiées devront l'être.

4.9.2 Équations fondamentales de la stéréologie

Il existe quatre équations fondamentales en stéréologie [RISS, 1988; WEIBEL, 1980]. Ces équations permettent de relier les paramètres mesurés dans l'espace R^2 avec ceux de l'espace R^3 .

$$A_A = V_V \quad (4-15)$$

$$B_A = \frac{\pi}{4} S_V \quad (4-16)$$

$$P_A = \frac{B_V}{2} \quad (4-17)$$

$$C_A = K_V \quad (4-18)$$

L'indice A signifie aréale et V est pour volumique. De plus, dans les équations ci-dessus, les lettres ont la signification suivante:

- A : densité aréale
- B : longueur d'une courbe plane ou de \mathbb{R}^3
- P : nombre de points d'intersection
- C : courbure totale d'une courbe plane
- V : volume
- S : aire
- K : intégrale de courbure moyenne

Toutes ces équations n'ont pas été mises à profit dans l'étude des vides du granulat. L'équation 4-15, reliant l'aire plane et le volume des vides et l'équation 4-16, reliant le périmètre et la densité surfacique, ont été utilisées. L'équation 4-16 est utilisée sans démonstration.

4.9.3 Démonstration du premier principe de stéréologie

Dans cette étude de la porosité d'une particule de granulat, le premier principe de stéréologie a été utilisé. Ce principe a été formulé par DELESSE en 1847 (cité par WEIBEL, 1980). Ce principe dit que, si un matériau contient des objets, par exemple une phase a , et que l'on prend une section de ce matériau au hasard, alors l'aire A_A , occupée par la phase a , est égale au volume V_V qu'occupe la phase a dans tout le matériau. L'équation reliant ces deux paramètres s'exprime de la façon suivante:

$$A_A = V_V \quad (4-19)$$

L'équation reliant l'aire plane au volume peut être démontrée en utilisant deux approches, soit en utilisant la méthode des tranches et l'intégration ou par la géométrie intégrale [WEIBEL, 1980]. On démontrera cette équation par la première approche.

L'aire A_{Aa} de la phase a dans le matériau est donnée par:

$$A_{Aa} = \frac{A(a)}{A(c)} \quad (4-20)$$

A_{Aa} représente le rapport de l'aire totale de la phase a sur l'aire totale de section de matériau étudiée (c). La figure 4.19 montre l'aire de la phase a ainsi que l'aire de la section étudiée.

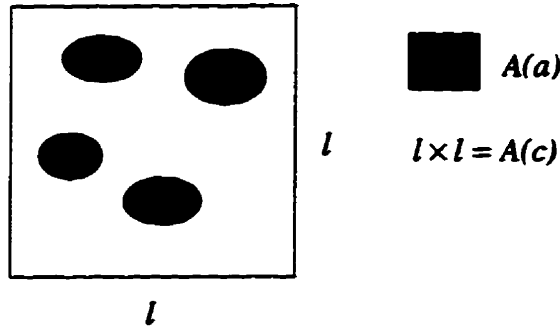


Figure 4.19 Vue d'une section d'aire $A(c)$ de matériau contenant une phase quelconque couvrant une aire plane $A(a)$

Considérons un volume donné d'une structure (Fig. 4.20).

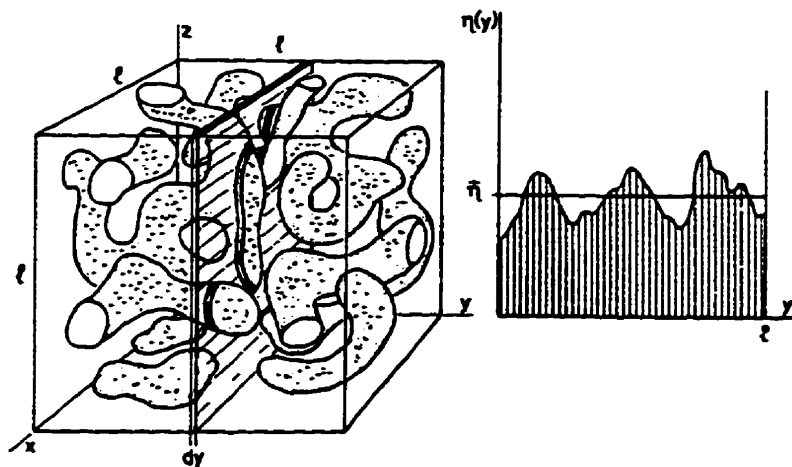


Figure 4.20 Démonstration du premier principe de stéréologie. Élément de volume de matériau et variation de la proportion de la phase a en fonction de la position y (d'après Weibel, 1980)

Ce volume de matériau contient un certain volume de phase a , soit $V(a)$ qui correspond à une proportion (ρ) du volume total de matériau $V(c)$, d'où:

$$V(a) = \rho V(c) \quad (4-21)$$

Maintenant, si l'on considère une tranche d'épaisseur dy parallèle au plan $x-z$, cette tranche de matériau a un volume:

$$dV(c) = l^2 dy \quad (4-22)$$

Dans cette tranche, d'épaisseur dy , la phase a occupe un volume qui est:

$$dV(a) = \eta(y) dV(c) = \eta(y) l^2 dy \quad (4-23)$$

Dans l'équation 4-23, il faut voir que l^2 et dy sont constants, car on considère une tranche de dimension constante que l'on déplacera sur toute l'épaisseur du matériau, donc seule la position y de la tranche varie. Étant donné que la position de la tranche varie, la proportion intersectée de la phase a varie pour chaque nouvelle position de la tranche. Pour cette raison, η , la proportion de la phase a dans la tranche, varie en fonction de la position y . La figure 4.20 montre aussi la variation de la proportion occupée par la phase a dans la tranche en fonction de la position.

Pour obtenir le volume total occupé par la phase a pour l'élément de volume étudié, on n'a qu'à faire l'intégration de $\eta(y)$ sur toute la longueur étudiée:

$$V(a) = \int_0^l dV(a) = l^2 \int_0^l \eta(y) dy = \rho l^3 \quad (4-24)$$

On a mentionné auparavant que ρ représente la proportion de la phase a dans tout le volume de matériau; on peut donc dire que $\eta(y)$, pour $0 < y < l$, représente la proportion de la phase a dans tout le volume étudié.

Toutefois, on a:

$$\frac{1}{l} \int_0^l \eta(y) dy = \bar{\eta} \quad (4-25)$$

L'équation 4-25 donne la valeur moyenne du coefficient $\eta(y)$ sur l'intervalle $[0, l]$. On obtient, selon les équations 4-24 et 4-25 l'égalité suivante:

$$\bar{\eta} l^3 = \rho l^3 \quad (4-26)$$

ou, si l'on simplifie:

$$\bar{\eta} = \rho \quad (4-27)$$

Selon l'équation 4-21, on a:

$$\rho = \frac{V(a)}{V(c)} = V_{Va} \quad (4-28)$$

où V_{Va} est la densité volumique de la phase a dans le volume de matériau et, de la même façon, selon l'équation 4-24, on obtient:

$$\eta(y) l^2 = A(a)(y) \quad (4-29)$$

où $A(a)(y)$ représente l'aire de la phase a à la position y . De plus,

$$l^2 = A(c) \quad (4-30)$$

où $A(c)$ est l'aire de toute la section étudiée. On trouve alors:

$$\eta = \frac{A(a)}{A(c)} = A_{Aa} \quad (4-31)$$

où A_{Aa} est la densité aréale de la phase a sur la section. On peut donc réécrire l'équation 4-27 de la façon suivante:

$$\overline{A_{Aa}} = V_{Va} \quad (4-32)$$

On peut conclure que la densité volumique (par exemple, mm^3 de phase a/mm^3 de matériau) de la phase a correspond directement à la densité aréale (par exemple, mm^2/mm^2) mesurée sur une section de matériau. De façon générale, l'aire plane d'une phase donnée sur une section est un estimateur de la densité volumique de cette phase dans le matériau.

4.10 Documentation et logiciels d'analyse d'images

Ce chapitre renferme certaines notions fondamentales de l'analyse d'images; essentiellement, celles qui ont été utilisées dans le cadre de ce travail. Chaque nouveau problème fera intervenir diverses notions, de l'analyse d'images et de la stéréologie, qui ne seront probablement pas les mêmes que celles abordées ici. Il est à notre avis pertinent de citer quelques ouvrages de base utiles à ceux et celles qui désirent utiliser l'analyse d'images et la stéréologie dans leurs travaux de recherche.

RUSS, J. C. (1995) *The Image Processing Handbook*, 2nd ed., CRC Press, USA, 674p.

COSTER, M. & CHERMANT, J. L. (1985) *Précis d'analyse d'images*, Presses du CNRS, Paris, 560 p.

WEIBEL, E.R. (1980) *Stereological Methods - vol. 2, Theoretical Foundations*, Academic Press, London, 340 p.

En ce qui a trait aux logiciels d'analyse d'images, il en existe bien sûr plusieurs sur le marché. L'analyse d'images de ce travail de recherche a été faite à l'aide du logiciel MIPS de la compagnie MISIS (St-Étienne, France). Ce dernier est celui utilisé au CDGA de l'Université de Bordeaux I. Actuellement, un logiciel d'analyse d'images est installé au Laboratoire de mécanique des roches de l'Université de Sherbrooke. Il s'agit du logiciel *NIH-Image* (domaine public) obtenu via le réseau *Internet* (<http://rsb.info.nih.gov/nih-image/>).

CHAPITRE 5

Étude de la structure du granulat

Ce chapitre est consacré à la description de l'étude, par analyse d'images, d'une particule de granulat concassé. Comme mentionné auparavant, l'analyse d'images est constituée d'une série d'étapes, soit l'acquisition, le traitement et finalement, l'analyse proprement dite des images. La dernière étape comporte la mesure de divers paramètres permettant une analyse quantitative des images ou, plus spécifiquement, des objets d'une image. Les sections suivantes tracent donc les étapes de l'analyse des images du granulat caractérisé précédemment.

L'objectif de cette étude par analyse d'images est la quantification de la porosité du granulat. La caractérisation pétrographique, ainsi que celle faite au MEB, nous apprend que le granulat présente une minéralogie essentiellement dolomitique et qu'il y a, dans la particule, de nombreux plans de clivage. La porosité et les clivages sont des défauts qui interagissent probablement lors de sollicitations mécaniques. Les clivages sont des microdiscontinuités présentes dans toute la particule, il est presque impossible de quantifier cet endommagement. L'analyse d'images sera donc axée vers la quantification de la porosité totale du granulat et, comme on le verra, d'autres paramètres intéressants seront dégagés grâce à l'analyse d'images.

5.1 Logiciel d'analyse d'images

Le logiciel d'analyse d'images utilisé pour cette recherche est celui du Centre de développement des géosciences appliquées (CDGA) de l'Université Bordeaux I en France. Il s'agit du logiciel MIPS (*Misis Image Parallel Software*) de la compagnie MISIS IMAGE (Saint-Étienne, France) combiné à une carte PC-OEIL (Société électronique lyonnaise), le tout installé sur un micro-ordinateur de type IBM-PC. Les autres composantes de l'analyseur d'images du CDGA sont une caméra CCD installée sur un microscope pétrographique ainsi qu'un écran RGB (*Red, Blue, Green*) permettant de voir l'image avant la saisie sur ordinateur. Notons que, pour l'étude d'échantillons mégascopiques, la caméra peut être fixée à une table équipée d'un système d'éclairage. La figure 5.1 présente un schéma du système d'analyse d'images.

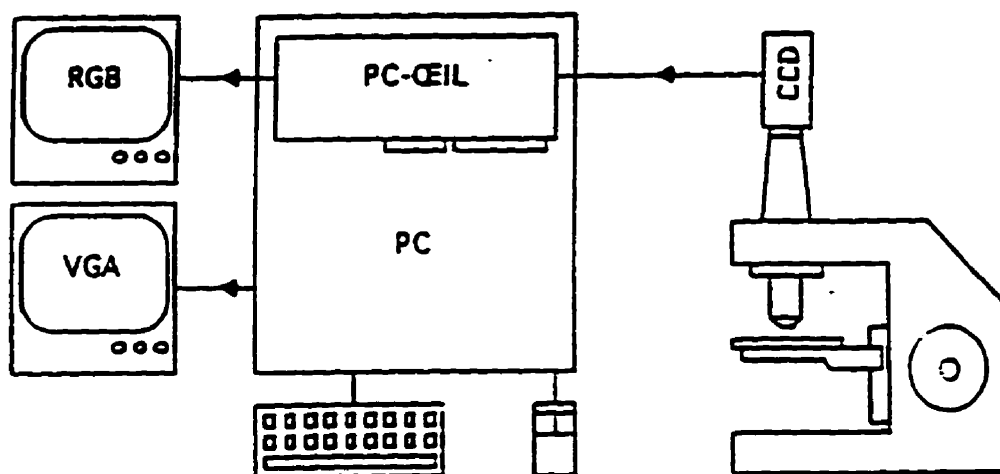


Figure 5.1 Système d'analyse d'images du CDGA (d'après GAVA, 1994)

Le logiciel MIPS est, en quelque sorte, une bibliothèque d'une centaine de fonctions permettant l'acquisition, le traitement, la manipulation et l'analyse des images. De plus, ce logiciel, développé en TURBOPASCAL permet que l'on ajoute certaines fonctions ou opérations définies par l'utilisateur; par l'élaboration de programmes TURBOPASCAL. Quant à la carte PC-OEIL, celle-ci est intégrée dans le micro-ordinateur et c'est elle qui permet de convertir le signal vidéo, lors de

l'acquisition, en une image numérique. Cette carte permet, en plus, de traiter un grand nombre d'images très rapidement. Pour ce qui est de l'analyse des images du granulat, seuls le logiciel MIPS et la carte PC-OEIL ont été utilisés; les images ont été prises à l'aide du MEB.

5.2 Acquisition et adaptation des images du granulat

5.2.1 Acquisition des images

Bien que les images aient été étudiées avec les appareils du CDGA, l'acquisition des images a été faite avec le microscope électronique à balayage de l'Université de Sherbrooke et le logiciel DIGIPAD; ce dernier est installé sur le système LINK (ordinateur couplé au MEB). Plusieurs images numériques d'une section du granulat ont pu être prises avec DIGIPAD. Il est à remarquer que DIGIPAD permet l'acquisition d'images, mais les possibilités de traitement sont relativement limitées. D'ailleurs, l'acquisition d'images 512×512 est très longue et n'est parfois pas possible à cause de l'espace mémoire limité du système. Notons qu'un microscope pétrographique aurait pu être utilisé pour obtenir des images du granulat puisque la minéralogie de ce dernier est relativement homogène. Dans le cas présent, l'avantage du MEB réside, entre autres, dans le fait que l'on obtient des images numériques pouvant être traitées ultérieurement.

Au total, 22 images de 256×256 pixels avec 256 niveaux de gris ont été prises afin de couvrir toute la section du granulat. Le grossissement est de $30 \times$, ce qui permet de bien voir la porosité (cf. sect. 3.3 pour les autres paramètres). Puisqu'il n'y a pas, sur le MEB, de contrôle automatisé du déplacement de l'échantillon, les images ont été saisies successivement en se fixant un point de repère sur les images (pores, fissures, minéraux, etc.) et en déplaçant manuellement l'échantillon. On doit alors s'assurer qu'il y a un recouvrement suffisant, entre chaque image successive, pour construire par la suite une mosaïque d'images présentant la section complète du granulat.

5.2.2 Adaptation des images

La version du logiciel MIPS utilisée ne peut lire que des images de 512×512 pixels. Il fallait donc adapter les images de 256×256 pixels, obtenues avec DIGIPAD, de telle sorte que MIPS soit capable d'en faire la lecture. Il faut mentionner que la nouvelle version de MIPS sur WINDOWS s'appelle MISS et que cette version permet de récupérer plusieurs formats de fichiers-images. Un programme TURBOPASCAL a donc été écrit afin de lire les images dans le format de DIGIPAD (fichiers à extension .IM) et de les réécrire en format lisible par MIPS (fichiers à extension .IMA). Le programme Lire_Image (Annexe C) fait la lecture, ligne par ligne, de l'image initiale de 256×256 pixels (DIGIPAD) et, pour chaque ligne, il réécrit la même ligne dans un fichier de sortie. Toutefois, après l'écriture de la ligne (256 pixels), le programme écrit 256 pixels blancs (valeur du niveau de gris égale à 255) immédiatement à la suite. Il en résulte donc l'écriture d'une ligne de 512 pixels. Cette opération est répétée pour les 256 lignes de l'image. À partir de la ligne 257, le programme écrit des lignes de 512 pixels blancs et cela, jusqu'à ce qu'il atteigne la ligne 512; alors le programme s'arrête puisque l'on obtient une image de 512×512 pixels. La figure 5.2 montre, de façon schématique, l'allure d'une image adaptée à MIPS. Le programme effectue en plus une autre transformation.

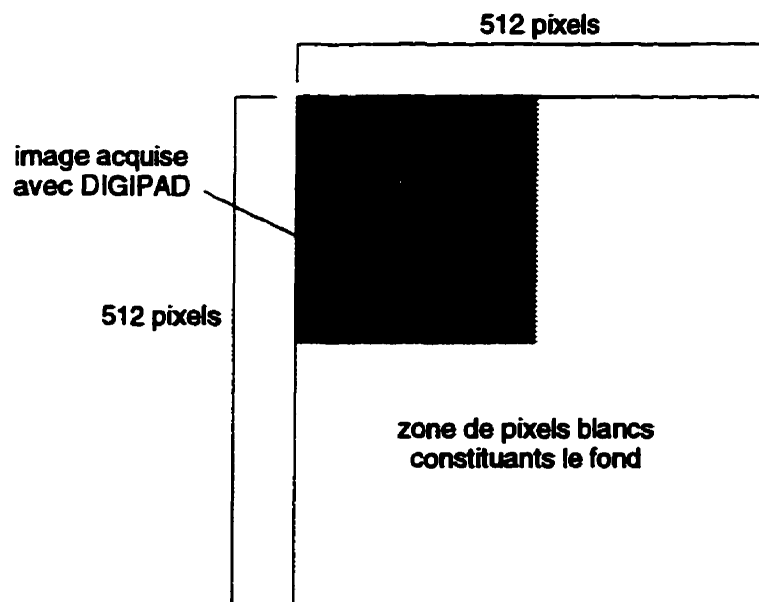


Figure 5.2 Image de 512×512 pixels dont seulement le premier quart est occupé par une image acquise avec DIGIPAD.

Lorsque l'on traite les images, on ne doit en aucun cas tenir compte du fond blanc (pixels de valeur égale à 255) ajoutés à l'image d'origine (256×256). Pour cette raison, tous les pixels de valeur 255 dans l'image d'origine sont forcés à 254 et on indique au logiciel de ne pas tenir compte des pixels de valeur égale à 255. Pour cette raison, tous les pixels de niveau 255 dans l'image d'origine ont été forcés, par le programme, à 254. Cette transformation n'aura aucune influence sur les mesures ultérieures car, comme on le verra, les vides ou pores sont de niveaux de gris de beaucoup inférieurs à 254. Ce changement permet donc d'éliminer le fond blanc lors des divers traitements sans toutefois affecter les résultats comme l'aire totale de la section par exemple. Toutes les images, 22 au total, ont dû être adaptées à l'aide de ce programme afin de pouvoir les récupérer avec MIPS.

Les images qui montrent la bordure du granulat ont été traitées de façon particulière. Pour ces images, il fallait éliminer la zone où apparaît la résine servant de support à l'échantillon de granulat. Cette zone doit être éliminée puisqu'elle ne constitue pas une portion du granulat. Pour éliminer ces bordures, on applique un masque binaire blanc (fonction *Binary mask* sur MIPS). Une macrofonction programmée par GAVA (1994) a beaucoup facilité ce traitement. La figure 5.3 montre le résultat de ce traitement pour une image de bordure. Toutes les images montrant la bordure du granulat ont été traitées de cette façon.

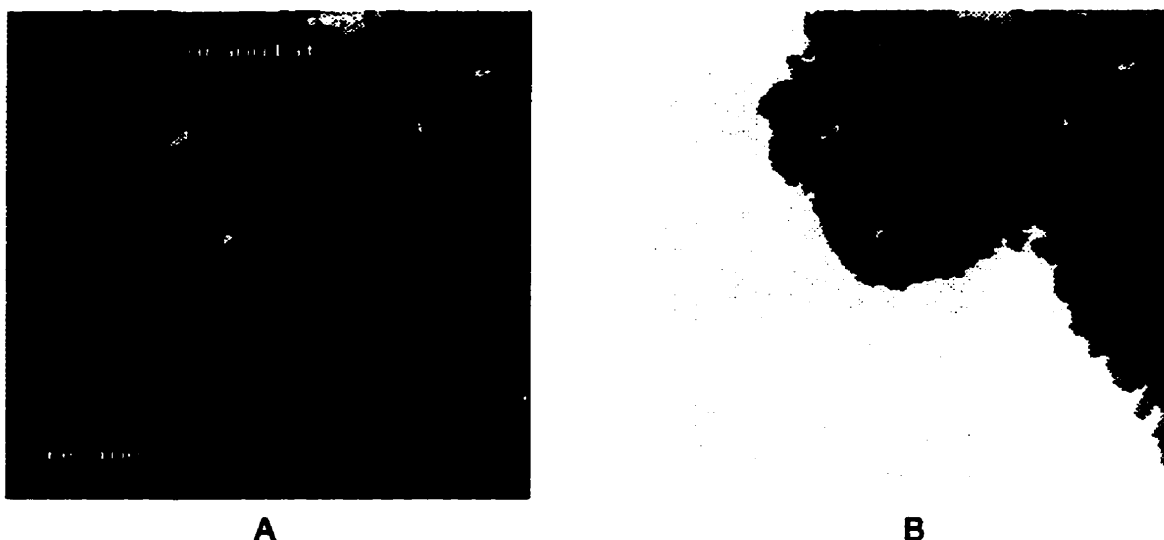


Figure 5.3 A) image d'une portion de la section du granulat avec la résine support et B) même image après l'application d'un masque binaire blanc pour éliminer la résine

5.2.3 Assemblage des images

Les images ont été étudiées à deux échelles, soit $30\times$, l'échelle à laquelle les images ont été prises, ainsi qu'à $15\times$. La taille des images initiales est de 256×256 pixels, ce qui constitue le quart d'une image 512×512 pixels (Fig. 5.2). Il est possible d'accoler quatre de ces images pour ne former qu'une image 512×512 pixels. L'image résultante montre une partie de la section du granulat. En tout, sept groupes d'images ont été formés, chaque groupe constituant une partie du granulat. La figure 5.4 montre les 7 groupes d'images, de 512×512 pixels, nommés G1 à G7 (les images ont été réduites pour la présentation dans le texte). Diverses mesures ont été réalisées sur chacune de ces images et, en additionnant les résultats obtenus pour chaque image, on arrive à des résultats globaux, c'est à dire pour toute la section à un grossissement de $30\times$.

Par la suite, on s'est intéressé à construire une mosaïque d'images qui permettrait de visualiser la section complète du granulat à l'écran de l'ordinateur. Une telle mosaïque rend possible la mesure des paramètres sur la section entière du granulat. Afin d'arriver à construire cette image de la section du granulat, une homothétie de 0,5 (réduction de 50%) de chacune des sept images (G1 à G7) mentionnées ci-haut a été pratiquée. L'homothétie de 0,5 ramène les images à un grossissement de $15\times$. La figure 5.5 montre la mosaïque d'images formant la section entière du granulat. L'étude de l'endommagement a donc été faite à deux échelles, soit $15\times$ et $30\times$.

L'assemblage des images a été réalisé avec la commande *Match image* de MIPS. Il s'agit de trouver deux points remarquables présents sur les deux images à accoler. On indique, à l'aide de la souris, que ces points sont en fait les mêmes et le logiciel s'occupe de faire correspondre ces points, donc d'accoler les images. Ceci signifie qu'il est nécessaire, lors de l'acquisition des images au MEB, de reprendre une portion de l'image adjacente afin d'avoir des points de repère.

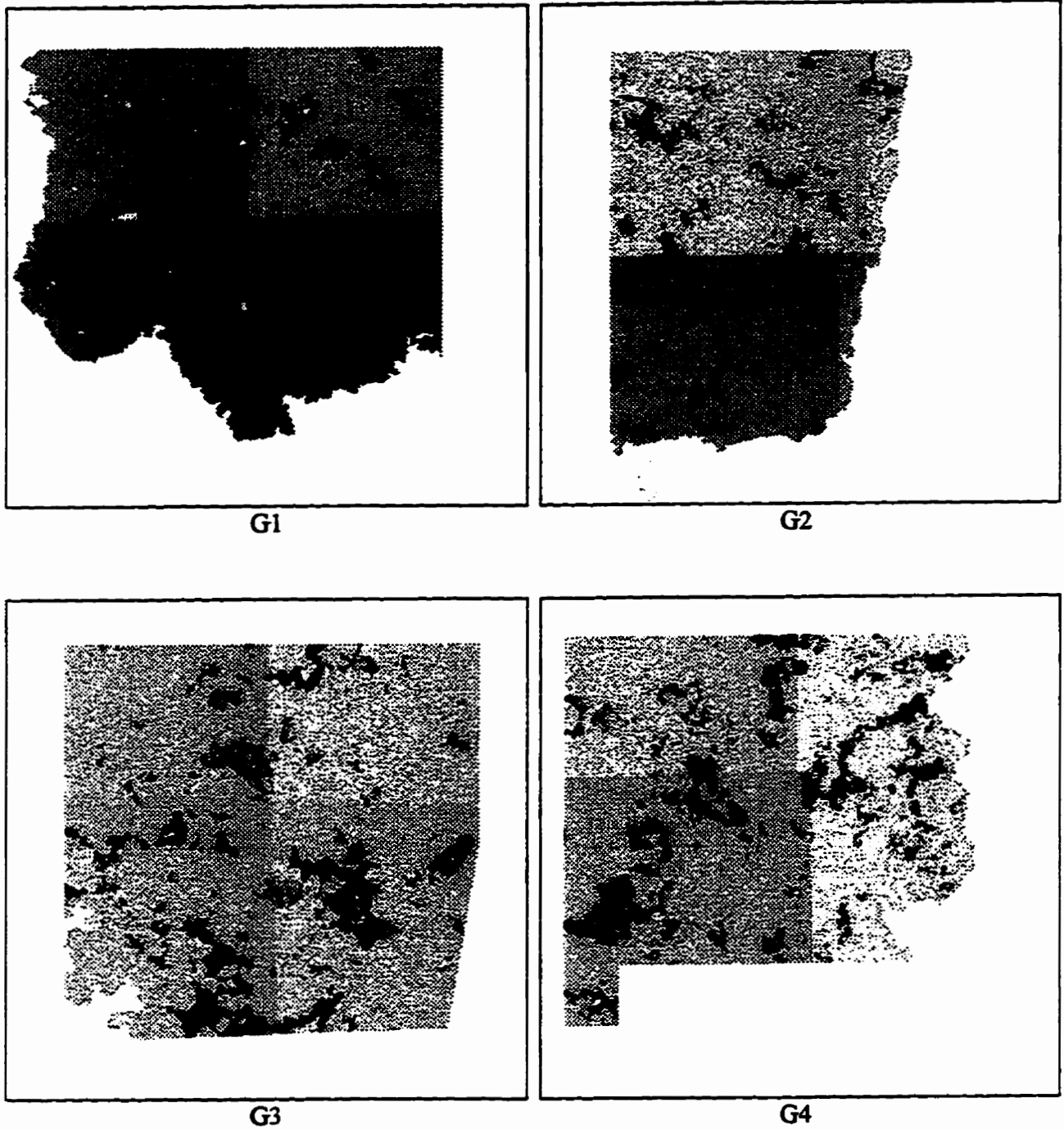
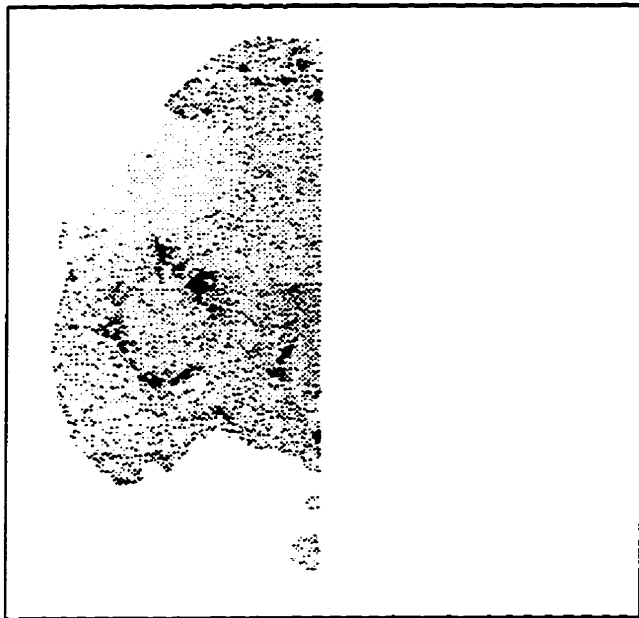
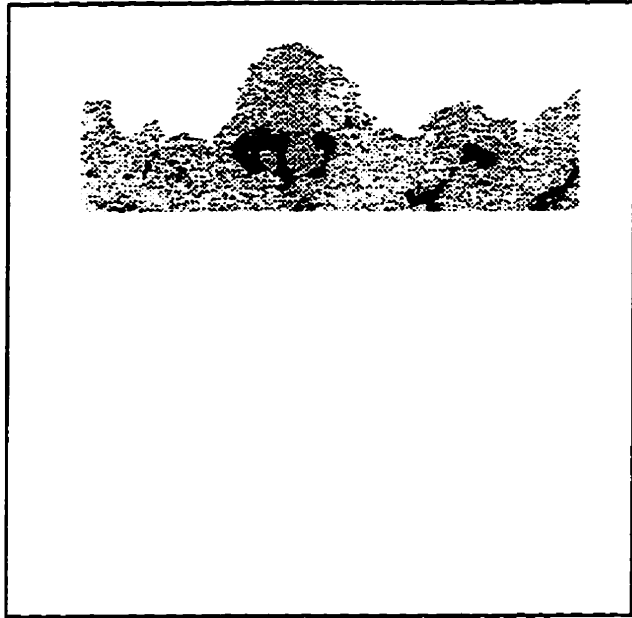


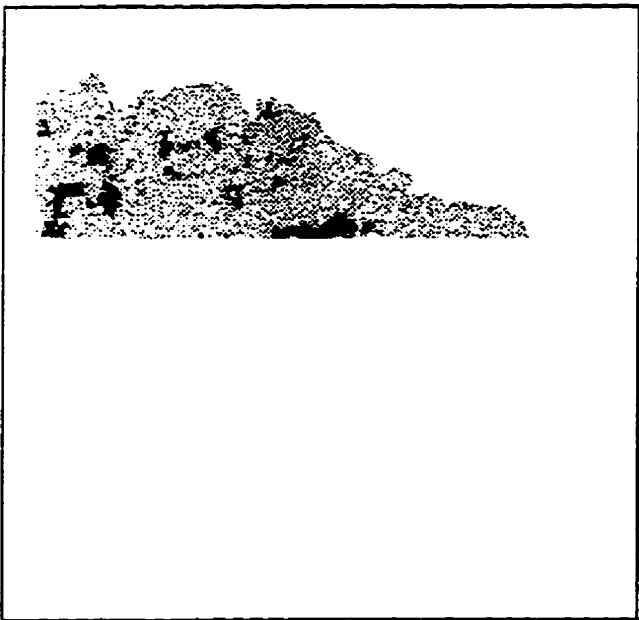
Figure 5.4 Images G1 à G7, de 512×512 pixels chacune, représentant une partie de la section du granulat



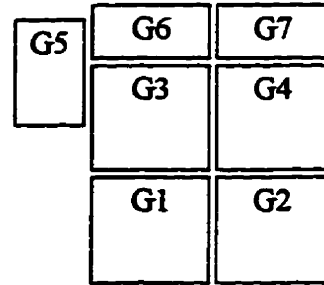
G5



G6



G7



Localisation approximative des images pour la représentation complète du granulat

Figure 5.4 (suite)

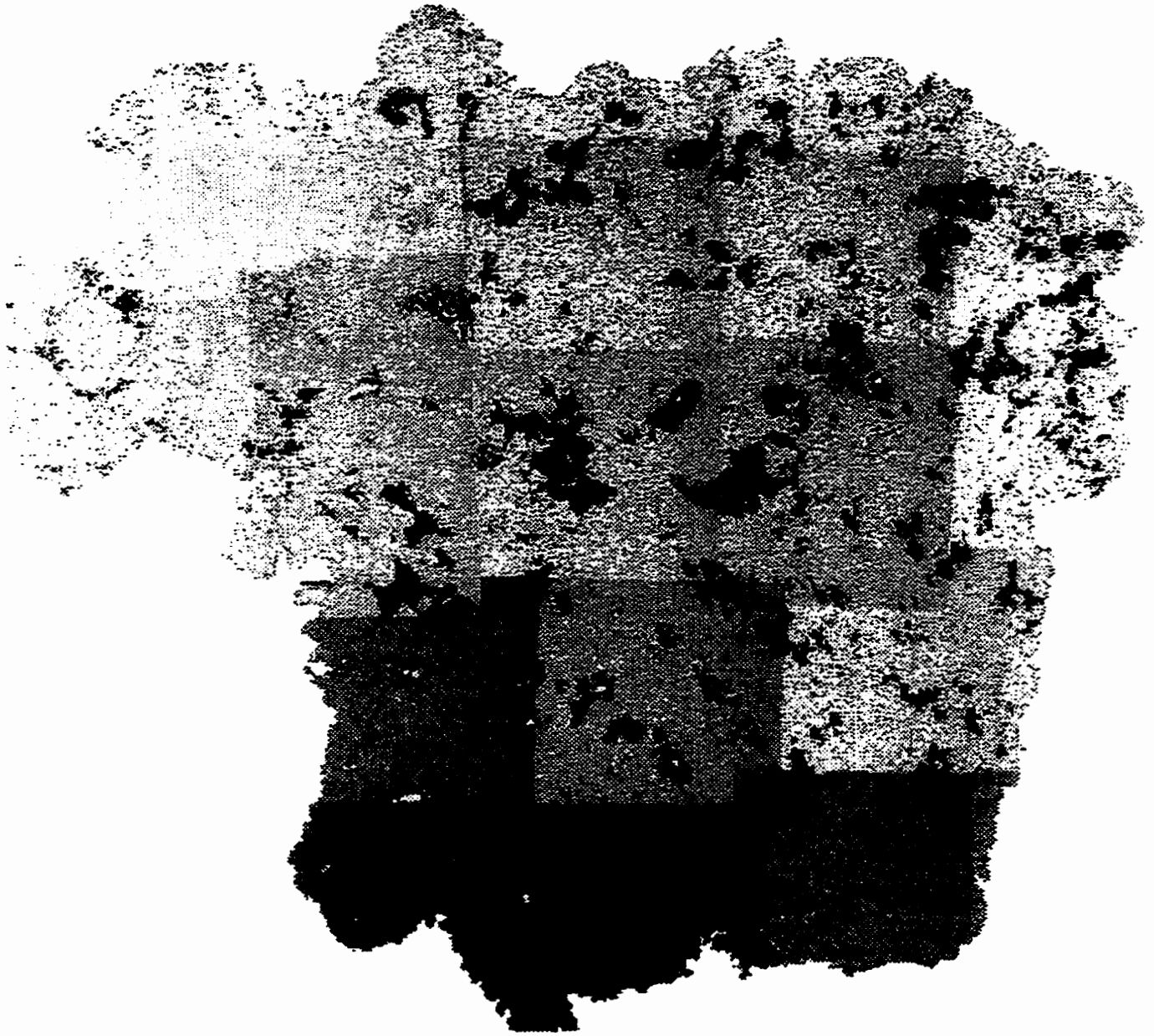


Figure 5.5 Image (mosaïque), de 512×512 pixels représentant, à l'échelle $15 \times$, la section complète du granulat

La mesure de divers paramètres sur les sept images (G1 à G7) à l'échelle $30 \times$ était relativement plus complexe que pour la mosaïque. En effet, les objets (pores) situés en bordure des images sont incomplets puisqu'une partie est sur l'image adjacente. Ces objets doivent donc être éliminés de l'image lors des mesures du diamètre de Féret, de la position des centres de gravité, etc. Les objets en bordure ont donc été retirés des images, ensuite une série d'images ne montrant que les objets a été montée (sept objets donc sept images au total). Pour chaque objet (pore), on a fait les diverses mesures (ces pores sont identifiés A, B, D, E, G, H, J, dans la compilation des résultats).

Un autre aspect important à considérer est la rotation des images. Théoriquement, lorsque l'on fait l'acquisition d'images au MEB, on effectue une translation en x et y pour obtenir diverses images du granulat. Il semble que, en pratique, une légère rotation s'opère. Lors de l'accolement des images (*Match images*), on note que l'analyseur d'images doit tourner légèrement les images pour arriver à les agencer parfaitement.

5.3 Traitement des images du granulat

5.3.1 Algorithme de traitement des images

La séquence de traitement des images en niveaux de gris, qui rend possible l'obtention d'images binaires (noir et blanc) ne montrant que les objets sur lesquels on veut faire des mesures, s'appelle un algorithme de traitement. L'algorithme consiste donc en une série de transformations des images, il doit résulter de ces transformations une image montrant le plus fidèlement possible la forme et la position des objets relevés sur les images en niveaux de gris.

Il n'existe pas de méthodologie précise pour l'élaboration d'algorithme de traitement d'images; cela est dû à la grande diversité des problèmes, donc des images, pouvant être traitées. L'obtention d'un algorithme se fait, disons-le, en «jouant» avec les images et l'analyseur d'images.

Pour ce qui est des images du granulat, l'objectif visé est de ne mettre en évidence que les pores présents sur la section. L'algorithme obtenu se divise en deux parties, dans un premier temps, on

effectue le traitement des images en niveaux de gris et ensuite le traitement des images binaires. L'algorithme présenté au tableau 5.1 est celui utilisé avec les images du granulat. Ce tableau présente le traitement effectué, soit la fonction utilisée sur l'analyseur d'images et l'action de ce traitement sur l'image.

TABEAU 5.1	
ALGORITHME DE TRAITEMENT DES IMAGES	
Traitement	Action
Images en niveaux de gris	
<ul style="list-style-type: none"> • Application d'un filtre médian 3×3 (<i>Median filtering</i>) • Écriture d'une bordure blanche (255) (même couleur que le fond) d'une largeur de 1 pixel (<i>Write border</i>) • Seuillage automatique par la méthode des nuées dynamiques (<i>Clustering</i>) en ne tenant pas compte du fond blanc 	<p>Élimination du bruit de fond sur les images ce qui se traduit par une homogénéisation de l'image</p> <p>L'application du filtre médian fait apparaître des pixels noirs autour de l'image, ce qui influence les traitements subséquents</p> <p>Conversion de l'image en niveaux de gris en une image binaire ne montrant que les vides</p>
Images binaires	
<ul style="list-style-type: none"> • Inversion (<i>Inversion</i>) • Érosion de taille 1 (<i>Erosion</i>) • Reconstruction (<i>Marker</i>) • Bouchage de trous (<i>Holes</i>) 	<p>MIPS considère que les objets sont blancs, l'inversion rend donc le fond noir et les pores blancs</p> <p>Élimine les objets que l'on considère trop petits</p> <p>Reconstruit les objets qui n'ont pas été éliminés par l'érosion</p> <p>Élimine les trous à l'intérieur des objets</p>

La figure 5.6 montre le résultat des principales étapes de l'algorithme sur une image représentant une portion du granulat (image G1). Enfin, la figure 5.7 montre la mosaïque du granulat après traitement avec l'algorithme décrit auparavant. Notons que le résultat est le même pour les images G1 à G7.

La plupart des fonctions utilisées dans l'algorithme ont été décrites au chapitre 4 (filtrage, seuillage, érosion). Toutefois, la méthode de seuillage employée est celle des nuées dynamiques plutôt que l'entropie décrite au chapitre 4. La méthode des nuées dynamiques a été choisie, car le résultat obtenu était un légèrement meilleur q'avec la méthode de l'entropie de l'histogramme. En effet, les pixels isolés ou les petits groupes de pixels sont éliminés lorsqu'on fait le seuillage avec la méthode des nuées dynamiques. Le tableau 5.2 montre les diverses valeurs de seuil calculées par chacune de ces méthodes. On remarquera que les valeurs obtenues sont du même ordre sauf pour la mosaïque.

Image	Valeur du seuil	
	Méthode des nuées dynamiques	Méthode de l'entropie
G1	128	130
G2	168	164
G3	163	177
G4	159	172
G5	193	181
G6	175	199
G7	179	171
Mosaïque	179	136

La construction des images G1 à G7 ainsi que de la mosaïque de la section complète du granulat a été réalisée en accolant des images. Comme on le voit à la figure 5.5, certaines des images, composant l'image complète, sont plus foncées que d'autres. Cette non-homogénéité du fond de l'image rend impossible l'utilisation d'une méthode de seuillage automatique comme la variance interclasse. L'histogramme de l'image de la figure 5.5 est celui montré à la figure 4.13; on remarque que cet histogramme n'est pas bimodal (il y a plus de deux classes). Le résultat du seuillage par la variance interclasse est montré à la figure 5.8. On remarque, sur cette figure, des plages noires dans le bas de l'image. Étant donnée que les niveaux de gris, dans cette région de l'image, sont plus élevés que dans tout le reste, l'algorithme de seuillage calcule un seuil moins élevé. Ainsi, cette zone plus foncée, est mise à noir. Cette méthode de seuillage n'est donc pas applicable. On voit bien, à l'aide de cet exemple, l'importance d'avoir des images successives ayant des niveaux de gris du fond le plus homogène possible.

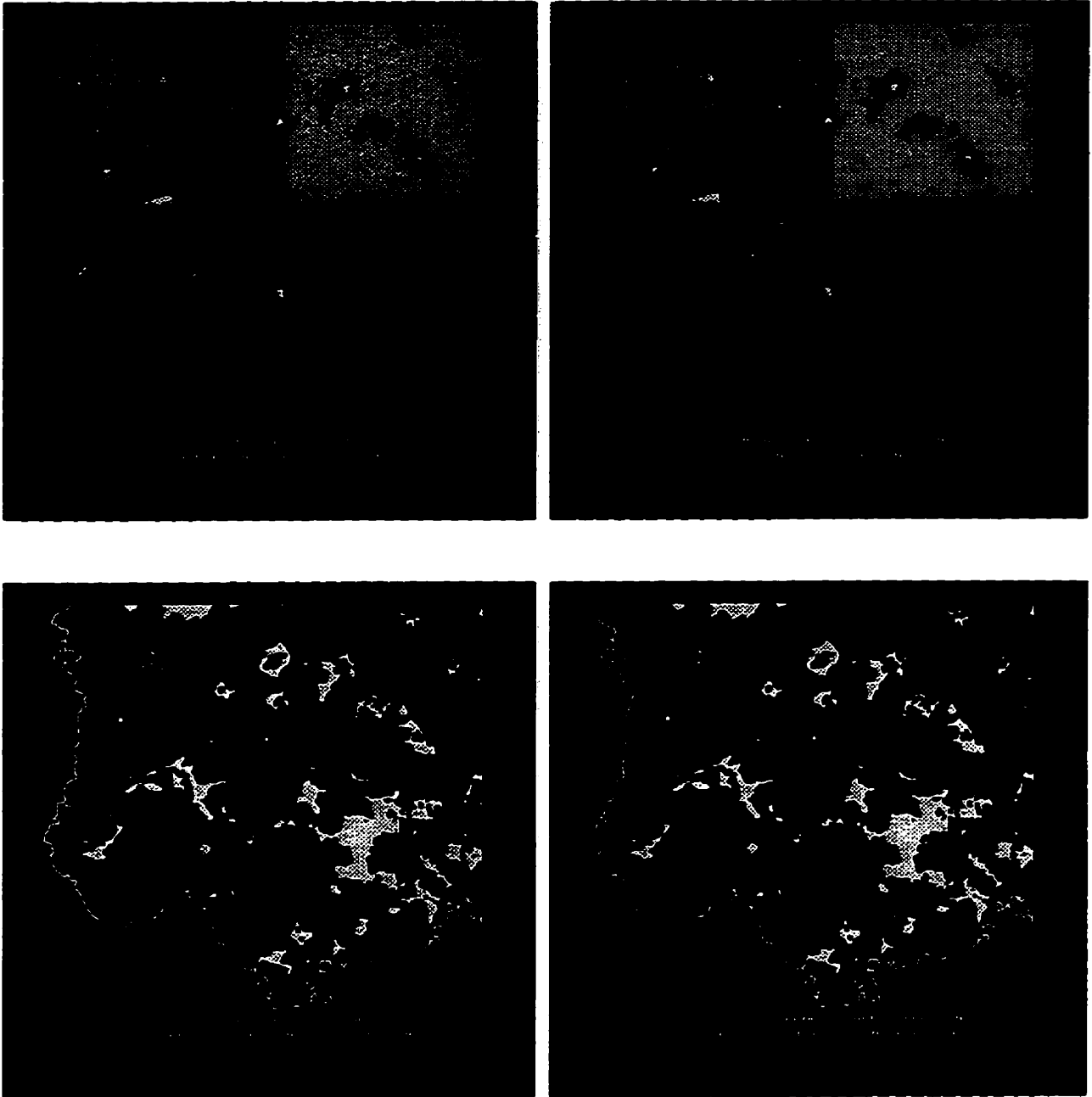


Figure 5.6 Images illustrant les étapes de l'algorithme de traitement

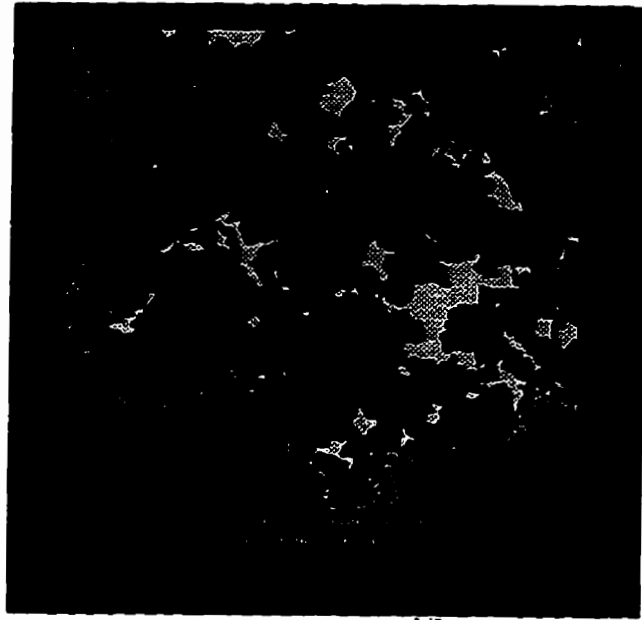


Figure 5.6 (suite)



Figure 5.7 Image du granulat à l'échelle 15 × après traitement. On peut comparer cette image à celle de la figure 5.5

5.4 Mesures sur les images du granulat

Des mesures ont été réalisées sur les sept images binaires (G1 à G7 binaires) à l'échelle $30 \times$ ainsi que sur l'image binaire représentant la section complète (mosaïque) du granulat. Pour ce qui est des mesures faites sur les sept images G1 à G7, il faut, par la suite, faire la somme des résultats obtenus pour chaque image pour avoir des résultats globaux pour toute la section de granulat. Par exemple, l'aire totale couverte par les pores à l'échelle $30 \times$ est égale à l'aire des pores sur l'image G1+ aire des pores sur G2 + + aire des pores sur G7. Quant aux mesures effectuées sur la section complète du granulat (mosaïque), nul besoin de faire de sommation puisque la particule est entièrement représentée. Les divers résultats seront donc exposés pour les deux échelles d'étude.

Avant d'effectuer quelque mesure que ce soit, il faut calibrer, c'est-à-dire, donner l'échelle des images. Cette étape est relativement simple, car le logiciel MIPS, et la plupart des logiciels d'analyse d'images ont une fonction permettant la mise à l'échelle des images. Dans le cas présent, l'échelle des images prises au MEB est indiquée sur les microphotographies. La mise à l'échelle des images, avec MIPS, est faite en mesurant, sur une microphotographie, la longueur et la largeur d'un rectangle circonscrit à un objet, par exemple un pore. L'analyseur d'images permet de tracer ce même rectangle circonscrit à l'objet sur l'image à l'écran et de donner ses dimensions. Le résultat est une mise à l'échelle des images et elle s'exprime en pixels/unité de longueur.

Dans le même ordre d'idée, mentionnons que les objets de petite dimension sont formés d'un petit nombre de pixels et il devient difficile, pour l'ordinateur, d'effectuer des mesures précises sur de tels objets. Les résultats des diverses mesures sur les objets formés de moins de vingt pixels ont donc été retirés de la liste des résultats. Puisque ces objets sont très petits et peu nombreux, ceci affecte très peu les résultats globaux.



Figure 5.8 Image binaire de la mosaïque du granulat après un seuillage par variance interclasse

Le logiciel MIPS offre de nombreuses possibilités en ce qui a trait à la mesure de paramètres. Les mesures effectuées sur les images des granulats sont les suivantes:

- l'aire de chaque pore;
- le diamètre de Féret maximal de chaque pore;
- l'angle entre le diamètre de Féret maximal et l'horizontale;
- le rayon du plus grand disque inscrit à un pore (disque centré au centre de gravité);
- le rayon du plus petit disque circonscrit à un pore (disque centré au centre de gravité);
- la position du centre de gravité des pores.

Les résultats de ces mesures sont sauvegardés dans des fichiers de format ASCII et récupérés par la suite dans EXCEL 5 de MICROSOFT. L'exploitation des résultats est faite en utilisant ce dernier logiciel. Les résultats bruts sont placés à l'annexe B.

5.5 Exploitation et analyse des résultats

Cette section donne les résultats obtenus par analyse d'images, ainsi qu'une analyse de ceux-ci. De plus, dans la présente section, on fait appel à quelques notions de statistique. Les lois de distribution utilisées et les tests statistiques ne seront pas détaillés, le lecteur peut consulter SAPORTA [1990], RUEGG [1989], BAJPAI [1978] ou tout autre volume de statistique.

5.5.1 Distribution de l'aire des pores

Le logiciel MIPS permet de calculer l'aire de chaque objet présent sur l'image binaire. Les pores du granulat sont ici les objets des images et l'aire de chacun a été déterminée. Les images à l'échelle 30 × (G1 à G7) et à l'échelle 15 × (mosaïque) ont été analysées. Les figures 5.9 et 5.10 présentent les histogrammes de la distribution de l'aire des pores à l'échelle 30 × et 15 ×.

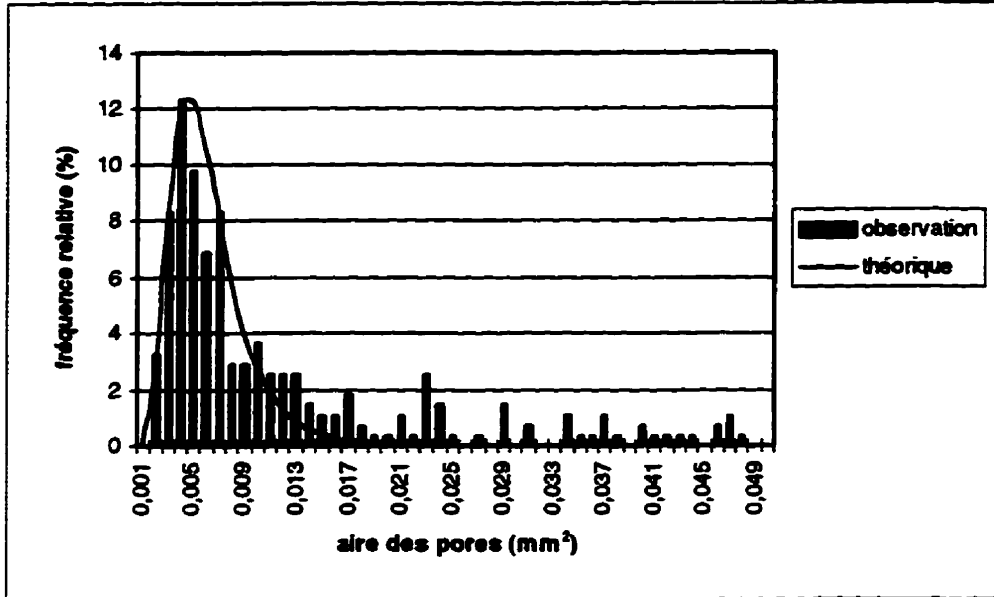


Figure 5.9 Histogramme de la distribution de l'aire des pores à l'échelle 30 ×

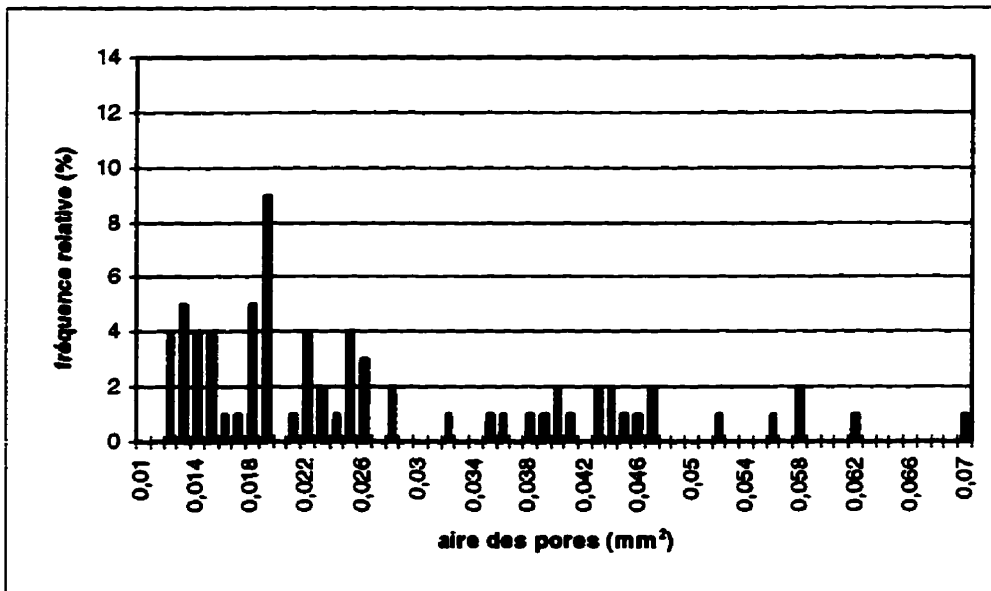


Figure 5.10 Histogramme de la distribution de l'aire des pores à l'échelle 15 ×

Avant d'analyser l'histogramme de la figure 5.9, on doit mentionner que ce dernier ne montre pas la plage complète des aires des pores. En effet, les valeurs au-delà de $0,049 \text{ mm}^2$ ont été éliminées car, de $0,049 \text{ mm}^2$ à $0,5 \text{ mm}^2$, seulement quelques valeurs (soit environ 30 sur 272) sont observées. Par surcroît, les valeurs de cette plage ne représentent jamais plus de 0,5% en terme de fréquence relative. Cela dit, l'histogramme de la figure 5.9 montre environ 90% des données. Celui-ci présente la fréquence relative, c'est-à-dire le nombre, exprimé en pourcentage, des pores contenus dans un intervalle donné.

À l'échelle $30 \times$, la distribution ne semble pas suivre une distribution normale, mais plutôt une distribution de type lognormale ($m = -5,3$; $\sigma = 0,46$). L'aire des pores constitue bien une variable continue, ce modèle est donc tout à fait applicable. Ce type de distribution est un modèle souvent rencontré en génie civil, plus particulièrement en hydrologie. En géologie, la distribution de petites particules ou d'éléments en trace dans les roches s'accorde bien avec la distribution lognormale [BAIPAJ et coll., 1978]. En conséquence, la distribution de l'aire des pores suit une loi lognormale. Notons qu'aucun test statistique n'a été effectué pour vérifier l'hypothèse d'une distribution lognormale de l'aire des pores.

La figure 5.10 montre la distribution de l'aire des pores, à l'échelle $15 \times$. À cette échelle, l'aire minimale est autour de $0,011 \text{ mm}^2$ tandis qu'à l'échelle $30 \times$ elle se situait à environ $0,002 \text{ mm}^2$. Quant à l'aire maximale, elle se situe autour de $0,8 \text{ mm}^2$ à l'échelle $15 \times$ tandis qu'elle est de $0,5 \text{ mm}^2$ à l'échelle $30 \times$. Ceci s'explique par le fait que, à un plus faible grossissement, la résolution est moins bonne. Par exemple, un pore de $0,5 \text{ mm}^2$ situé très près d'un pore de $0,3 \text{ mm}^2$ à l'échelle $30 \times$ peut devenir, à $15 \times$, un pore de $0,8 \text{ mm}^2$. La diminution de 50% de l'échelle d'observation entraîne une perte d'information, soit tous les vides dont l'aire est inférieure à $0,01 \text{ mm}^2$. La figure 5.11 permet de comparer les distributions de l'aire des pores aux échelles $30 \times$ et $15 \times$. À remarquer qu'à l'échelle $30 \times$ de plus petits pores sont détectés.

En ce qui concerne la distribution de l'aire des pores, celle-ci suit aussi une loi lognormale. Cependant, elle est moins bien définie qu'à l'échelle $30 \times$. Ceci s'explique par le nombre de données considérées. À l'échelle $30 \times$, 272 données sont utilisées pour tracer l'histogramme

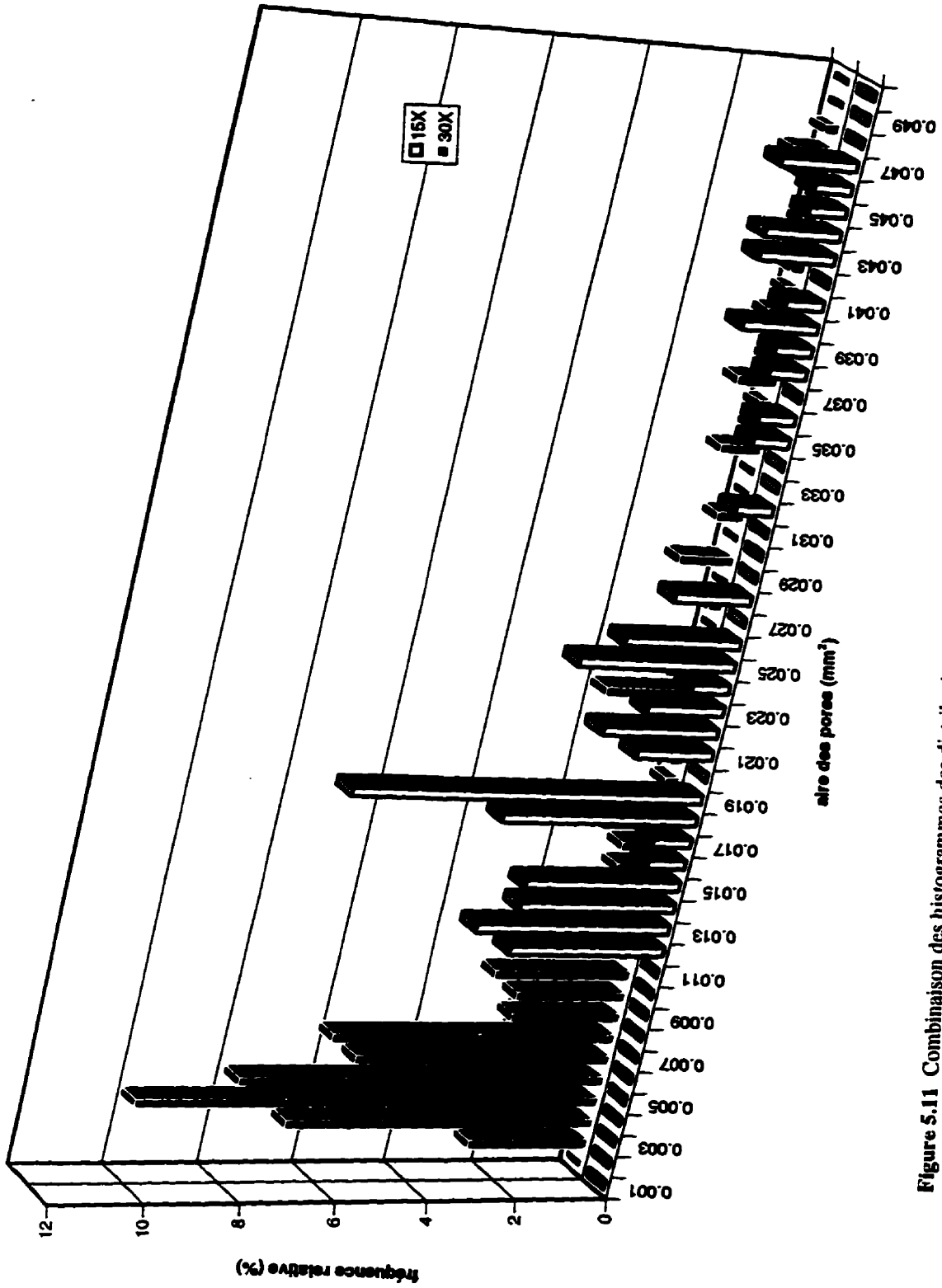


Figure 5.11 Combinaison des histogrammes des distributions de l'aire des pores

complet, tandis que, à l'échelle 15 ×, seulement 100 données sont utilisées. Dans le cas présent, on a moins de données à l'échelle 15 ×, mais la tendance semble être la même qu'à l'échelle 30 ×. Le tableau 5.3 donne les paramètres statistiques de base de la distribution de l'aire des pores.

Paramètre	Échelle	
	30 × mm ²	15 × mm ²
Moyenne	0,028	0,071
Écart-type	0,067	0,011
Mode	0,003	0,019
Médiane	0,007	0,030
Valeur minimum	0,001	0,012
Valeur maximum	0,530	0,80

5.5.2 Calcul de la porosité

La mesure de l'aire de chaque pore rend possible l'estimation de l'aire totale occupée par les pores sur la section. De plus, avec MIPS, il est aisé de déterminer l'aire totale de la section du granulat. L'obtention de ces valeurs permettra de calculer la densité aréale des pores et, par la suite, d'inférer la densité volumique de ces derniers. La densité volumique des pores est, en fait, la porosité du granulat. Quant au passage de la densité aréale vers la densité volumique, il est fait via la première équation de stéréologie (sect. 4.9.3). Le tableau 5.4 présente les valeurs utiles aux calculs de la porosité ainsi que les résultats obtenus; les calculs ont été réalisés pour les deux échelles d'étude.

TABLEAU 5.4
CALCUL DE LA POROSITÉ DU GRANULAT

Échelle	Image	Aire occupée par les pores	Aire de la section	Densité aréale	Densité volumique
		mm ²	mm ²	A_A mm ² /mm ²	$A_A=V_V$ mm ³ /mm ³
30 ×	G1	1,78	17,10	0,10	0,10
	G2	1,33	11,74	0,11	0,11
	G3	2,32	19,85	0,12	0,12
	G4	1,88	14,18	0,13	0,13
	G5	0,13	7,65	0,02	0,02
	G6	0,31	4,66	0,07	0,07
	G7	0,47	5,50	0,09	0,09
	Total	8,17	80,68	0,10	0,10
15 ×	Mosaïque	7,28	86,98	0,08	0,08

La densité aréale est le rapport de l'aire occupée par les pores sur l'aire de la section étudiée. Pour ce qui est de la densité volumique, le premier principe de stéréologie montre qu'elle est égale à la densité aréale. Par conséquent, la porosité du granulat est de 10% à l'échelle 30 × et de 8% à l'échelle 15 ×. On note que les résultats sont différents selon l'échelle d'étude. L'analyse du tableau 5.4 permet de constater que l'aire occupée par les pores à l'échelle 30 × (8,17 mm²) est supérieure à celle de l'échelle 15 × (7,28 mm²). Ceci s'explique par le fait que, à l'échelle 15 ×, comme on l'a vu à la figure 5.11, il y a une perte d'information. L'autre aspect important à vérifier est l'aire de la section complète du granulat. Le granulat a été étudié à deux échelles différentes, soit 30 × et 15 ×. Rappelons que pour l'étude à 30 ×, sept images ont été construites (G1 à G7) et chaque image est étudiée individuellement. Les résultats obtenus, pour chaque image, sont cumulés afin d'obtenir des résultats globaux pour toute la section. Rappelons aussi que chaque image, G1 à G7, montre une petite partie de l'image adjacente; ceci afin d'avoir des points de repères lorsqu'on désire accoler les images et les regroupés. On comprend donc que, pour éviter de mesurer la même chose sur les diverses images, il faut éliminer une certaine portion du contour de chaque image (G1 à G7). À l'échelle 15 ×, ce problème ne se pose pas puisque la section complète du granulat est représentée par une seule image. Cela dit, lorsque l'on fait l'analyse des résultats obtenus pour la dimension de la section complète du granulat, on note que la dimension de la section n'est pas la même selon l'échelle d'étude, soit 80,6 mm² à 30 × et 86,9 mm² à 15 ×.

Puisqu'il s'agit de la même section, l'aire devrait être la même quelque soit l'échelle d'étude. Le résultat obtenu à $30 \times$ est inférieur à celui obtenu à $15 \times$ et cette différence est liée à l'élimination de certaines portions des images comme mentionné plus haut. Pour chaque image, G1 à G7, on tente de ne conserver que la partie de l'image qui n'est pas représentée sur une autre. Il se peut que, dans certaines images, trop de pixels aient été éliminés, réduisant ainsi l'aire totale de l'image, ce qui se répercute sur le résultat global. Il faut garder à l'esprit que, sur une image de 512×512 pixels, l'élimination d'une colonne de pixels représente 512 pixels. Un calcul rapide, faisant intervenir l'échelle des images, permet de constater que l'élimination de quelques colonnes influence les résultats numériques, mais que l'aspect visuel ne semble pas être trop altéré. Pour cette raison, on considère que l'aire de la section la plus exacte est celle obtenue à $15 \times$, puisque l'image représente la section complète. La porosité à l'échelle $30 \times$, recalculée avec l'aire totale de la section de $86,9 \text{ mm}^2$ ($15 \times$) est de 9,4%. La porosité totale du granulat serait donc de 9,4%.

Cette valeur de porosité de 9,4% obtenu par analyse d'images est un résultat acceptable en ce sens qu'il est du même ordre de grandeur que les résultats obtenus avec d'autres méthodes (Tab. 5.5). Ce résultat est plus élevé, mais on a déjà mentionné au chapitre 2 les limites des autres méthodes. De plus, il ne faut pas négliger l'observation des carottes de forage de cette dolomie qui montrent beaucoup de pores. Bien sûr, il ne s'agit là que d'une seule particule de granulat. Il faut envisager l'étude de plusieurs particules pour s'assurer que ce résultat est valide pour l'ensemble des granulats de dolomie.

Méthode de caractérisation	Porosité
Absorption d'eau	2,8%
Porosimétrie au mercure	3,5%
Porosité théorique	6,3%
Analyse d'images	9,4%

L'étude de plusieurs particules de granulat serait relativement longue. En effet, l'acquisition de plusieurs images adjacentes et la construction d'une mosaïque représentant le granulat entier

demande beaucoup de temps comparativement à un essai physique. Les résultats obtenus avec les images G1 à G7 sont, en regard de cet aspect, intéressants. Une analyse plus détaillée du tableau 5.4 laisse voir que la densité aréale des pores augmente avec l'aire de l'image observée. Pour des images dont l'aire est supérieure à 10 mm^2 , la densité aréale des pores se stabilise autour de 0,11. Cette valeur se rapproche beaucoup de celle calculée pour la section complète (80 mm^2). Le tableau 5.6 reprend les résultats du tableau 5.5 afin de mieux cerner cette variation de la densité aréale en fonction de l'aire de l'image observée. Enfin, la figure 5.12 montre un graphique illustrant cette tendance asymptotique.

Image	Aire de l'image	Densité aréale (A_A)
G6	4,66	0,07
G7	5,50	0,09
G5	7,65	0,02
G2	11,74	0,11
G4	14,18	0,13
G1	17,10	0,10
G3	19,85	0,12
Total	80,68	0,10

Cette stabilisation de la densité aréale à une valeur semblable à celle de la section complète est elle un hasard. Toutefois, l'hypothèse que l'on puisse obtenir la porosité d'un granulat ou d'une roche en analysant quelques sections données du matériau mériterait d'être vérifiée. Dans le cas présent, l'aire moyenne d'un pore est de $0,028 \text{ mm}^2$ et l'aire d'une image, où l'on observe moins de variation de la densité aréale des pores, est autour de 15 mm^2 . Cela représente une aire d'étude environ 500 fois plus grande que l'aire moyenne des pores. Il apparaît qu'une étude statistique ou même géostatistique est à envisager.

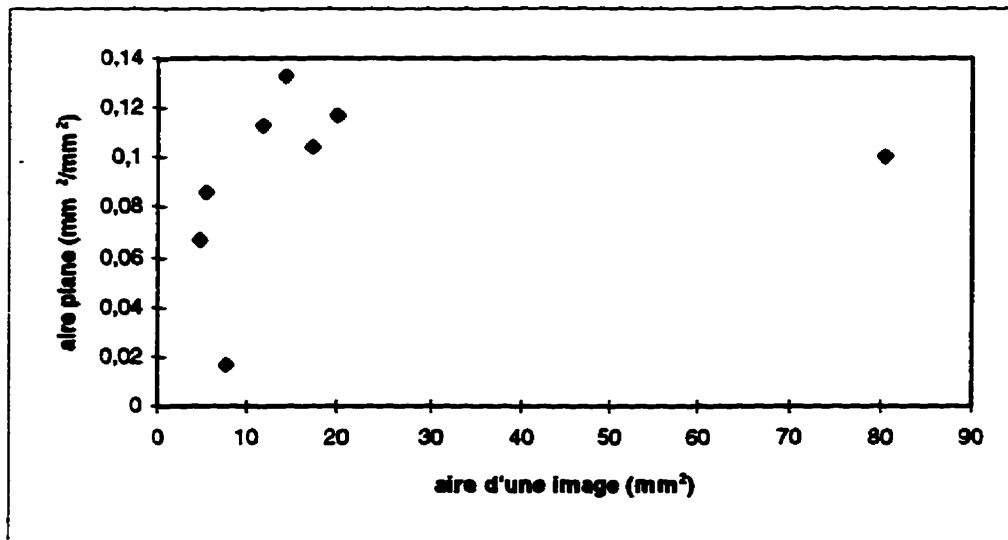


Figure 5.12 Relation entre la densité aréale des pores du granulat et l'aire de l'image étudiée

5.5.3 Densité surfacique des pores

Définissons tout d'abord ce que l'on entend par densité surfacique. Dans la section précédente, c'est la densité aréale des pores qui a été étudiée. Maintenant, on s'intéressera à la surface de l'enveloppe externe d'un pore. La densité surfacique, notée S_v , d'un pore dénote moins d'intérêt d'un point de vue mécanique. Cependant, celle-ci peut être utile dans l'étude des phénomènes de transport (diffusion, écoulement) dans les roches. On ne présentera ici que les résultats globaux, soit la densité surfacique que forment tous les pores dans le granulat. La densité surfacique s'exprime en mm^2/mm^3 .

Pour le calcul de la densité surfacique, on détermine le périmètre (B) de chacun des pores que l'on additionne par la suite. Le périmètre est un paramètre difficile à estimer avec un analyseur d'images. Prenons à titre d'exemple l'estimation de l'aire, ce paramètre est facilement déterminé puisque chaque pixel représente une surface et on additionne les pixels pour trouver la surface totale. Tel n'est pas le cas pour le périmètre, car on ne peut faire une somme de pixels pour calculer la longueur d'un segment et à plus forte raison si ces derniers sont disposés selon une diagonale. Une fois que le périmètre de chaque pore est obtenu, on calcule l'aire de surface de chaque pore par stéréologie. L'équation 4-16 est utilisée sans démonstration. Cette équation relie

le périmètre (mesure 2D) d'une particule à l'aire de surface (3D) de celle-ci. On obtient donc une densité surfacique totale des pores de $3,8 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$ à $30\times$ et $1,9 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$ à $15\times$ (Tab. 5.7). En faisant l'hypothèse que l'aire totale de la section est celle obtenue à $15\times$, on recalcule (à $30\times$) une densité surfacique totale de $3,5 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$.

TABLEAU 5.7
CALCUL DE LA DENSITÉ SURFACIQUE DES PORES DU GRANULAT

Échelle	Image	Périmètre total des pores	Aire de surface	Aire de la section	Densité surfacique
		B	$S = 4B/\pi$	A	$S_V = S/A$
		mm	mm^2	mm^2	mm^2/mm^3
30 ×	G1	50,9	64,8	17,10	3,8
	G2	42,2	53,7	11,74	4,5
	G3	56,8	72,3	19,85	3,6
	G4	60,8	77,4	14,18	5,5
	G5	6,8	8,65	7,65	1,1
	G6	10,0	12,7	4,66	2,7
	G7	14,2	18,1	5,50	3,3
	Total	241,7	307,7	80,68	3,8
15 ×	Mosaïque	128,7	163,9	86,98	1,9

Le tableau 5.8 présente les paramètres statistiques de base des données de périmètre des pores à l'échelle $15\times$ et $30\times$. On remarquera, là aussi, l'effet de l'échelle d'observation.

TABLEAU 5.8
PARAMÈTRES STATISTIQUES DE LA DISTRIBUTION DES PÉRIMÈTRES DES PORES DANS LA SECTION DU GRANULAT

Paramètre	Échelle	
	30 ×	15 ×
	mm	mm
Moyenne	0,81	1,23
Écart-type	1,19	1,16
Mode	0,10	0,37
Médiane	0,41	0,76
Valeur minimum	0,10	0,30
Valeur maximum	9,70	6,85
Nombre de données	272	99

L'écart entre les résultats s'explique par le fait que, à 15 ×, il y a perte de certains pores. La densité surfacique à 30 × est de $3,5 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$; ceci est la surface totale d'échange (tous les pores) pour tout le volume du granulat. Enfin, le périmètre de la section complète du granulat est de 65 mm. Le granulat a un diamètre de 12,5 mm et, en guise de comparaison, le périmètre d'un disque de 12,5 mm de diamètre est de 78,5 mm.

5.5.4 Distribution des pores dans le granulat

Dans les sections précédentes, le calcul du volume de pores ainsi que de la surface totale des pores dans le granulat fait intervenir la stéréologie. Une prémisses importante aux équations de stéréologie est que les mesures, servant à l'inférence des paramètres tridimensionnels, aient été faites sur des objets distribués aléatoirement dans le matériau. On vérifie donc si les pores sont distribués aléatoirement dans le granulat. Cet aspect revêt aussi un certain intérêt en ce qui a trait à la distribution de l'endommagement.

Afin d'analyser la distribution des pores, il faut être en mesure de connaître la position exacte de chacun d'eux dans un référentiel quelconque. Le système de référence est l'image 15 × du granulat où chaque pore sera représenté par son centre de gravité. MIPS permet de connaître les coordonnées des centres de gravité des objets (fonction *centre_of_gravity*). Cette fonction n'est pas directement accessible (dans la version utilisée) à partir de l'interface utilisateur de MIPS. Il est nécessaire d'intégrer cette fonction dans un programme TURBOPASCAL.

Les pores sont donc représentés par leur centre de gravité dans le référentiel que forme l'image 15 × du granulat. L'étude de la distribution des pores, à l'échelle 15 ×, ne pose aucun problème. Tous les pores visibles à cette échelle sont déjà dans le référentiel et on peut connaître leur position facilement. L'exercice est plus complexe à l'échelle 30 ×. À cette échelle, les pores sont représentés sur plusieurs images (G1 à G7). Ils ne sont donc pas tous dans le même système de référence. On ne peut donc pas calculer la position des centres de gravité à l'échelle 30 ×.

L'analyse de la distribution des pores à l'échelle 30 × nécessite l'élaboration d'un programme qui, à partir de la position des centres de gravité sur les images G1 à G7, recalcule leur position dans le

référentiel 15 ×. Le programme Translation_Rotation fait ce travail; le listage du programme est placé à l'annexe C.

L'algorithme général du programme Translation_Rotation est le suivant. Tout d'abord, on doit identifier un pore visible sur les deux images; par exemple, on trouve sur l'image G1 un pore que l'on reconnaît sur la mosaïque 15 ×. Le pore choisi, ou plutôt le centre de gravité du pore, sera le point de référence. On donne au programme les coordonnées initiales du centre de gravité du pore (soit x et y , sur l'image G1) et les coordonnées finales (soit x et y , sur l'image 15 ×). La différence des coordonnées (Δx , Δy) permet de calculer un vecteur de translation. Toutes les coordonnées des centres de gravité des pores de l'image G1 seront transformées à l'aide de ce vecteur afin de replacer les centres de gravité des pores sur l'image 15 ×; c'est la procédure Détermination_translation qui fait ce travail. Pour connaître les coordonnées des centres de gravité, on fait appel à un autre programme, ce dernier est présenté plus loin.

On a déjà dit que les images subissaient, lors de la construction de la mosaïque, une légère rotation. On doit ici tenir compte de cette rotation pour la relocalisation des centres de gravité dans le référentiel 15 ×. La rotation est un opérateur linéaire et il est possible de connaître les coordonnées de n'importe quel point ayant subi une rotation [WILLIAMS, 1991]. L'expression générale, dans R^2 , pour le calcul des nouvelles coordonnées (x' , y') d'un point en position (x , y) qui a subi une rotation θ , à partir de l'origine, est donnée par:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

Dans le cas présent, il faut déterminer la matrice de rotation, ce que fait le programme Translation_Rotation dans la procédure Détermination_rotation. L'origine est donnée par le centre de gravité du pore de référence. On doit fournir au programme les coordonnées initiales et finales d'un autre centre de gravité afin qu'il calcule la matrice de rotation. La rotation calculée sera ensuite appliquée à tous les centres de gravité des pores de l'image G1.

Enfin, le programme fait apparaître l'image G1, il fait une mise à l'échelle de cette image 30 ×. L'image est ramenée à l'échelle 15 ×. La translation de l'image vers la position qu'elle doit occuper dans le référentiel 15 × est ensuite effectuée. Le programme dessine à l'écran les points montrant la position des centres de gravité sur l'image. Le programme utilise alors des commandes de MIPS. Cette représentation à l'écran permet de vérifier l'exactitude du programme. Pour chaque image (G1 à G7), on fait tourner le programme. On obtient finalement un fichier contenant les coordonnées, dans un même référentiel, de tous les centres de gravité des pores observés sur les images 30 ×. Par suite de la rotation, il est difficile de recalculer précisément les coordonnées des pores. On observe donc un léger décalage dans la position des centres de gravité. L'objectif ici est de vérifier la distribution spatiale des pores sur la section; ce léger décalage est tout à fait acceptable compte tenu de la nature des mesures que l'on veut effectuer.

La figure 5.13 montre la position des centres de gravité des pores du granulat à l'échelle 15 ×. La figure 5.14 montre la position recalculée des centres de gravité des pores des images 30 × (G1 à G7) replacés dans un référentiel 15 ×. Ces images montrent aussi le contour de la section du granulat. Pour obtenir les figures 5.13 et 5.14, un autre programme TURBOPASCAL a été réalisé. Il s'agit du programme CDG présenté à l'annexe C. Ce dernier fait intervenir la fonction *centre_of_gravity* de MIPS. Ce programme calcule les coordonnées des centres de gravité des objets d'une image et les représente à l'écran.

L'étude de la distribution spatiale des pores consiste à dénombrer le nombre d'événement (un événement étant la présence d'un pore) à un endroit donné sur la section du granulat. La superposition d'une grille sur l'image montrant les centres de gravité (Fig. 5.13 et 5.14) permettra de déterminer leur distribution spatiale. Chacun des carreaux de la grille contient un nombre de points (centres de gravité); on ne tient compte que des carreaux complets, soit ceux totalement inclus dans la section. Il s'agit de compter le nombre de carreaux contenant 0, 1, 2, ..., n, centres de gravité, jusqu'à ce que tous les carreaux aient été pris en compte. Une fois ce dénombrement des carreaux terminé, on trace un histogramme montrant le nombre de carreaux contenant 0, 1, 2, ..., n, centres de gravité. Ce travail a donc été fait en utilisant les images représentées aux figures 5.13 et 5.14. Une grille, avec des carreaux de 1 cm × 1 cm, a été superposée à ces images

(Fig. 5.15) et, après dénombrement des carreaux, on obtient les histogrammes des figures 5.16 et 5.17.

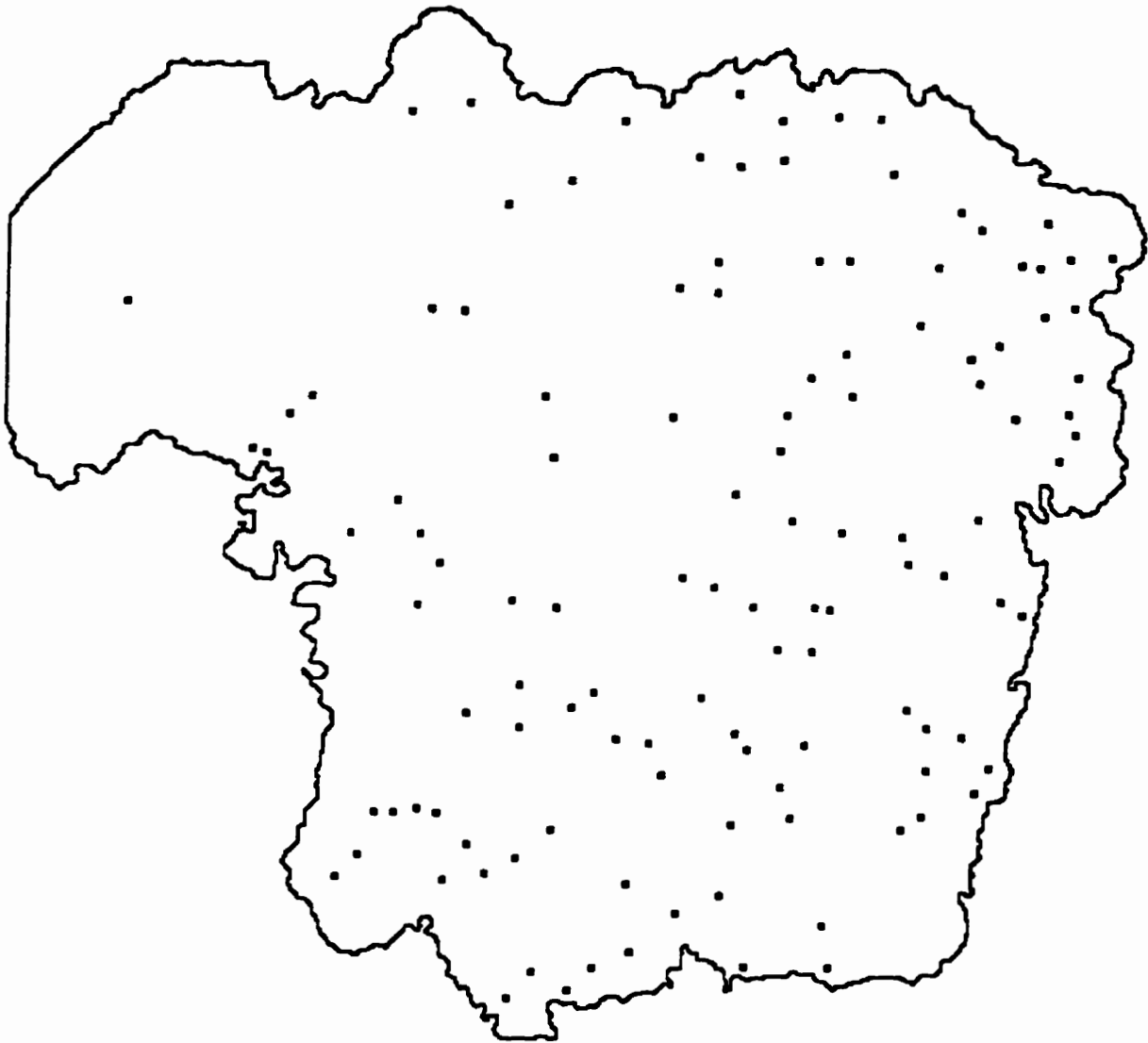


Figure 5.13 Image montrant la position des centres de gravité des pores observés sur l'image 15 × du granulat



Figure 5.14 Image montrant la position recalculée des centres de gravité des pores observés sur les images 30 × du granulat

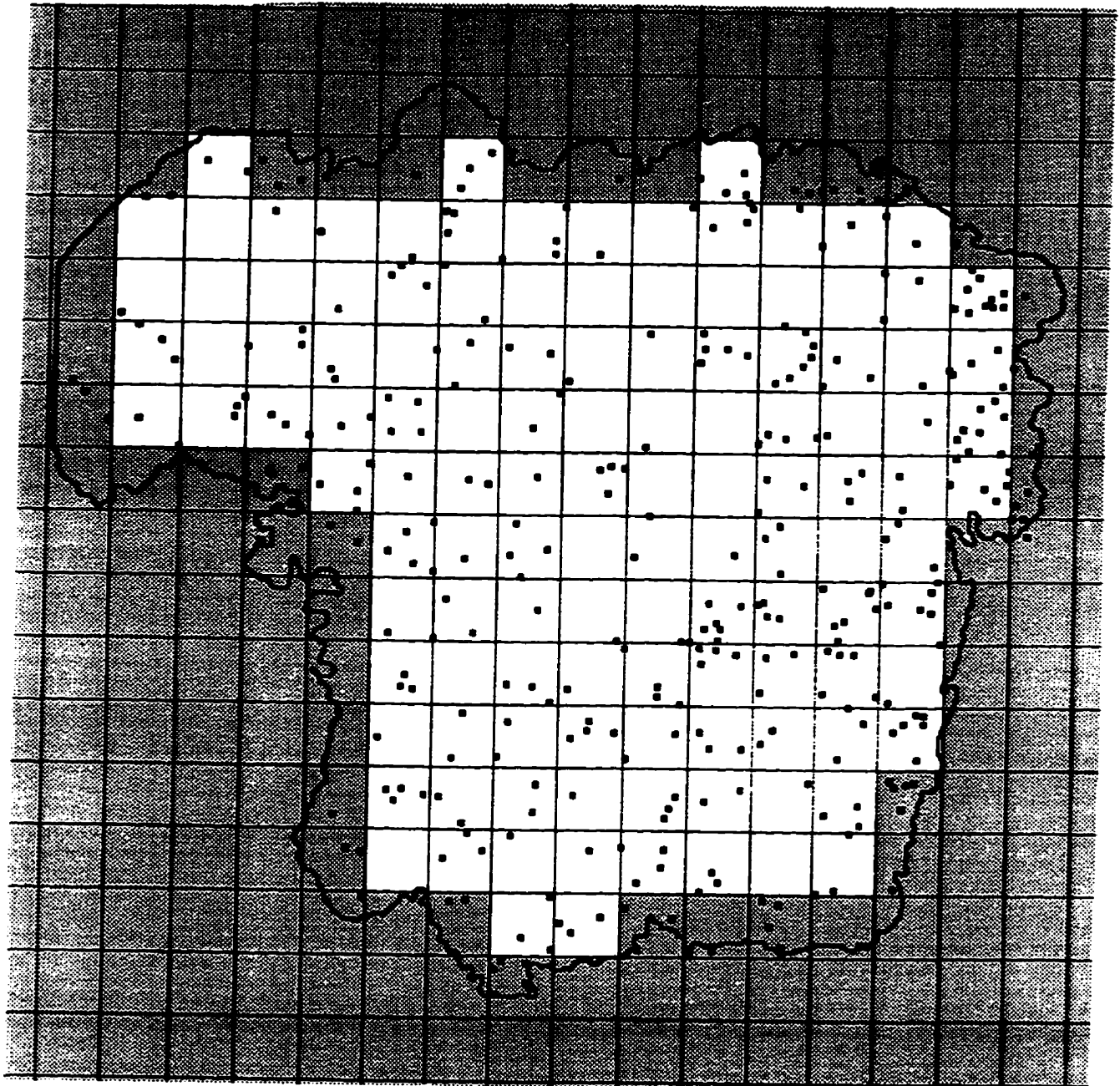


Figure 5.15 Image montrant la position recalculée des centres de gravité des pores observés sur les images 30 × du granulat ainsi que le grillage type superposé à l'image. Le même grillage a été superposé sur l'image de la figure 5.13

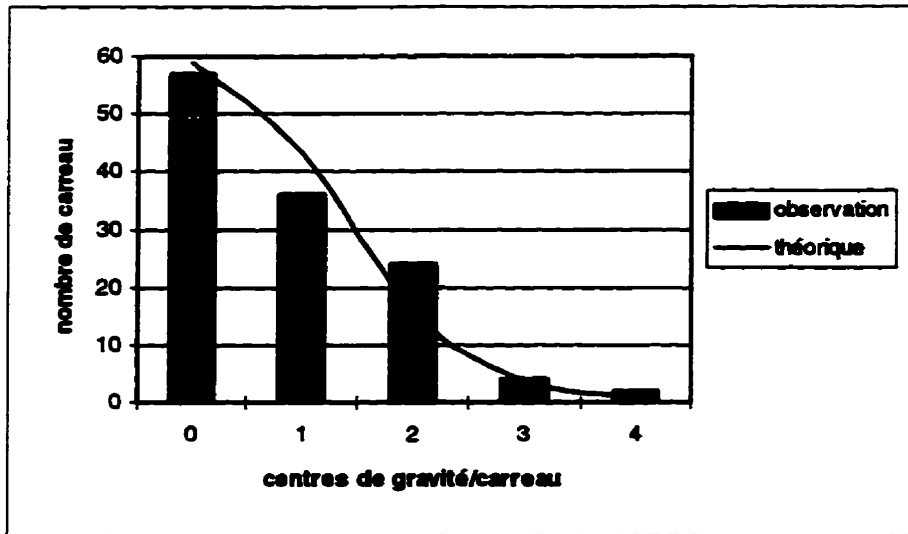


Figure 5.16 Histogramme de la distribution spatiale des centres de gravité des pores observés sur l'image 15 ×

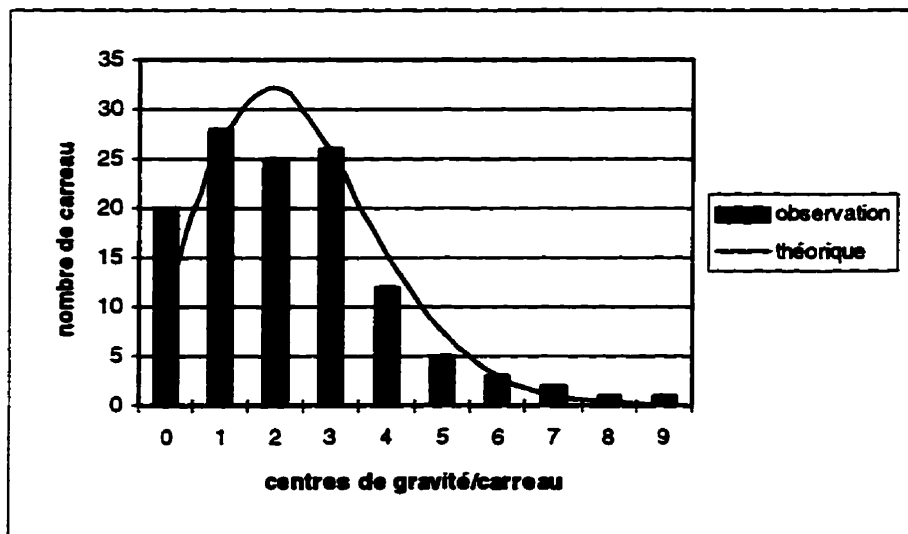


Figure 5.17 Histogramme de la distribution spatiale des pores observés sur les images à l'échelle 30 ×

Les histogrammes des figures 5.16 et 5.17 représentent la distribution spatiale des pores basée sur l'observation des images. On trouve aussi sur les histogrammes une courbe représentant une distribution théorique. Le modèle théorique utilisé est la loi de Poisson. Cette loi modélise la distribution de variables aléatoires discrètes. On se rappellera que le paramètre de la loi de Poisson est λ ; celui-ci est donné, pour chaque distribution, au tableau 5.8.

Visuellement, il semble que la loi de Poisson s'accorde bien avec les observations faites sur le granulat. Un test statistique permet de vérifier si effectivement le modèle théorique choisi se rapproche du processus expérimental. Le test choisi est celui du χ^2 (chi-deux). L'hypothèse à tester est la suivante: la distribution des pores dans la section du granulat obéit à une loi de Poisson, on notera cette hypothèse H_0 . Cette hypothèse sera rejetée si le $\chi^2_{\text{observé}}$ est plus grand que le $\chi^2_{\text{théorique}}$. L'équation ainsi que les tables permettant d'obtenir ces valeurs ainsi que toutes les particularités de ce test peuvent être obtenues dans de nombreux livres de statistique. Dans le cas où $\chi^2_{\text{observé}} \leq \chi^2_{\text{théorique}}$ alors on accepte H_0 . Bien sûr, il y a une probabilité que cette décision soit fautive, on a choisi une probabilité de 0,05 (5%) d'accepter à tort l'hypothèse et aussi que λ est inconnu. Le tableau 5.9 présente les résultats et les paramètres du test.

Paramètre	Échelle	
	15 x	30 x
λ	0,735	2,4
Degré de liberté	2	6
$\chi^2_{\text{théorique}}$	5,99	12,6
$\chi^2_{\text{observé}}$	5,8	11,8

D'après ce qui précède, on peut conclure que la distribution des centres de gravités des pores dans le granulat est aléatoire.

5.5.5 Orientation des pores

D'un point de vue mécanique, on le sait maintenant, la porosité peut influencer le comportement d'une roche. Les structures géologiques comme la foliation, le clivage, la schistosité modifient aussi les propriétés mécaniques des roches. On soupçonne, étant donné sa présence dans tout le granulat, que le clivage peut interagir avec les pores lors du concassage et ainsi contribuer à l'endommagement.

Le diamètre de Féret des pores est facilement obtenu par analyse d'images et il fait partie des paramètres mesur es sur les images du granulat. En plus de donner le diamètre de Féret maximum d'un objet, MIPS en donne aussi l'orientation par rapport à une ligne horizontale. Les valeurs données par MIPS varient de -90° à $+90^\circ$. La figure 5.18 illustre schématiquement le diamètre de Féret maximum et son orientation.

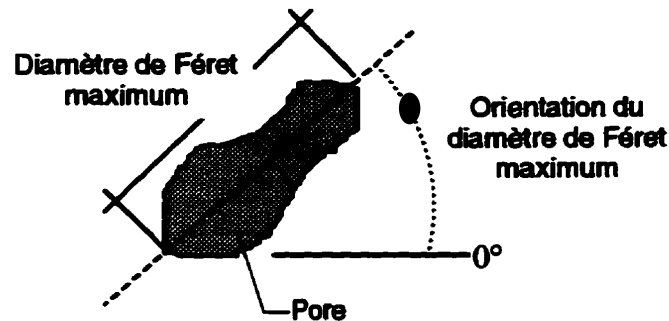


Figure 5.18 Représentation schématique du diamètre de Féret maximum et de son orientation

Les figures 5.19 et 5.20 montrent les roses d'orientation des diamètres de Féret maximums. Les roses d'orientation sont des représentations couramment employées en géologie structurale et en mécanique des roches. De tels graphiques permettent de vérifier l'orientation de systèmes de failles ou encore de familles de diaclases dans les massifs rocheux. Les roses des figures 5.19 et 5.20 donnent le pourcentage de pores (axe vertical) orient es dans une direction donnée (0° - 360°).

Les roses laissent voir que les pores sont orient es dans certaines directions préférentielles.   l'échelle $30\times$ (Fig. 5.19), on note que certains pores sont orient es 160° - 340° (10%) et d'autres   100° - 290° (7%) et à 80° - 260° (6%).   l'échelle $15\times$, deux orientations préférentielles sont marquées, soit à 160° - 340° tel qu'à $30\times$ et 40° - 220° , mieux définie qu'à $30\times$. Il a été mentionné que,   l'échelle $15\times$, seuls les pores ayant une aire supérieure à $0,01\text{ mm}^2$ sont visibles (Fig. 5.11). Il semble donc que les pores les plus gros soient orient es préférentiellement.

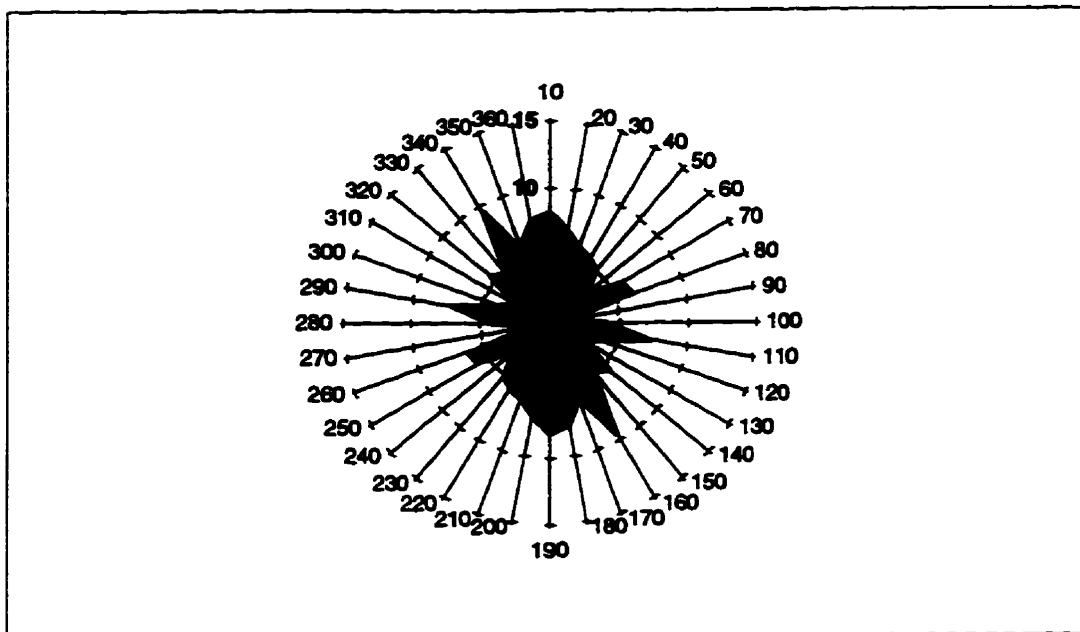


Figure 5.19 Rose du diamètre de Féret maximum des pores à l'échelle 30 ×

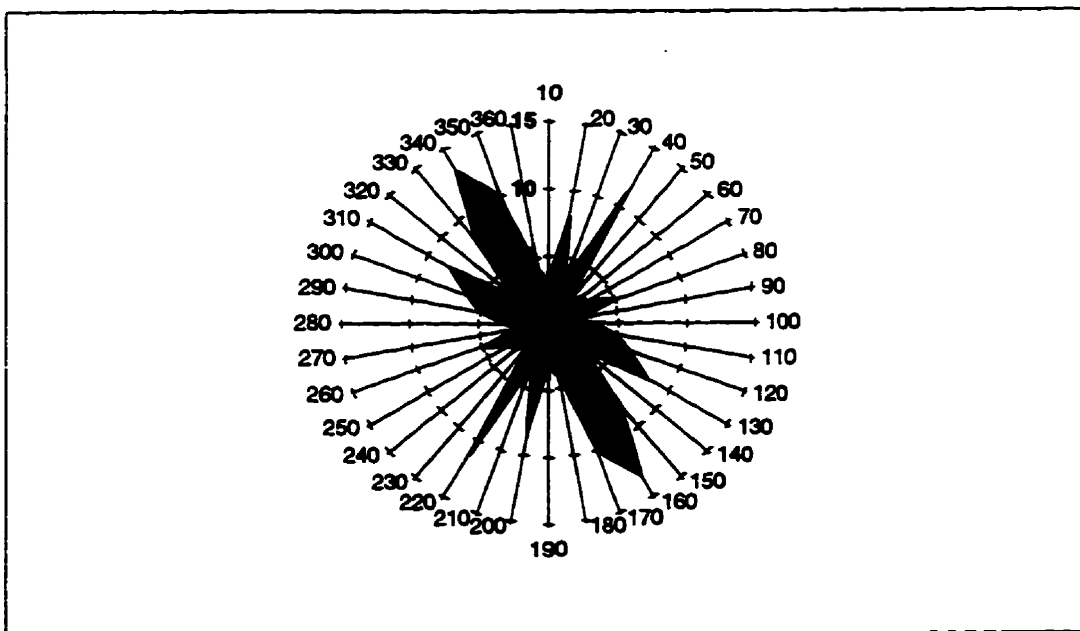


Figure 5.20 Rose du diamètre de Féret maximum des pores à l'échelle 15 ×

Cette orientation préférentielle est peut-être reliée à des structures présentes à l'échelle du massif rocheux. Toutefois, l'examen des carottes de forage ne permet pas de distinguer de structure comme la schistosité ou une foliation. Les dolomies de la *Milton Quarry* se retrouvent dans des régions tectoniquement très peu déformées [THURSTON et coll., 1992].

Le clivage, abondant dans le granulat, est probablement responsable de l'orientation préférentielle des pores. Une analyse plus rigoureuse de la figure 5.20 permet de voir que la valeur de l'angle entre les deux orientations préférentielles ($40-220^\circ$ et $160-340^\circ$) oscille entre 50° et 70° . Rappelons que la dolomite présente des clivages à 73° environ. On ne peut distinguer si les cristaux de dolomite, formant la roche, ont eux-mêmes une orientation préférentielle, ceux-ci conditionnent peut-être l'orientation des pores. En fait, le concassage induit des forces de tension élevées dans le granulat. S'il y a dans la roche saine des pores allongés, alors ces derniers constituent des défauts où prédominent les concentrations de contraintes (théorie de Griffith). Le clivage pourraient donc contribuer au développement des pores dans une direction préférentielle lors du concassage.

5.5.6 Forme des pores

Dans cette section, on s'intéresse plus particulièrement à la forme des pores. GERVAIS (1993) a étudié la forme et la taille de blocs de roche constituant un massif rocheux. On s'inspire ici de cette étude pour la détermination de la forme des pores du granulat.

La détermination de la forme d'un objet permet, par exemple, de le classer et cela en fonction de diverses caractéristiques qui sont, la plupart du temps, qualitatives. D'un point de vue quantitatif, on fait face au problème suivant: qu'est-ce que la forme d'un objet?

La forme est définie dans dictionnaire petit Robert 1 comme suit:

« Ensemble des contours d'un objet, d'un être, résultant de la structure de ses parties. »

Une autre définition est donnée par GROLIER et coll. (1991):

« qualité d'un objet, résultant de son organisation interne, de sa structure, concrétisée par les lignes et les surfaces qui le délimitent, susceptibles d'être appréhendée par la vue et le toucher, et permettant de le distinguer des autres objets indépendamment de sa nature et de sa couleur ».

La lecture de ces définitions laisse entrevoir la difficulté de quantifier la forme des objets. Il y a deux façons de quantifier la forme des objets, soit en comparant l'objet à une forme connue ou en effectuant une analyse paramétrique de l'objet. La première méthode est surtout utilisée en reconnaissance de forme (ex. reconnaissance de l'écriture pour le tri postal). La seconde méthode est celle qui sera utilisée pour caractériser la forme des pores.

L'analyse paramétrique d'un objet consiste à lui affecter un indice ou plusieurs indices de forme. Un indice de forme est un paramètre, un coefficient ou la combinaison de coefficients permettant de quantifier la forme d'un objet, et cela, indépendamment de sa taille. Il convient toutefois de préciser que les indices de forme et les diverses équations liées à la description des forme ont été développés pour l'espace euclidien et que, en analyse d'images, on travaille dans un espace discret. Malgré cela, ces indices peuvent permettre d'effectuer quelques comparaisons à partir des résultats de l'analyse d'images.

Il existe deux grandes catégories d'objet, les objets convexes et non convexes. Dans le domaine R^2 , un ensemble X est dit convexe si, pour tout couple de point appartenant à X , le segment droit reliant x_1 à x_2 est entièrement contenu dans X (Fig. 5.21).

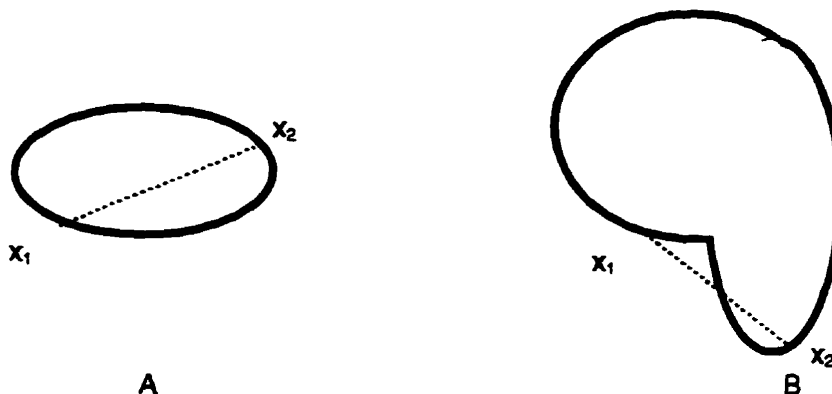


Figure 5.21 A) objet convexe B) objet non convexe

Il existe plusieurs indices de forme, certains sont spécifiques aux objets convexes, aux objets non convexes et d'autres applicables aux deux types; ces derniers sont des indices généraux de forme.

Les indices de forme des objets convexes dérivent de l'équation de SANTALO [1976] appelée l'inégalité isopérimétrique (éq. 5-2). Dans cette équation, L est le périmètre de l'objet et F est l'aire.

$$L^2 - 4\pi F \geq 0 \quad (5-2)$$

Si l'objet est un cercle (aire = πr^2 ; périmètre = $2\pi r$), alors le déficit isopérimétrique est nul. Cela dit, de tous les objets plans ayant une aire donnée F , l'objet circulaire est celui qui a le plus petit périmètre L .

L'un des indices des objets convexes, utile à la description de la forme des pores, est le coefficient de Blaschke 2D (éq. 5-3). Ce coefficient est dérivé de l'inégalité isopérimétrique.

$$CB = \frac{32}{\pi} \frac{F}{L^2} \quad (5-3)$$

Le coefficient de Blaschke 2D varie de 0 (segment) jusqu'à $8/\pi^2$ (cercle).

Le tableau 5.10 donne le coefficient de Blaschke 2D de quelques formes simples. Les grandeurs entre parenthèses sont, selon le cas, les nombres de côtés (polygones), les angles au sommet (losanges), ou les rapports des demi-axes (ellipses) [RISS, 1988]. On remarque, à la lecture du tableau 5.10, que le carré et l'ellipse dont le rapport des demi-axes est de 0,438, ont le même CB. Il est possible que certains objets, de forme tout à fait différente, présentent le même indice de forme. Il faudrait donc voir à utiliser un second indice de forme de manière à fournir une description quantitative adéquate de la forme d'un objet.

TABLEAU 5.10
COEFFICIENTS DE BLASCHKE 2D DE QUELQUES
FORMES PLANES
d'après Riss, 1988

Forme	CB
Cercle	0,81057
Ellipse (0,95)	0,80977
Polygone (50)	0,80950
Ellipse (0,50)	0,68936
Carré	0,63662
Ellipse (0,438)	0,63662
Losange (80°)	0,62695
Ellipse (0,40)	0,60423
Losange (70°)	0,59823
Polygone (3)	0,49007
Ellipse (0,30)	0,49906
Losange (30°)	0,31831
Ellipse (0,05)	0,09904
Segment	0,00000

Le second indice de forme (convexe) retenu est l'indice d'allongement IA. L'indice d'allongement est le rapport du rayon du plus petit cercle inscrit à l'objet convexe (φ_i) et du rayon du plus grand cercle circonscrit à l'objet (φ_e). L'équation 5-4 permet de calculer l'indice d'allongement IA.

$$IA = \frac{\varphi_i}{\varphi_e} \quad (5-4)$$

L'indice d'allongement varie de 0 (segment) jusqu'à 1 (cercle).

Les résultats obtenus par analyse d'images permettent de calculer ces indices de forme, puisque le périmètre, l'aire, les rayons du plus petit disque inscrit et du plus grand disque circonscrit à un pore ont été déterminés. Il se peut que la forme des pores soit de forme concave; il existe aussi des indices de forme pour déterminer le degré de concavité des objets. On ne s'intéressera ici qu'aux objets convexes.

Afin d'étudier les formes, il est nécessaire de trouver un moyen de les représenter graphiquement à l'aide des indices de forme calculés. Le diagramme IA-CB fait intervenir les deux indices de forme et, en plus, il est possible de tracer une courbe limite sous laquelle les objets convexes sont

représentés. Au-delà de cette limite, on ne peut conclure à la convexité ou à la concavité des objets. La limite est calculée d'après l'inégalité isopérimétrique et est exprimée en fonction de IA et CB. GERVAIS [1993] donne l'expression suivante (éq. 5-5):

$$0 \leq IA \leq \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{\pi^2}{8} CB}}{1 + \sqrt{1 - \frac{\pi^2}{8} CB}} \quad (5-5)$$

Le calcul des indices de forme, IA et CB, a été effectué pour les pores observés sur les images 15 × et 30 ×. À partir de ces valeurs, les diagrammes IA-CB ont été tracés et cela pour les deux échelles d'étude. De plus, les diagrammes IA-CB montrent la limite déduite de l'inégalité 5-5. Les figures 5.22 et 5.23 montrent les diagrammes IA-CB des pores du granulat.

Maintenant que l'on a quantifié la forme des pores, il est possible d'effectuer des comparaisons avec d'autres formes connues dont on peut calculer les indices de forme. Seules quelques formes planes seront utilisées pour la comparaison. Le cercle, le triangle équilatéral, le carré et le segment peuvent être représentés ponctuellement sur le diagramme puisque ces formes sont, en quelque sorte, des formes limites. Les losanges et les rectangles peuvent prendre diverses valeurs du coefficient de Blaschke 2D en fonction de l'allongement pour aboutir finalement au carré. Il en est de même pour l'ellipse qui, elle, atteindra la forme du cercle lorsque $IA = 1$. Les indices de forme de ces figures planes ont été placés dans un diagramme IA-CB sur lequel on a aussi les indices de forme des pores. Ceci permet de mieux cerner la forme des pores convexes. Seuls les pores convexes, c'est-à-dire ceux situés sous la limite représentant l'inégalité isopérimétrique, doivent être pris en compte. Les figures 5.24 et 5.25 montrent les diagrammes IA-CB des indices de formes expérimentaux (pores) et théoriques (formes connues).

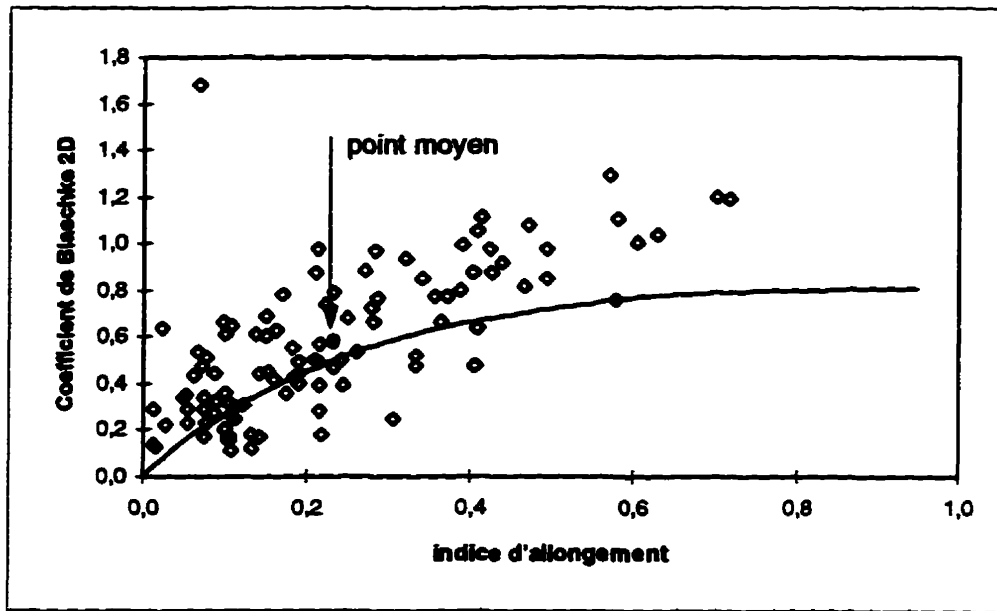


Figure 5.22 Diagramme IA-CB montrant les indices de forme expérimentaux des pores du granulat à 15 \times . La courbe représente l'inégalité isopérimétrique de Santalo (1976)

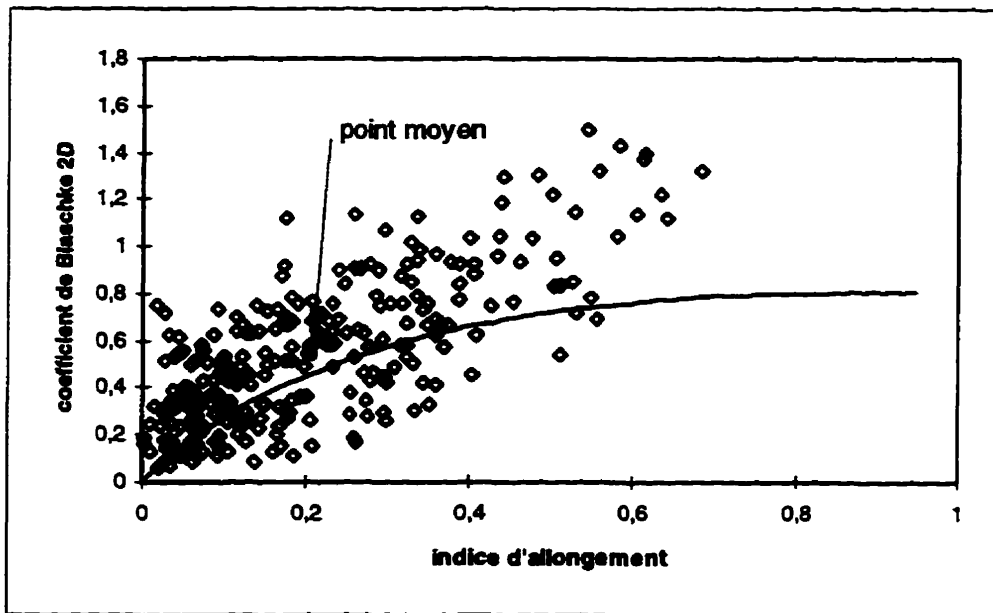


Figure 5.23 Diagramme IA-CB montrant les indices de forme expérimentaux des pores du granulat à 30 \times . La courbe représente l'inégalité isopérimétrique de Santalo (1976)

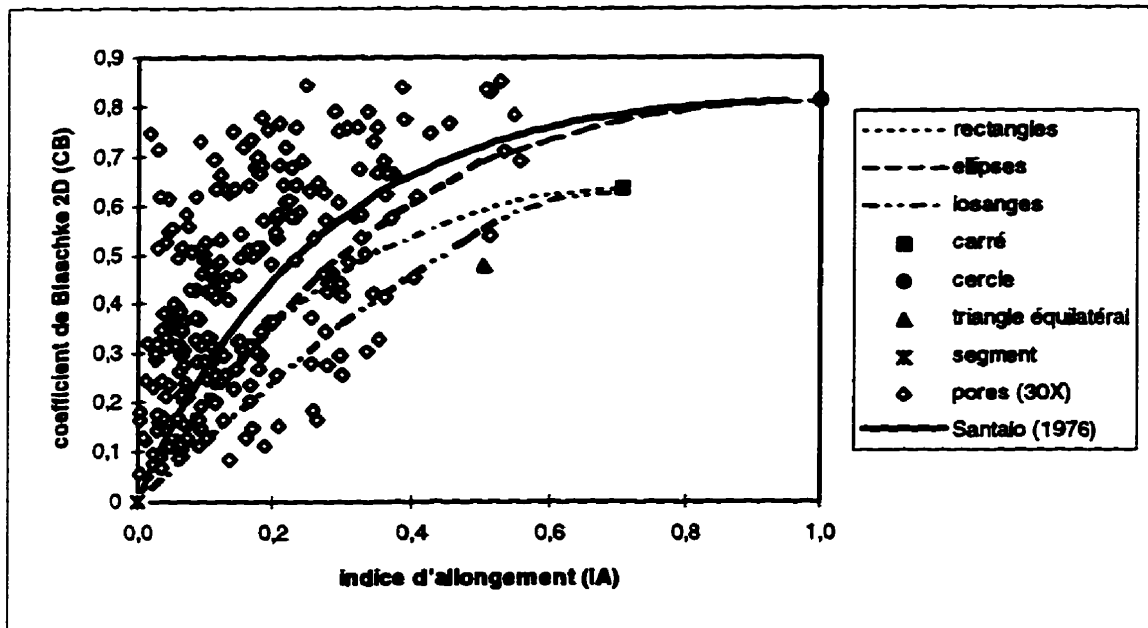


Figure 5.24 Diagramme IA-CB montrant les indices de forme expérimentaux (pores du granulat à 15 x) et les indices de forme théoriques (formes connues)

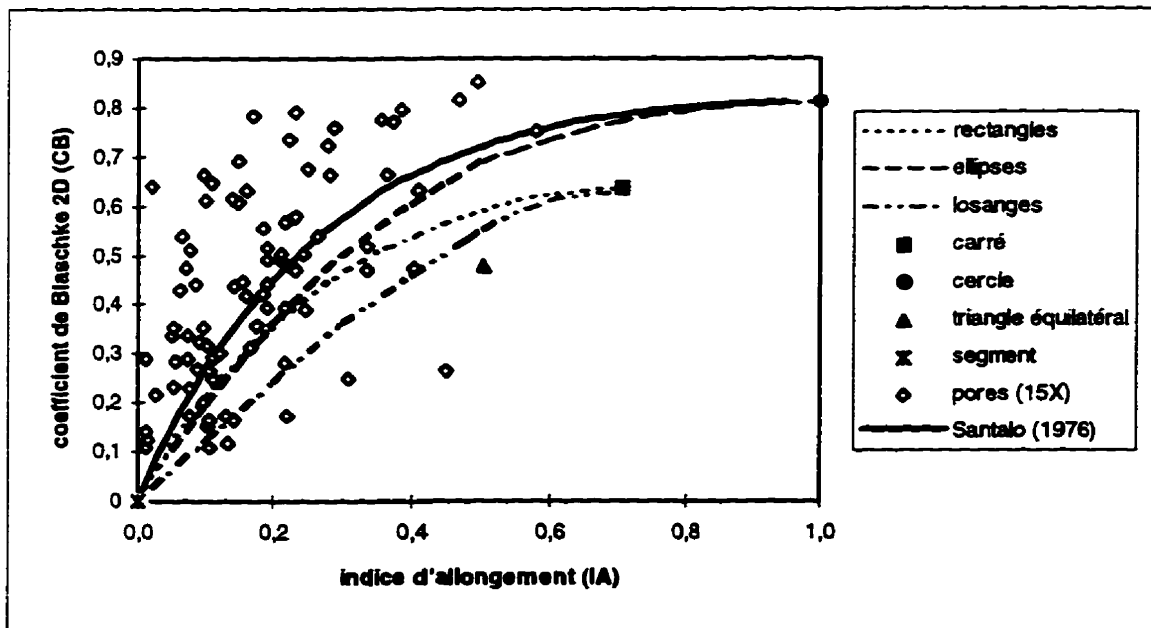


Figure 5.25 Diagramme IA-CB montrant les indices de forme expérimentaux (pores du granulat à 30 x) et les indices de forme théoriques (formes connues)

L'analyse des figures 5.24 et 5.25 permet de dire que les pores sont de forme plutôt aplatie. On observe que les points sont plus rapprochés du segment que du cercle. Les pores sont donc allongés. On observe aussi que, pour des indices d'allongement faibles ($< 0,20$), il est difficile d'associer une forme aux pores, car les courbes des formes théoriques sont très rapprochées à cet endroit. Au delà de $IA = 0,20$, les points semblent se regrouper autour des courbes des losanges, des rectangles et des ellipses. Parmi ces formes, la forme polygonale et allongée des pores est tout à fait plausible et cela pourrait être relié à la minéralogie de la roche. Les cristaux de dolomie se présentent, en 3D, sous forme de rhomboèdres et ils ont, en plus, un clivage parfait; ces minéraux se brisent donc facilement. Lorsque tronqués, ces rhomboèdres peuvent prendre une forme losange; on voit bien en lame mince de nombreux losanges accolés. Cette forme allongée des pores dans le granulat est peut-être une expression de l'endommagement, lequel serait issu d'une interaction entre le clivage des minéraux de dolomite et les pores préexistants dans la roche saine.

CONCLUSION

L'objectif de cette recherche était de vérifier l'applicabilité d'un processus de caractérisation permettant de quantifier l'endommagement des granulats concassés. L'endommagement d'un matériau est représenté par la présence de défauts dans sa structure, c'est-à-dire des cavités, inclusions, microfissures, etc. Dans le cas des roches, le clivage des minéraux, les microfissures, microcraquelures, les pores, etc. comptent parmi les défauts de celles-ci.

Étant donné la dimension réduite de ces défauts ainsi que celle du granulat les contenant, il devient difficile d'effectuer des mesures permettant de quantifier l'endommagement dû au concassage. Dans cette recherche, le microscope optique et le microscope électronique à balayage ont été utilisés pour caractériser un granulat concassé de dolomie. Ces microscopes ont permis de voir certains défauts, soit le clivage et les pores, fortement développés dans le granulat étudié. Toutefois, l'étude au MEB reste qualitative, car aucune mesure de porosité ne peut être effectuée. De plus, pour le granulat de dolomie, les défauts étaient facilement visibles à un grossissement de $30\times$, mais, à un tel grossissement, on ne peut voir la section complète du granulat avec le MEB. Notre intérêt s'est donc porté vers l'analyse d'images. Les techniques d'analyse d'images sont utilisées dans de nombreux domaines et, entre autres, en science des matériaux.

À partir de 22 images adjacentes prises au MEB, il fut possible de construire une mosaïque d'images, représentant la section complète du granulat. De plus, un algorithme de traitement des images permettant de faire une analyse quantitative de l'endommagement a été élaboré.

Puisque la porosité constitue l'un des défauts prédominant dans ce granulat, une analyse quantitative de celle-ci a donc été entreprise. L'analyse de la porosité a été faite sur une section du granulat et, afin d'obtenir des résultats pour la particule entière (volume), les principes de stéréologie ont alors été appliqués. L'analyse d'images et l'application de la stéréologie ont permis de faire ressortir quelques caractéristiques de la structure du granulat dolomitique concassé. Certains points quant à la porosité, la forme et la distribution des pores ont alors pu être précisés.

La porosité du granulat, mesurée par analyse d'images, est d'environ 9%. Ce résultat est plus élevé comparativement aux résultats des autres méthodes par infiltration de fluides. En effet, la méthode par infiltration d'eau donne une valeur de porosité de 2,8% et la porosimétrie au mercure donne une porosité de 3,5%. Toutefois, les méthodes par infiltration présentent certaines limitations. De plus, la porosité théorique est de 6,3%, mais ce calcul fait intervenir la masse volumique théorique des solides et la masse volumique observée. Cette dernière est, entre autres, basée sur l'absorption d'eau.

La porosité a été étudiée à deux grossissements, soit 15 × et 30 ×, et, pour chacun, les histogrammes de la distribution de l'aire des pores sont donnés. Ceux-ci permettent de constater qu'il y a une perte d'information à l'échelle 15 ×, les plus petits pores n'étant pas visibles.

Les pores sont orientés selon certaines orientations préférentielles. Les roses des directions des diamètres de Féret maximums des pores montrent très bien ces orientations. Sur la rose des directions de l'allongement des pores à 15 ×, les orientations sont mieux définies, indiquant ainsi que les pores les plus gros sont nettement orientés. L'orientation des pores est, selon nous, dictée par le clivage des minéraux de dolomite constituant la roche.

Avec l'analyseur d'images et l'élaboration de quelques programmes TURBOPASCAL, la distribution des centres de gravité des pores dans le granulat a pu être étudiée. Sans doute faut-il tenir compte de d'autres paramètres pour affirmer que les pores sont distribués de façon aléatoire. Néanmoins, la distribution des centres de gravité des pores milite en faveur d'une distribution aléatoire de ces derniers. Somme toute, bien que les pores aient une orientation préférentielle, ces derniers peuvent tout de même distribués aléatoirement dans le granulat.

L'indice d'allongement (IA) et le coefficient de Blaschke 2D (CB) sont des indices de forme qui ont été déterminés pour chaque pore du granulat. L'élaboration d'un diagramme IA-CB permet de dire que dans le cas où les pores sont convexes, ils ont une forme allongée. Par ailleurs, l'une de ces formes des pores correspond à la forme des minéraux de dolomite.

L'application des principes de stéréologie a rendu possible la détermination de la densité surfacique des pores, c'est-à-dire la surface totale de l'enveloppe externe des pores par unité de volume de granulat. Celle-ci est de $3,5 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$. Cette donnée est très intéressante dans le cadre d'études des phénomènes de transport, car elle permet de connaître la surface totale d'échange entre les pores et le milieu dolomitique.

D'après ce qui précède, on peut admettre que l'analyse d'images, la stéréologie et quelques notions de statistiques sont des méthodes qui, utilisées conjointement, sont applicables à l'étude de la structure et de l'endommagement des granulats dolomitique concassés. Ainsi, ces méthodes pourraient éventuellement s'avérer intéressantes pour l'étude de d'autres types de granulats. L'objectif principal de cette recherche est donc atteint. La synthèse des résultats permet de conclure à une influence notable de la structure et de la texture de la roche saine sur l'aspect structural du granulat concassé. Il semble bien que, dans le granulat dolomitique, l'endommagement dû au concassage se développe à partir d'une interaction entre la porosité primaire de la roche et le clivage des minéraux de dolomite.

Les recherches futures sur l'endommagement des granulats devraient s'intéresser, entre autres, à la possibilité d'étudier plusieurs images, prises localement, sur la section plutôt qu'à la construction d'une image globale du granulat. On pourrait alors étudier facilement quelques images de plusieurs granulats. Une étude comparative, entre une roche saine et un granulat concassé par divers concasseurs, permettrait de vérifier l'influence du procédé de concassage sur la structure du granulat. À partir de là, on pourrait relier l'endommagement initial et final et tenter de définir un paramètre d'endommagement des granulats. Enfin, l'étude de divers type de roches permettrait de connaître l'échelle à laquelle on perçoit l'endommagement ainsi que la façon dont il se développe dans le granulat.

ANNEXE A

Analyse des contraintes dans un solide élastique avec inclusion

1. Introduction

Cette annexe présente les résultats d'une modélisation par la méthode des éléments finis. La modélisation réalisée est celle de la variation des contraintes se développant dans un cylindre ayant une inclusion sphérique au centre. En fait, l'inclusion n'ayant pas les mêmes propriétés mécaniques que la matrice dans laquelle elle prend place, la distribution des contraintes à l'intérieur du solide est modifiée lorsque ce dernier est soumis à une charge de compression. Le point de mire de ce projet est donc la détermination de la distribution des contraintes à l'intérieur d'un solide de forme cylindrique contenant, au centre, une inclusion de forme sphérique. D'un point de vue pratique, le problème étudié peut être associé à la distribution des contraintes dans un cylindre de mortier (matrice) avec un granulat (inclusion) placé au centre. Notons que cette modélisation est faite pour un domaine de contrainte-déformation linéaire. De plus, on assume une adhérence parfaite entre les deux milieux.

2. Description du problème

Dans les BHP, les granulats sont plus rigides que le mortier les entourant, on devrait donc obtenir, pour une même déformation, une contrainte plus élevée dans le granulat que dans le mortier. Notre objectif est donc de déterminer l'intensité des contraintes, dans un granulat, en fonction de la charge à laquelle est soumis un cylindre de BHP. Les granulats ne présentent évidemment pas une forme régulière et il serait très difficile de modéliser un élément solide ayant une telle forme. Pour cette raison, notre problème sera simplifié en utilisant une sphère comme inclusion (granulat) placée dans un cylindre qui représentera la matrice du béton (Fig. A1). À ces deux éléments seront associées des propriétés mécaniques, c'est-à-dire le module de Young (E) et le coefficient de Poisson (ν).

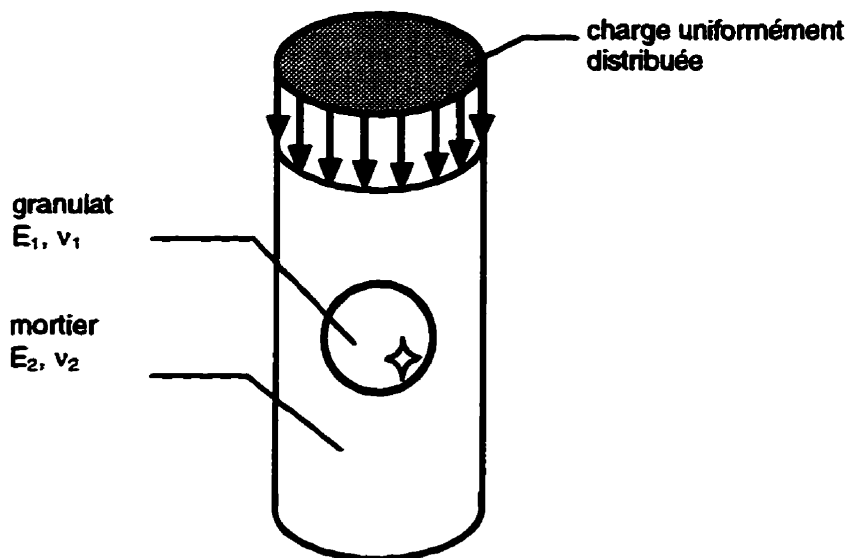


Figure A1 Représentation schématique du problème étudié

Puisque ce système est symétrique, il est alors possible de n'étudier que le quart du solide. Le cylindre a un rayon de 25 mm et une hauteur de 100 mm, quant à l'inclusion, son rayon est de 10 mm.

3. Modélisation par élément finis

Le cas faisant l'objet de cette modélisation est un problème d'analyse statique d'un solide linéaire élastique. Divers blocs de programme FORTRAN étudiés dans le cours *Méthode des éléments finis* GCI-770 [LAHOUD, 1994] servant à ce type d'analyse sont repris afin de construire un nouveau programme. Ce dernier permettra de calculer les contraintes à divers points dans le cylindre.

3.1 Maillage du domaine

La symétrie du système cylindre-inclusion permet que seul le quart du domaine soit considéré pour le maillage. Mentionnons aussi qu'il s'agit d'un problème axisymétrique; le cylindre est en fait un solide de révolution, car il est engendré par la rotation d'une surface plane rectangulaire autour d'un axe de rotation.

Les éléments choisis pour le maillage sont des quadrilatères à quatre noeuds. Le maillage de l'inclusion a été réalisé de la même façon que pour une plaque circulaire [HUGHES, 1987]. Le maillage est plus serré à l'interface inclusion-cylindre, ce qui permet d'obtenir plus de résultats pour cette région qui nous intéresse particulièrement. À partir de l'inclusion, le maillage est développé de façon à présenter des éléments aussi réguliers que possible (Fig. A2). Le domaine est formé de 42 éléments, 59 noeuds et 91 degrés de liberté (*ddl*). Étant donné la symétrie, les noeuds situés sur la droite $x = 0$ ont tous les *ddl* de la direction x fixes et les noeuds situés sur la droite $y = 0$ présentent les *ddl* fixes en y . Les *ddl* sur la droite $y = 50$ sont bloqués pour simuler le frottement entre les plateaux de la presse et le cylindre.

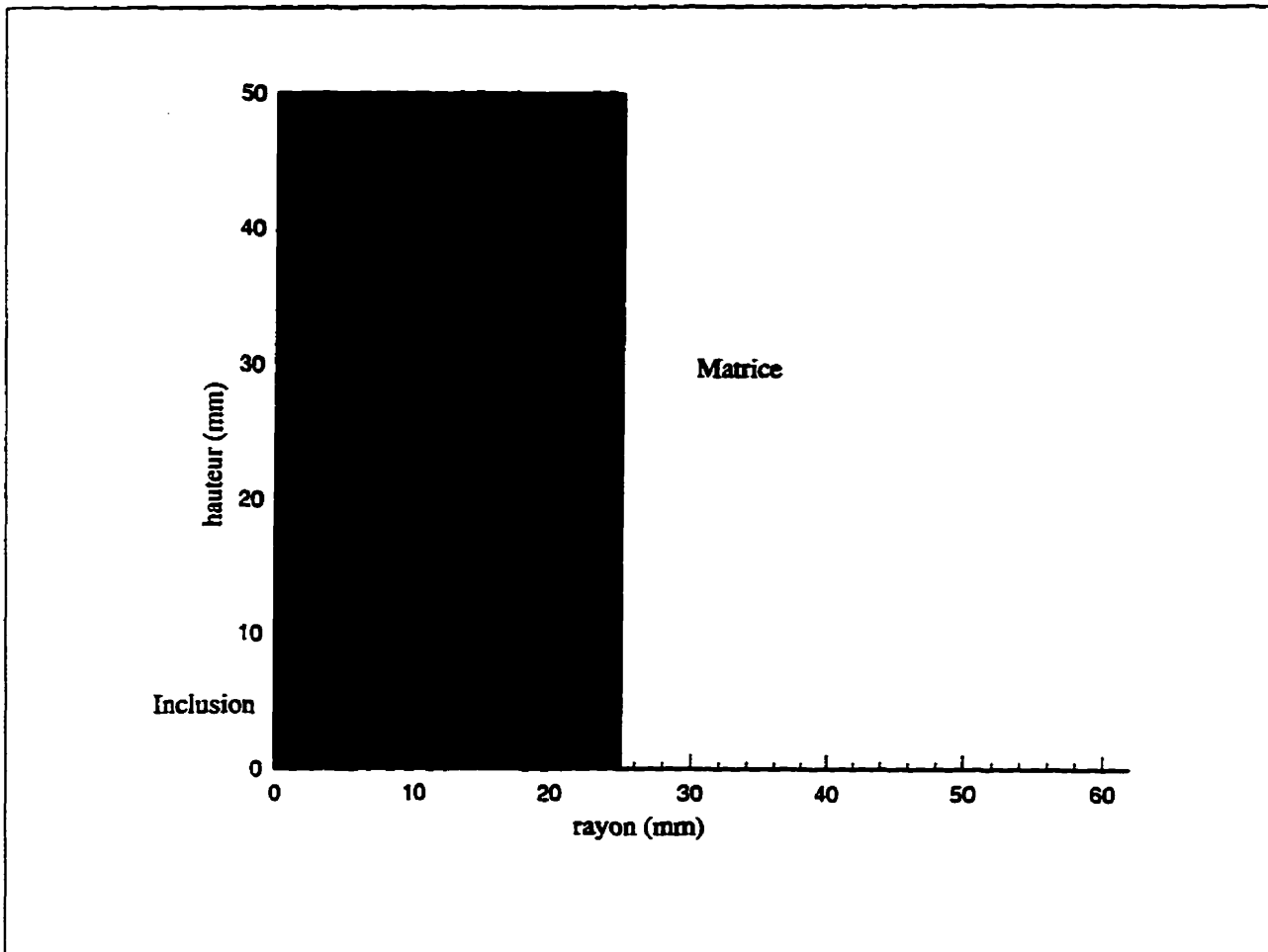


Figure A2 Maillage utilisé pour la modélisation

3.2 Programme *inclusio*

Afin d'effectuer la modélisation, un programme en langage FORTRAN a été construit à partir des programmes et éléments de programme utilisés dans le cours *Méthode des éléments finis*. En fait, le programme PR8.1, étudié dans ce cours, a été adapté aux particularités du présent problème. Dans ce cas, due à la géométrie complexe du maillage, la difficulté résidait dans la façon de fournir le vecteur de localisation (*steering vector*) et la matrice des coordonnées (COORD) pour chaque élément. Pour ce faire, les éléments de programme LNODES, ELIS et ECOORD ont remplacé l'élément VGEOM du programme PR8.1. Le sous-programme LNODES fait la correspondance

entre l'élément et les noeuds qui lui sont associés, le sous-programme ELIS détermine le vecteur de localisation pour l'élément et ECOORD associe les coordonnées aux noeuds de l'élément. Notons aussi que le sous-programme SHBAND a été introduit dans le programme *inclusio*; cela évite de calculer la largeur de la demi-bande de la matrice symétrique (IHBW).

Le fichier des données permettant au programme de débiter sa série de calculs doit contenir les informations suivantes:

- nombre d'éléments (NEL);
- nombre d'éléments formant l'inclusion (NEI);
- nombre de noeuds du système (NNS);
- nombre de noeuds avec des *ddl* fixes (NRN);
- nombre de noeuds avec une charge (NL);
- nombre de points de Gauss (NGP, NGP1);
- coordonnées des noeuds (x, y);
- numéro des noeuds associés à un élément donné;
- propriétés mécaniques de l'inclusion et de la matrice (E, ν);
- numéro des noeuds avec *ddl* fixes (NF *data*);
- charges aux noeuds.

Les résultats des calculs effectués par le programme sont placés dans un fichier. Celui-ci contient de nombreuses informations, soit le nombre de *ddl* actifs, IHBW, les coordonnées des noeuds des éléments, les charges et les déplacements aux noeuds et enfin les contraintes et les déformations ($\epsilon_z, \epsilon_r, \epsilon_{rz}, \epsilon_\theta, \sigma_z, \sigma_r, \sigma_{rz}, \sigma_\theta$) aux points d'intégration de Gauss.

3.3 Vérification du programme

Afin de s'assurer que les résultats des calculs sont valables, des instructions ont été ajoutées à ce dernier afin qu'il produise un fichier *verif.out* permettant de vérifier que la correspondance entre les coordonnées des noeuds, numéro des noeuds et numéro des éléments est exacte, en plus de donner une liste des *ddl*. L'exemple du problème axisymétrique présenté dans les notes du cours d'éléments finis a été traité à l'aide du programme *inclusio* et les résultats obtenus sont identiques à ceux obtenus par le programme PR8.1. Les résultats obtenus à l'aide de ce nouveau programme sont donc acceptables.

Une modélisation des contraintes dans un cylindre sans inclusion a tout d'abord été effectuée. Ceci permet de s'assurer que la distribution des contraintes est uniforme à l'intérieur du cylindre. La figure A3a montre la distribution des contraintes σ_z obtenue à l'aide de *inclusio*. Sur cette figure, les pics élevés représentent des contraintes faibles et le centre de l'inclusion se trouve environ à la coordonnée 0,39; 0,39 mm (point de Gauss). On note après examen de cette figure que les contraintes sont homogènes partout dans le cylindre sauf à l'extrémité où la charge est appliquée. GRAMBERG (1989) indique que, par suite de la friction entre les plateaux et l'éprouvette lors de la compression, l'éprouvette ne peut se déformer latéralement aux extrémités, ce qui modifie l'état de contrainte à cet endroit. La figure A3b montre aussi la distribution des contraintes dans un cylindre ($L/D = 2$) soumis à une compression [GRAMBERG, 1989], on remarque que les résultats obtenus avec *inclusio* sont très similaires.

4.0 Résultats de la modélisation

Une modélisation a été faite en utilisant quelques-uns des paramètres mécaniques recueillis par BAALBAKI (1990) lors de ses travaux de recherche soit les propriétés des mortiers de BHP ainsi que celles du granite de Ste-Sophie. Notons que le coefficient de Poisson pour le mortier a été choisi puisqu'aucune valeur n'était disponible.

TABLEAU A1 PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES ÉLÉMENTS UTILISÉS POUR LA MODÉLISATION		
Matériau	E (MPa)	ν
Granite (inclusion)	50000	0.1
Mortier (matrice)	37000	0.2

Les résultats des calculs montrent que, dans l'inclusion, les contraintes axiales sont plus élevées. La contrainte initialement appliquée est de 100 MPa à l'extrémité du cylindre et une contrainte σ_z de 112 MPa en moyenne est calculée par *inclusio* dans l'inclusion. Puisque les deux éléments n'ont

pas la même élasticité, on devait s'attendre à une telle variation des contraintes dans l'inclusion. Les graphiques des figures A4 et A5 présentent les contraintes dans le solide et on peut voir facilement que, dans l'inclusion, la contrainte axiale est plus élevée que celle appliquée sur le cylindre. Quant aux contraintes radiales et tangentielles, celles-ci sont moins élevées, mais elles sont négligeables comparativement à la charge axiale de 100 MPa.

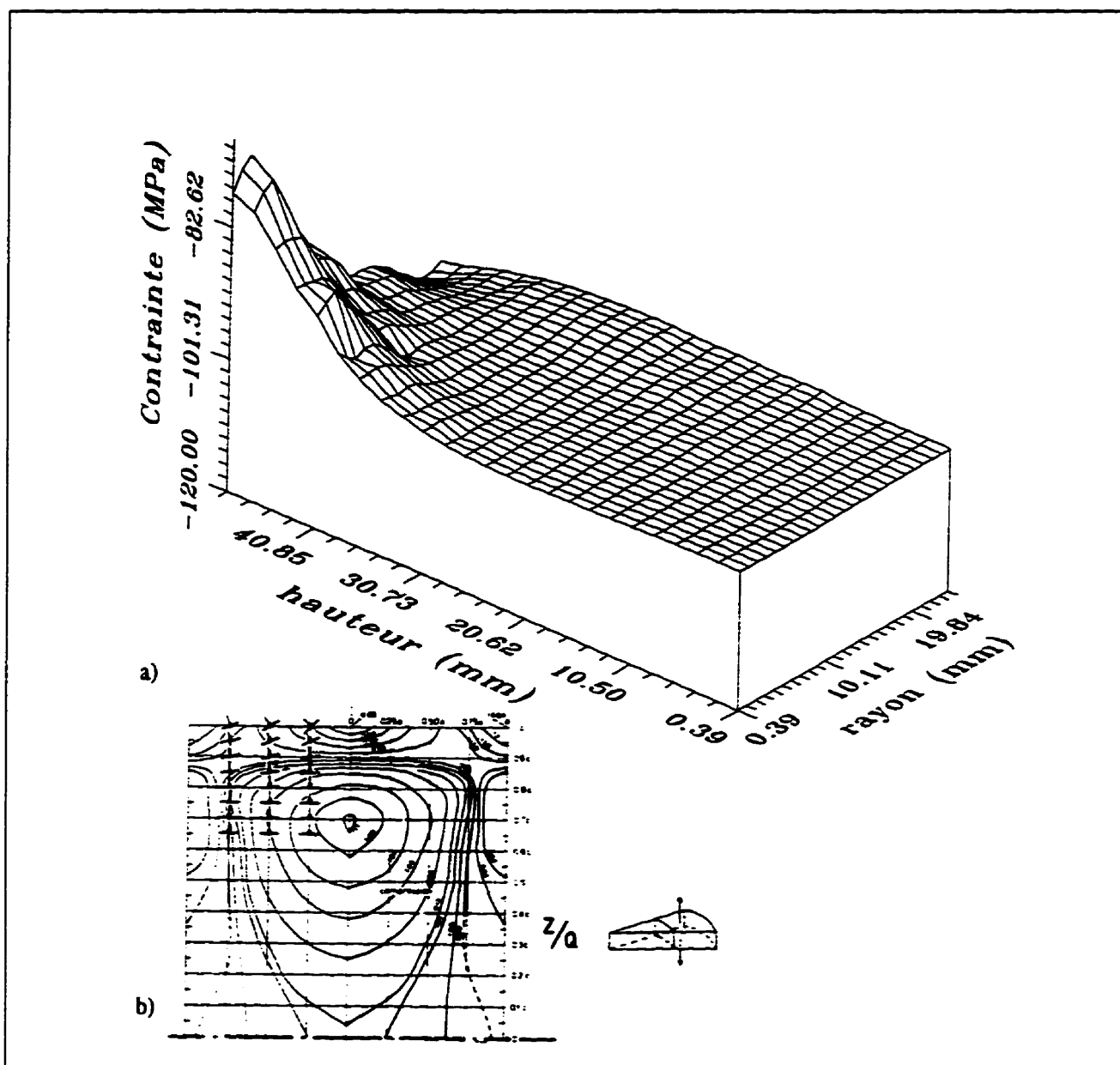
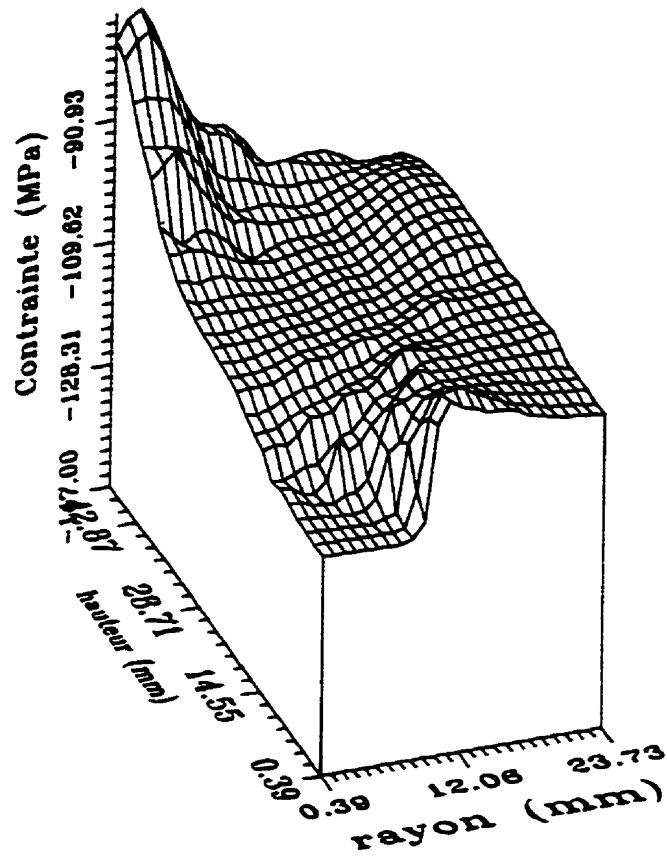
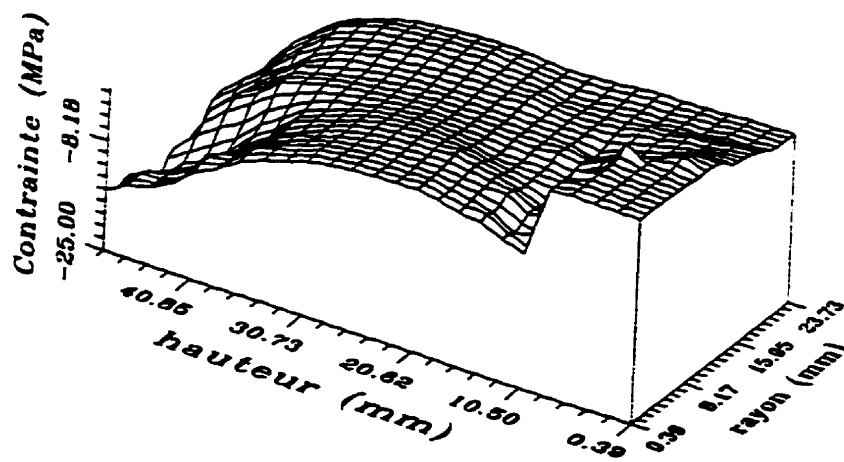


Figure A3 a) distribution des contraintes σ_z dans un cylindre homogène calculées avec *inclusio*; b) contraintes dans un cylindre selon Gramberg (1989)



CONTRAINTES AXIALES σ_z



CONTRAINTES RADIALES σ_r

Figure A4 Distribution des contraintes σ_z , et σ_r dans le cylindre ($E = 37000$ MPa) avec une inclusion ayant un module de Young de 50000 MPa

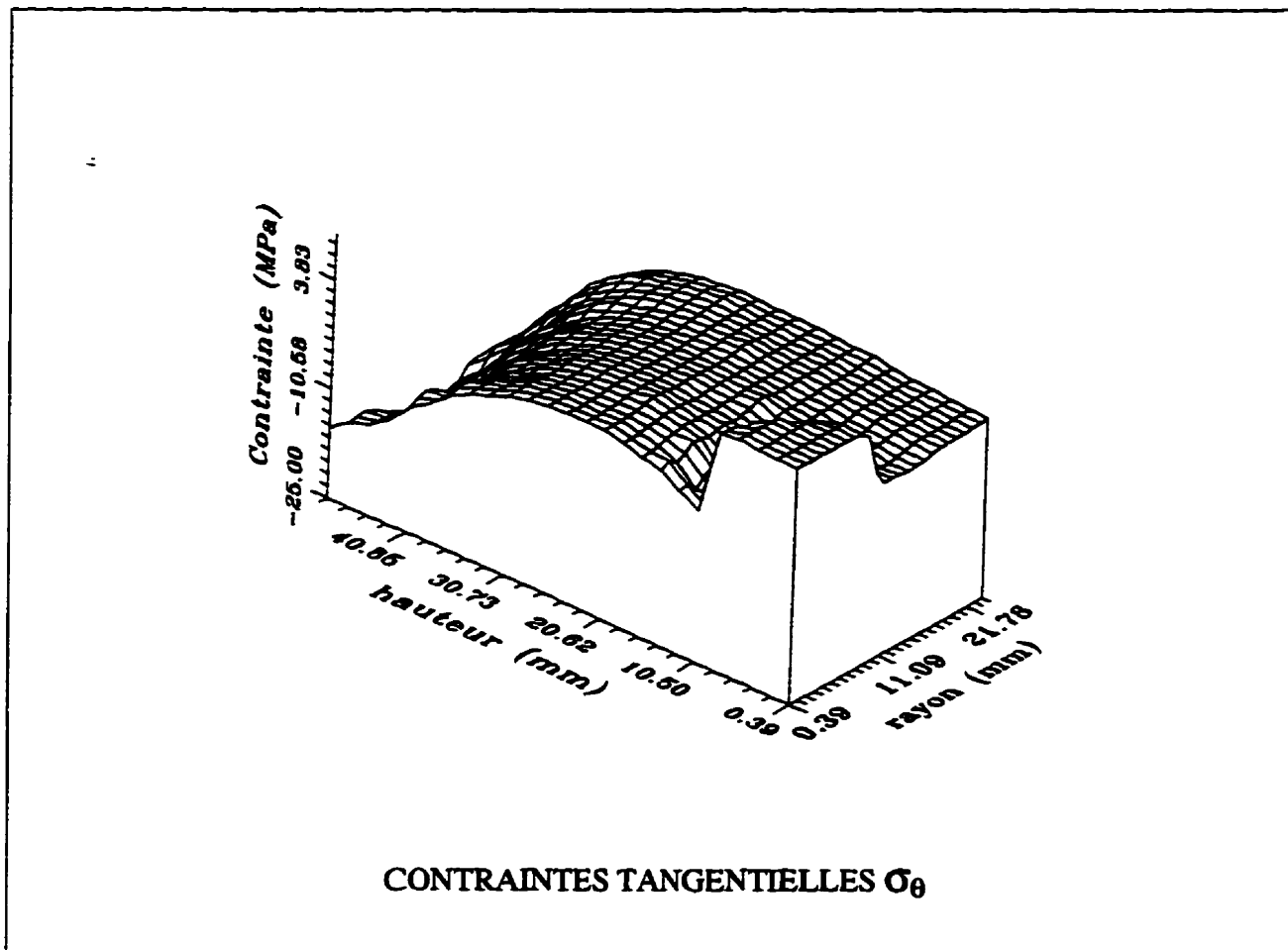


Figure A5 Distribution des contraintes σ_{θ} dans le cylindre avec une inclusion

Finalement, le programme *inclusio* a rendu possible le calcul d'une courbe montrant le pourcentage de la contrainte appliquée à l'extrémité du cylindre qui se développe dans l'inclusion en fonction du rapport des modules de Young de chaque phase (coefficient de Poisson fixe). Cette courbe est présentée à la figure A6. On remarque que, lorsque l'inclusion a un module de Young plus élevé que la matrice, la contrainte dans l'inclusion peut atteindre environ 180% de la contrainte initiale appliquée à l'extrémité du cylindre.

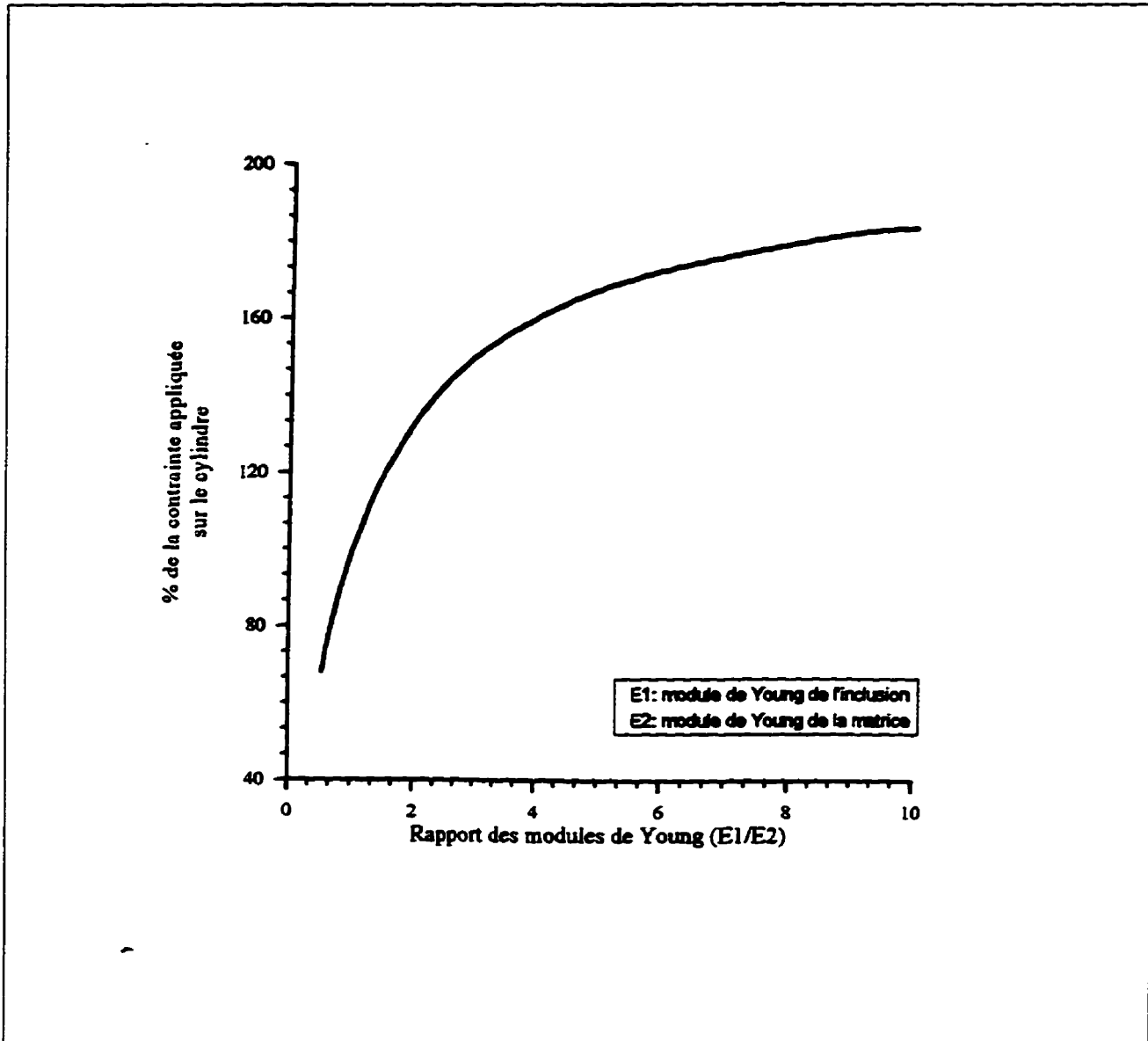


Figure A6 Graphique montrant la contrainte σ_2 transmise autour de l'inclusion en fonction du rapport des modules de Young

CONCLUSION

Cette modélisation montre que, dans un solide ayant deux phases dont les constantes élastiques sont différentes, on observe une variation des contraintes dans ce solide. De plus, la grandeur des contraintes dans l'inclusion est fonction du rapport des modules de Young des matériaux. Ceci revêt une certaine importance dans le cas des bétons à haute performance, car il s'agit là d'un

matériau comportant deux phases soit le mortier et les granulats. Dans la majorité des cas, le granulat a un module de Young plus élevé que le mortier. La connaissance du niveau de contrainte autour du granulat peut être utile pour la sélection des granulats. L'influence du coefficient de Poisson pourrait éventuellement faire l'objet d'une étude.

ANNEXE B

Résultats des mesures par analyse d'images

IMAGE #	MARQUEUR	PARTICULE #	AIRE mm car.	PERIM. mm	FERET mm	Rc mm	RI mm	DECLIN. degré	Xg mm	Yg mm	Nbr. pixels
G1	1	A	0,48078	7,50337	2,08068	2,07	0,13	6,22			
	2	B	0,11324	2,78586	0,69183	0,705	0,119	3,069			
	3	D	0,21331	3,28738	0,9867	1,03	0,12	9,9			
	4	E	0,02863	0,89659	0,26981	0,3	0,08	-13,51			
	5	G	0,04769	1,70709	0,49625	0,54	0,05	68,14			
	6	H	0,04175	1,81516	0,46978	0,473	0,076	11,37			
	7	J	0,00718	0,30859	0,11175	0,124	0,058	39,81			
	8		0,00585	0,39895	0,1821	0,19134	0,01134	-3,30549	350	49	46
	9		0,01082	0,57555	0,17762	0,19067	0,02047	17,1824	358	58	85
	10		0,09888	1,36614	0,40085	0,42247	0,21523	84,7931	227	97	777
	11		0,00318	0,18707	0,07925	0,08013	0,03111	-23,4207	110	89	25
	12		0,0238	1,29704	0,30286	0,31912	0,01291	-78,1069	297	101	187
	13		0,00331	0,22305	0,09877	0,11023	0,02494	31,7497	396	96	28
	14		0,05714	1,54282	0,45215	0,4936	0,01794	-86,9269	277	116	450
	15		0,00458	0,34101	0,14328	0,14966	0,00802	21,494	105	101	36
	16		0,00331	0,18048	0,07347	0,08395	0,03987	-8,21612	257	100	26
	17		0,01247	0,76471	0,2212	0,25445	0,01636	-34,7246	398	108	98
	18		0,00305	0,20827	0,08549	0,09882	0,00281	-7,05519	119	104	24
	19		0,02838	0,77284	0,25538	0,28802	0,08917	4,71669	178	128	223
	20		0,03042	1,20157	0,28829	0,32474	0,02395	-14,7709	229	138	239
	21		0,00687	0,47531	0,21028	0,21422	0,01464	-11,5215	322	135	54
	22		0,03563	1,80422	0,41097	0,43476	0,02097	13,2937	320	146	280
	23		0,01184	0,41167	0,14126	0,15303	0,08128	75,0843	349	148	93
	24		0,00458	0,35401	0,1585	0,16651	0,01412	-23,4207	302	153	36
	25		0,00433	0,19824	0,0883	0,07742	0,04967	-27,4655	79	157	34
	26		0,07467	1,65418	0,53622	0,54103	0,15074	-33,2491	362	176	588
	27		0,00331	0,17854	0,09416	0,07402	0,04288	79,1104	218	176	26
	28		0,1041	3,17562	0,79636	0,85969	0,05723	-44,3315	152	220	818
	29		0,00649	0,3373	0,14881	0,1647	0,03378	12,2208	109	210	51
	30		0,02036	0,74391	0,26254	0,27968	0,07151	-53,1196	134	217	160
	31		0,00954	0,56711	0,22868	0,24252	0,00986	-24,6385	308	216	75
	32		0,03016	1,14849	0,44954	0,47398	0,01062	4,01808	101	223	237
	33		0,06325	1,45687	0,39342	0,42371	0,14222	-73,9034	261	234	497
	34		0,00624	0,32215	0,13982	0,15144	0,03385	64,3147	413	227	49
	35		0,53233	9,69722	1,58818	1,7227	0,0335	7,2163	326	274	4183

74	26	0.00281	0.17458	0.06594	0.08859	0.02311	-79.4092	275	169	25
75	27	0.04534	1.59291	0.49191	0.52826	0.00191	9.75415	243	182	404
76	28	0.0073	0.37504	0.15008	0.17066	0.02085	14.2881	288	175	65
77	31	0.00865	0.44845	0.17588	0.18978	0.04395	-15.2626	261	197	86
78	32	0.02862	0.93829	0.29981	0.33725	0.02891	-63.5973	295	207	255
79	35	0.01021	0.67028	0.16232	0.18845	0.01416	-34.7827	159	206	91
80	36	0.00438	0.21653	0.08684	0.08787	0.04439	-12.3141	74	210	39
81	37	0.00954	0.43687	0.17082	0.20641	0.03353	-44.8055	144	220	85
82	38	0.02233	0.73524	0.2419	0.25229	0.08711	-17.8327	85	226	199
83	39	0.00247	0.14367	0.05588	0.08101	0.03051	29.8136	122	227	22
84	40	0.00673	0.31458	0.11084	0.13072	0.04705	9.636	322	235	60
85	41	0.37755	7.57918	1.02893	1.40537	0.05009	-81.874	257	284	3384
86	43	0.16252	3.18651	0.65757	0.77086	0.16026	-88.9439	123	289	1359
87	44	0.00831	0.31539	0.11852	0.12973	0.06816	59.2501	310	281	74
88	45	0.00393	0.24948	0.11064	0.11881	0.02765	9.636	294	258	35
89	46	0.01515	0.6425	0.27063	0.27193	0.01456	9.85075	201	281	135
90	50	0.00862	0.36673	0.12559	0.13554	0.04492	47.5041	306	287	59
91	51	0.00999	0.43673	0.12099	0.15066	0.04903	84.2508	219	295	89
92	52	0.00348	0.26256	0.10304	0.12196	0.02225	-53.9775	259	304	31
93	53	0.00281	0.21353	0.09865	0.10184	0.01349	-28.6228	249	312	25
94	54	0.00292	0.21966	0.08884	0.09549	0.0043	12.3141	92	356	26
95	56	0.0037	0.31382	0.15999	0.17954	0.00684	9.99927	100	367	33
96	57	0.06105	2.06123	0.70035	0.70979	0.02145	35.5746	169	369	644
97	59	0.00606	0.32602	0.1346	0.13708	0.04455	-7.90857	212	376	54
98	61	0.00314	0.21081	0.08252	0.08802	0.01518	63.8572	152	385	28
99	63	0.00516	0.39056	0.10141	0.113	0.03107	-33.22	264	430	48
100	64	0.04579	1.76518	0.58536	0.61941	0.05879	-6.3577	96	437	408
101	65	0.04085	1.27397	0.47277	0.48846	0.05694	1.1223	173	434	364
102	66	0.00426	0.25902	0.09871	0.10222	0.02698	10.8136	273	430	38
103	2	0.00305	0.17457	0.0817	0.08378	0.02764	8.87893	236	46	24
104	3	0.12418	3.31554	0.72547	0.7927	0.05206	36.227	291	72	976
105	5	0.03652	1.82357	0.42436	0.46561	0.08642	-28.3863	344	65	287
106	6	0.00471	0.30823	0.15266	0.18838	0.01519	-82.4039	388	65	37
107	7	0.01489	0.57267	0.17332	0.18558	0.05282	21.333	201	71	117
108	8	0.00903	0.48944	0.20568	0.20999	0.01334	-33.49	233	79	71
109	9	0.00394	0.20836	0.08884	0.09545	0.02684	-83.4789	190	80	31
110	10	0.00483	0.30526	0.12045	0.13436	0.00539	70.4233	180	90	38
111	11	0.05217	1.23923	0.34747	0.38668	0.07063	25.8165	216	100	410

112	12	0,02201	1,16899	0,34581	0,37248	0,0221	79,9174	275	134	173
113	13	0,00318	0,18314	0,08149	0,08634	0,03109	-68,1947	127	127	25
114	14	0,02825	0,98238	0,3268	0,37183	0,06685	-8,87893	439	147	222
115	15	0,21159	3,61931	0,83331	0,95429	0,2516	-49,1674	227	186	1663
116	16	0,00344	0,21545	0,08914	0,08597	0,01824	26,1105	92	148	27
117	17	0,00382	0,20434	0,07486	0,07687	0,0354	57,3756	261	159	30
118	18	0,01476	0,47532	0,17358	0,19483	0,07102	35,5323	300	162	116
119	19	0,00547	0,34916	0,13582	0,14776	0,01612	68,1947	92	164	43
120	20	0,00547	0,36071	0,15268	0,17427	0,01516	-82,4039	342	170	43
121	21	0,00662	0,33907	0,1265	0,13076	0,03088	-85,4252	121	180	52
122	22	0,007	0,35119	0,1476	0,1679	0,0377	70,0132	362	198	55
123	23	0,00318	0,18969	0,08575	0,08725	0,02535	61,9228	125	200	25
124	24	0,00267	0,14076	0,0584	0,06006	0,03684	-26,5605	247	203	21
125	25	0,00445	0,22146	0,09332	0,09601	0,03886	-71,0719	353	209	35
126	26	0,00394	0,26239	0,11961	0,13551	0,00976	-47,5581	180	216	31
127	27	0,07151	1,71856	0,4828	0,51094	0,00572	62,6272	163	236	562
128	28	0,01005	0,40365	0,1634	0,16972	0,04639	-8,87893	211	222	79
129	29	0,01387	0,42483	0,14999	0,1549	0,08472	-42,268	64	238	109
130	30	0,06947	2,34124	0,58831	0,59288	0,00545	56,7135	102	258	546
131	31	0,03423	0,97784	0,34301	0,3525	0,06755	-61,9228	215	262	269
132	32	0,00954	0,47727	0,18412	0,19777	0,02068	-48,8823	77	248	75
133	33	0,00827	0,42788	0,18412	0,2212	0,02082	-48,8823	134	248	65
134	34	0,11311	1,6112	0,58882	0,63396	0,18858	46,73	437	264	889
135	35	0,00611	0,28656	0,11055	0,11339	0,03454	-34,7725	327	246	48
136	36	0,00585	0,27447	0,11765	0,12747	0,0368	59,0312	185	251	46
137	37	0,5167	7,90568	1,52133	1,67321	0,22979	-61,4757	332	297	4061
138	38	0,00445	0,26588	0,11527	0,12962	0,02759	-79,9174	403	284	35
139	39	0,02239	0,89155	0,2414	0,28422	0,02926	-62,6272	85	292	176
140	40	0,00445	0,28859	0,1035	0,1173	0,01772	-46,9893	182	286	35
141	41	0,00687	0,41173	0,17153	0,17876	0,02052	-53,9872	394	289	54
142	42	0,00534	0,25429	0,10288	0,11063	0,04283	-76,6879	417	287	42
143	43	0,03384	1,76492	0,39724	0,42877	0,02338	-79,7582	264	301	266
144	44	0,01234	0,69775	0,27976	0,30506	0,03966	64,3546	283	306	97
145	45	0,00407	0,2104	0,09094	0,09439	0,03568	-56,3047	114	308	32
146	46	0,00776	0,37288	0,15874	0,17124	0,04797	45,6381	151	314	61
147	47	0,16044	3,16619	0,91326	0,98214	0,00314	-45,8895	203	354	1261
148	48	0,01387	0,51513	0,21731	0,24342	0,06309	-58,1947	443	335	109
149	49	0,01716	0,72611	0,20191	0,20899	0,00896	-69,524	151	335	135

	150	54	0,00814	0,31532	0,11961	0,12221	0,06148	-47,5581	230	344	64
	151	55	0,01336	0,67615	0,25673	0,27354	0,03501	-56,617	126	351	105
	152	57	0,02036	0,93595	0,2619	0,3214	0,05378	74,3548	152	368	160
	153	58	0,00407	0,28354	0,1476	0,17046	0,01642	-70,0132	184	375	32
	154	59	0,00369	0,19023	0,0817	0,08351	0,03347	-8,87893	344	372	29
	155	60	0,00942	0,5202	0,20337	0,21209	0,01022	-7,12362	307	377	74
	156	61	0,00445	0,28156	0,11382	0,1144	0,03166	12,8018	429	378	35
	157	62	0,00305	0,20584	0,09055	0,09957	0,00921	77,1225	261	382	24
	158	63	0,03397	1,04093	0,32807	0,35659	0,05965	-73,9306	230	395	267
	159	68	0,00458	0,24672	0,11746	0,13454	0,02803	75,0658	318	399	36
	160	67	0,01209	0,59536	0,1986	0,20884	0,01359	72,252	337	433	95
G4	161	2	0,0026	0,17047	0,07368	0,07809	0,02083	-14,2852	334	44	616
	162	3	0,0053	0,41366	0,10278	0,11815	0,00672	76,8114	276	40	24
	163	4	0,00184	0,12888	0,05486	0,06014	0,02037	-29,8084	344	51	49
	164	6	0,04338	1,15957	0,3312	0,34763	0,12248	-20,9035	395	58	25
	165	7	0,13954	3,40075	0,6817	0,76541	0,00814	42,8475	240	65	401
	166	8	0,00281	0,22729	0,09692	0,12452	0,00616	-10,8114	371	89	1290
	167	9	0,00649	0,40685	0,17873	0,2098	0,0121	2,91523	358	63	26
	168	10	0,00141	0,10482	0,04482	0,04768	0,02304	-37,375	351	68	60
	169	12	0,00335	0,21218	0,09692	0,10513	0,03673	10,8114	359	78	75
	170	13	0,00216	0,1583	0,07198	0,07825	0,01323	7,25535	370	76	31
	171	15	0,02089	1,28577	0,39442	0,4505	0,04707	61,1359	152	81	81
	172	16	0,02499	1,01237	0,32246	0,38065	0,0399	-4,85129	128	103	194
	173	17	0,01667	0,80233	0,29139	0,29725	0,01868	-20,0686	35	97	231
	174	18	0,0662	1,48953	0,47446	0,54329	0,09502	28,6177	367	106	156
	175	19	0,02174	1,1546	0,26138	0,27697	0,03506	76,8421	62	117	612
	176	20	0,00314	0,27247	0,10749	0,11976	0,00912	-4,85129	162	121	201
	177	21	0,00216	0,12928	0,0513	0,05492	0,03057	-62,3611	39	115	29
	178	23	0,01082	0,60714	0,25253	0,26584	0,01723	8,27834	159	130	139
	179	24	0,0026	0,20683	0,07652	0,09531	0,00833	-71,8776	188	127	100
	180	25	0,00173	0,1111	0,04006	0,04679	0,02847	-26,9872	86	128	24
	181	27	0,00766	0,50083	0,20621	0,21212	0,01394	41,3924	313	135	138
	182	28	0,00335	0,18904	0,08071	0,08164	0,03536	42,5096	385	139	71
	183	29	0,00195	0,12928	0,04698	0,05371	0,02356	-75,3278	149	135	31
	184	31	0,00368	0,23691	0,09564	0,09866	0,01763	41,7067	318	145	184
	185	32	0,01017	0,65619	0,22517	0,24478	0,01715	46,6051	118	143	34
	186	33	0,01536	0,75324	0,21737	0,23019	0,01569	-74,114	373	153	94
	187	34	0,00281	0,21218	0,11052	0,11293	0,01299	14,2852	135	154	142

188	35	0.18638	4.96749	0.80715	0.87286	0.02151	42,5086	290	148	26
189	36	0.00444	0.26496	0.10482	0.12994	0.01484	-37,375	173	187	1723
190	37	0.00206	0.16766	0.08379	0.09395	0.00158	6,22768	284	155	41
191	39	0.00173	0.11672	0.05486	0.05775	0.02539	29,8084	364	204	1735
192	41	0.00184	0.13784	0.06646	0.07085	0.02403	-24,6229	349	182	706
193	44	0.01157	0.48813	0.2046	0.23043	0.03504	29,2562	179	197	48
194	45	0.0225	0.94364	0.31364	0.35515	0.07243	-33,4129	132	203	107
195	46	0.00184	0.13235	0.05582	0.05711	0.01684	-77,6916	111	207	208
196	49	0.0028	0.15923	0.05951	0.06282	0.02728	66,4247	416	212	44
197	50	0.01255	0.46349	0.15978	0.17305	0.06248	-58,5781	372	211	24
198	51	0.00465	0.294	0.10281	0.11554	0.00528	62,3811	409	218	116
199	52	0.01482	0.80835	0.22178	0.25257	0.03602	-24,1959	323	218	43
200	53	0.00151	0.10482	0.04267	0.04267	0.02623	-26,9872	338	224	137
201	55	0.01731	0.90847	0.4304	0.31646	0.01285	-30,5516	261	247	889
202	56	0.01266	0.6316	0.23669	0.24818	0.00754	-4,36814	381	241	160
203	57	0.00433	0.3174	0.12552	0.13417	0.01672	-40,6741	220	236	117
204	58	0.00736	0.52744	0.17338	0.17988	0.0262	51,8511	316	238	40
205	59	0.00746	0.34669	0.16124	0.16487	0.04141	-16,3725	203	248	68
206	60	0.01266	0.95005	0.27643	0.31437	0.02959	25,308	354	246	69
207	61	0.00281	0.23331	0.10972	0.11848	0.01209	-29,8084	379	252	117
208	62	0.0026	0.17635	0.08379	0.09203	0.0303	-6,22768	155	248	26
209	63	0.00422	0.26032	0.11634	0.13088	0.01679	22,9949	403	253	24
210	64	0.01633	0.53653	0.20919	0.24426	0.07753	31,4288	369	255	39
211	65	0.00162	0.10508	0.04492	0.04817	0.02609	37,375	205	263	151
212	69	0.00508	0.27327	0.09168	0.09971	0.02401	-82,5417	400	276	208
213	70	0.00303	0.24815	0.11634	0.1375	0.0136	-22,9949	386	281	47
214	71	0.3336	4.29934	1.23662	1.2799	0.33166	15,7819	77	281	28
215	72	0.00303	0.18224	0.08379	0.09021	0.02943	-6,22768	261	321	3084
216	73	0.00595	0.28451	0.09583	0.10895	0.04554	-5,45425	127	287	28
217	74	0.00898	0.53574	0.17269	0.17532	0.01663	15,2595	403	293	55
218	75	0.00703	0.50004	0.16882	0.17733	0.0194	9,28605	249	297	83
219	76	0.00433	0.2785	0.09766	0.11224	0.0208	68,5581	111	301	65
220	77	0.00541	0.28451	0.10191	0.10624	0.01844	20,9035	320	304	40
221	78	0.01871	0.76593	0.23491	0.26491	0.03893	75,3278	301	307	50
222	79	0.02347	0.90768	0.21728	0.24904	0.00855	-56,7928	129	328	173
223	80	0.03754	1.15794	0.324	0.34849	0.0313	36,0975	233	338	217
224	81	0.00681	0.35644	0.11451	0.13842	0.02801	33,7581	305	352	347
225	82	0.02261	1.06895	0.28446	0.33207	0.03183	-44,6686	178	343	63

	226	83	0,00216	0,12902	0,04698	0,05273	0,03616	76,3278	299	360	209
	227	85	0,00867	0,38546	0,17052	0,17322	0,05104	-12,3116	238	366	53
	228	87	0,00206	0,17328	0,08379	0,08447	0,01479	-6,22768	63	369	82
	229	88	0,04684	1,94091	0,49549	0,50559	0,03613	-27,2994	59	370	21
	230	90	0,00508	0,34722	0,16025	0,17722	0,01969	-26,9872	43	413	433
G6	231	1	0,00439	0,28846	0,09826	0,11408	0,00374	21,7191	237	408	92
	232	2	0,00379	0,20602	0,08286	0,08757	0,02274	19,2156	190	426	47
	233	3	0,00332	0,20821	0,09173	0,10417	0,01892	-5,68898	225	61	28
	234	4	0,00605	0,27251	0,09702	0,10059	0,05132	-67,4794	251	74	51
	235	5	0,0032	0,20712	0,09527	0,10879	0,02621	-16,6336	138	88	27
	236	7	0,00747	0,36388	0,11937	0,13788	0,05116	56,893	122	204	63
	237	8	0,00533	0,33252	0,14136	0,14253	0,0138	22,9972	136	217	45
	238	9	0,0339	1,15842	0,29537	0,32995	0,09866	46,059	156	232	286
	239	10	0,00249	0,14925	0,06583	0,07452	0,01941	7,93686	52	226	21
	240	12	0,00296	0,16229	0,06769	0,06959	0,03674	-15,5803	166	252	25
	241	13	0,00853	0,56639	0,17255	0,1793	0,03172	-24,9254	82	273	72
	242	14	0,00816	0,32129	0,13837	0,1639	0,03561	41,0675	228	287	52
	243	16	0,00261	0,19013	0,05608	0,06923	0,01144	-76,5535	222	296	22
	244	17	0,00842	0,48529	0,19235	0,20429	0,01379	28,2011	139	310	71
	245	18	0,00676	0,53745	0,18107	0,22237	0,0106	-20,5738	219	307	57
	246	19	0,01126	0,57138	0,25189	0,26205	0,01738	-10,395	114	313	95
	247	20	0,00356	0,21959	0,09173	0,11285	0,03304	5,68698	171	339	30
G6	248	1	0,00422	0,23817	0,09533	0,10846	0,03506	-62,8651	279	98	32
	249	2	0,14004	2,93318	0,67031	0,82837	0,07488	-70,0899	214	126	1063
	250	3	0,02226	1,04866	0,28402	0,35311	0,02438	-69,852	260	117	169
	251	4	0,04229	1,08553	0,32506	0,33866	0,06761	-36,6245	387	127	321
	252	6	0,00448	0,30418	0,14023	0,15259	0,0092	71,9372	114	136	34
	253	7	0,00883	0,44039	0,17138	0,19043	0,05213	34,456	254	139	67
	254	8	0,03676	1,81976	0,55553	0,62477	0,05813	49,7816	450	157	279
	255	10	0,00593	0,36435	0,15399	0,15507	0,02034	45,1	241	186	45
G7	256	2	0,01084	0,43723	0,18305	0,20924	0,04817	-7,60954	215	88	69
	257	4	0,01115	0,47023	0,1544	0,17617	0,005	70,3821	32	100	71
	258	5	0,02276	0,83248	0,25584	0,29286	0,03027	-84,1651	169	110	145
	259	6	0,02655	0,79702	0,27996	0,29747	0,08334	84,6877	128	112	169
	260	7	0,00471	0,25834	0,10036	0,11199	0,02438	-75,0333	195	109	30
	261	10	0,00628	0,30623	0,11913	0,13474	0,02455	11,74	145	115	40
	262	11	0,0399	0,99139	0,32007	0,34384	0,1241	27,0262	77	121	264
	263	13	0,00942	0,36202	0,13745	0,14649	0,05064	31,9418	58	118	60

	264	15	0,00456	0,24877	0,10676	0,11969	0,01681	52,6278	215	124	29
	265	16	0,0055	0,286	0,12077	0,12392	0,02561	64,5807	197	127	35
	266	17	0,00628	0,41725	0,18777	0,21863	0,01126	10,594	229	126	40
	267	19	0,01131	0,52937	0,18781	0,20869	0,02765	-14,9597	135	137	72
	268	21	0,00691	0,32462	0,12218	0,14054	0,04928	17,3137	223	145	44
	269	22	0,05529	1,41175	0,363	0,43133	0,11012	-75,5273	80	159	352
	270	23	0,09032	2,32743	0,66768	0,69318	0,02673	53,0065	45	167	575
	271	24	0,01586	0,70348	0,22423	0,27285	0,04117	76,6331	188	159	101
	272	26	0,00958	0,4127	0,13744	0,15596	0,03187	61,8687	294	183	61
	Moyenne		0,028	0,810	0,238	0,260	0,039	-2,079			
	Écart-type		0,067	1,187	0,249	0,268	0,040	47,144			
	Mode		0,003	0,105	0,084	#N/A	0,028	-23,421			
	Médiane		0,007	0,405	0,157	0,170	0,028	-5,153			
	Minimum		0,001	0,105	0,040	0,043	0,002	-88,944			
	Maximum		0,532	9,697	2,091	2,070	0,332	84,793			
	Nbr. valeurs		272	272	272	272	272	272			

PARTICULE #	AIRE mm car.	PERIM. mm	FERET mm	Rc mm	Ri mm	DECLIN deg.	Xg mm	Yg mm	Nbr. pixels
2	0,07186	2,04867	0,5467	0,68264	0,09008	-23,85501	176	84	130
3	0,01216	0,37483	0,15636	0,16951	0,04627	16,42552	203	80	22
4	0,01824	0,54346	0,22251	0,25168	0,04065	-83,5489	367	85	33
5	0,04643	0,92448	0,35103	0,38708	0,07077	-22,20453	272	88	84
6	0,01548	0,49635	0,20518	0,22443	0,00477	-75,89535	366	86	28
7	0,02764	0,57507	0,23457	0,24232	0,11937	16,42552	341	87	50
8	0,08015	1,89319	0,64568	0,69234	0,05365	35,8005	305	104	145
9	0,09452	2,04012	0,64568	0,6796	0,037	35,8005	323	108	171
10	0,12879	3,24027	0,7236	0,76403	0,01083	58,79514	249	115	233
11	0,04422	0,93256	0,31276	0,38918	0,13008	16,42552	342	105	80
13	0,15366	3,00665	0,8356	0,94579	0,07162	9,13496	221	126	278
14	0,21557	2,97596	1,102	1,13826	0,12848	3,45076	423	128	390
17	0,18351	2,55611	0,73004	0,82432	0,04613	51,94619	413	153	332
18	0,04367	0,83851	0,30533	0,32245	0,13176	25,75266	488	148	79
19	0,03427	0,83232	0,29403	0,36363	0,07635	31,76082	470	149	62
20	0,02598	0,71929	0,30625	0,31807	0,02446	-35,28017	314	151	47
21	0,02322	0,70761	0,24	0,26466	0,01894	33,55632	359	150	42
22	0,01327	0,39375	0,16265	0,17901	0,03755	-72,09643	373	150	24
23	0,01271	0,36369	0,15239	0,1653	0,06984	60,51814	449	152	23
24	0,01714	0,36278	0,14151	0,14533	0,1043	-27,95221	457	153	31
25	0,02764	0,60833	0,25865	0,27103	0,07824	-14,85936	297	163	60
26	0,01658	0,42483	0,1805	0,19328	0,0621	-14,18098	314	165	30
27	0,0713	1,31287	0,45704	0,51494	0,09504	28,93162	472	171	129
28	0,02432	0,76816	0,30433	0,35439	0,05665	-70,81667	202	174	44
29	0,02432	0,49677	0,18381	0,18846	0,11392	-74,21559	52	171	44
30	0,01879	0,53797	0,18634	0,2152	0,06073	-36,39021	187	173	34
31	0,01161	0,3023	0,10934	0,13004	0,07405	-23,85501	459	175	21
32	0,01789	0,45502	0,17413	0,19117	0,08126	-30,5236	405	179	32
33	0,09583	1,43427	0,48885	0,53195	0,21532	-59,24268	372	192	173
34	0,01161	0,33567	0,1335	0,14052	0,05714	41,48954	440	188	21
35	0,01879	0,43002	0,15678	0,1583	0,0999	-80,82427	428	194	34
36	0,15366	3,21259	0,77058	0,83911	0,08825	-13,27015	432	205	278
37	0,0807	1,70751	0,5767	0,60026	0,12945	-4,39764	474	202	146
38	0,02156	0,57507	0,21071	0,21932	0,07999	-18,3481	356	203	39
39	0,09728	2,13795	0,74003	0,77797	0,02051	-28,55707	375	211	176

40	0,12934	1,56559	0,63905	0,65607	0,17252	38,51839	295	221	234
41	0,01714	0,49158	0,20483	0,23527	0,06594	12,46752	133	213	31
43	0,08452	2,19314	0,58633	0,64214	0,0637	-39,87088	345	220	171
44	0,54169	6,8485	1,56441	1,68281	0,22446	-35,41238	243	240	980
45	0,01271	0,36628	0,15678	0,16011	0,04572	-80,82427	470	219	23
47	0,01271	0,4332	0,18715	0,19973	0,02991	-20,75814	447	221	23
48	0,01161	0,38856	0,16401	0,18641	0,03179	-23,85501	473	228	21
49	0,01879	0,58031	0,27335	0,27738	0,05984	-23,85501	342	236	34
52	0,31398	5,42998	1,303	1,34035	0,14481	3,89188	323	256	568
53	0,01492	0,39103	0,17413	0,20055	0,07839	30,5236	466	240	27
54	0,04588	0,97782	0,41462	0,46529	0,08825	-25,25231	172	260	83
55	0,01879	0,51008	0,21265	0,23272	0,05188	69,3484	432	267	34
57	0,07075	1,28021	0,47705	0,5831	0,08317	-5,31861	183	275	128
58	0,01382	0,48249	0,24919	0,29219	0,04374	-52,99077	371	273	25
59	0,03151	0,95425	0,2882	0,29986	0,0298	38,17207	398	275	57
61	0,02156	0,47424	0,18427	0,18948	0,09321	-57,13269	401	287	39
62	0,01714	0,45255	0,20025	0,20287	0,0692	-41,48954	192	288	31
63	0,05583	1,13461	0,40593	0,41743	0,03822	36,80892	417	282	101
64	0,35155	4,64008	1,09326	1,1132	0,15738	-10,48714	182	307	636
65	0,01437	0,38327	0,15239	0,16477	0,08789	-60,51814	300	294	28
66	0,08457	1,62488	0,50138	0,57992	0,05288	-26,16843	314	298	153
67	0,20341	2,65778	0,93928	0,95228	0,10761	34,38931	225	305	368
68	0,04367	1,24269	0,43629	0,49823	0,00635	73,42836	442	304	79
69	0,03759	1,12389	0,39789	0,43013	0,05254	-51,07392	331	307	68
71	0,02156	0,53219	0,20319	0,21658	0,07737	-60,51814	245	308	39
73	0,01824	0,52453	0,21688	0,25138	0,0627	-23,85501	451	310	33
74	0,12769	2,21549	0,68617	0,75045	0,08018	-34,3487	342	326	231
75	0,02045	0,58281	0,24919	0,29577	0,04082	-52,99077	358	327	37
76	0,08894	1,15739	0,39611	0,40804	0,23578	71,60484	228	343	179
77	0,01824	0,65761	0,27345	0,30639	0,019	-62,78889	262	346	33
78	0,02211	0,76008	0,21265	0,22821	0,05604	-69,3484	309	348	40
79	0,05749	1,31505	0,46337	0,50059	0,02458	77,25735	252	363	104
80	0,04898	1,18847	0,43014	0,47636	0,03582	-8,87062	401	353	85
81	0,02543	0,54375	0,21071	0,26109	0,10538	-18,3481	205	356	46
82	0,0398	0,70556	0,28289	0,31135	0,14487	-13,56073	229	362	72
84	0,02266	0,59057	0,25399	0,28556	0,02813	-60,51814	426	365	41
85	0,0409	1,18867	0,38082	0,42108	0,03113	10,03073	272	367	74
87	0,01327	0,3358	0,13266	0,13641	0,0959	90	286	369	24

88	0,02432	0,55845	0,21071	0,22201	0,08594	-18,3481	329	371	44
90	0,06191	1,33787	0,44807	0,46424	0,02493	-52,13982	292	383	112
91	0,021	0,65213	0,20025	0,24167	0,05872	-41,48954	410	380	38
92	0,12803	1,89272	0,51694	0,57125	0,10041	70,21272	344	388	228
94	0,30346	4,70545	1,11039	1,35071	0,01762	-31,17879	408	401	549
95	0,11	2,59815	0,74571	0,77635	0,08191	-50,43348	192	401	199
97	0,17909	2,70347	0,65328	0,70083	0,21519	78,96855	323	405	324
98	0,01879	0,45749	0,19894	0,20159	0,08807	-51,07392	183	399	34
99	0,01879	0,59635	0,25399	0,25991	0,01725	60,51814	349	402	34
100	0,01271	0,44894	0,21071	0,22993	0,02499	18,3481	163	401	23
101	0,01492	0,37483	0,15638	0,16005	0,07526	-16,42552	172	401	27
102	0,06909	1,33787	0,38425	0,41728	0,08998	-67,02228	244	408	125
103	0,79928	2,19992	1,97085	2,22448	0,15257	-27,38441	277	432	1446
104	0,01437	0,43031	0,20899	0,22433	0,05193	32,28119	399	407	26
105	0,01714	0,53538	0,23382	0,28613	0,0288	-41,48954	208	415	31
108	0,04201	0,93604	0,40568	0,42074	0,08897	22,42692	148	430	76
110	0,2305	3,66849	0,73704	0,82035	0,17928	10,36923	318	437	417
111	0,01181	0,32742	0,13288	0,1357	0,07857	90	195	431	21
112	0,04201	1,18317	0,48625	0,48888	0,05141	-39,53783	299	445	76
113	0,03593	1,1848	0,49689	0,50315	0,04435	49,15132	384	450	65
114	0,01327	0,37194	0,17413	0,18944	0,04031	30,5238	279	483	24
115	0,05749	1,21665	0,51208	0,60351	0,11435	-12,46752	329	489	104
116	0,02598	0,58521	0,21659	0,22403	0,08348	54,75139	283	470	47
117	0,03925	0,94689	0,40546	0,43832	0,06706	-9,41539	387	489	71
118	0,03814	0,91075	0,2483	0,28117	0,06508	-78,38278	238	472	69
119	0,02487	0,73261	0,28518	0,29968	0,10025	19,48174	252	480	45
120	0,05198	1,09412	0,40568	0,43262	0,08204	-22,42692	225	484	94
Moyenne	0,0711	1,2344	0,4080	0,4448	0,0763	-7,4039			
Écart-type	0,1104	1,1857	0,3149	0,3439	0,0476	44,8700			
Mode	0,0188	0,3748	0,2107	#N/A	0,0883	-23,8550			
Médiane	0,0296	0,7841	0,2845	0,3089	0,0695	-15,6424			
Minimum	0,0116	0,3023	0,1093	0,1300	0,0048	-83,5489			
Maximum	0,7993	6,8485	1,9709	2,2245	0,2358	90,0000			
Nbr. Valeurs	100	100	100	100	100	100			
GRANULAT	88,99	57,96	12,89	14,21	6,38	-33,88 (forme externe de la section)			

ANNEXE C

Programmes TURBOPASCAL

Cette annexe présente les listages des programmes Lire_Image, Entropie, Translation_Rotation et CDG (centres de gravité).

Programme Lire_Image

```
Program Lire_Image;
Uses Crt;
Var Fl, Fe      : File of byte;
    Ligne, Colonne : Integer;
    Bid         : Byte;
    Fichierdep  : String;
    Fichierfin  : String;
    Poursuit    : Char;
BEGIN
  REPEAT
    ClrScr;
    Writeln('*****');
    Writeln('PROGRAMME DE CONVERSION DE FICHIERS');
    Writeln('*****');
    Writeln(' ');
    Writeln('Ce programme transforme un fichier');
    Writeln('avec une extension .IM (256*256) acquis');
    Writeln('avec DIGIPAD (LINK AN-10000) en un fichier');
    Writeln('avec extension .IMA compatible avec le');
    Writeln('logiciel MIPS de MISIS. ');
    Writeln(' ');
    Write('Nom du fichier image à convertir (.IM): ');
    Readln(Fichierdep);
    Assign(Fl, 'C:\[sous répertoire]\'+Fichierdep);
    Reset(Fl);
    Write('Nom du fichier converti (.IMA): ');
    Readln(Fichierfin);
    Assign(Fe, 'C:\[sous répertoire]\'+Fichierfin);
```

```

Rewrite(Fe);
Writeln(' ');
Write('* Conversion en cours *');
Writeln(' ');
For Ligne:= 0 to 255 Do
  Begin
    For Colonne:= 0 to 255 Do
      Begin
        Read(F1,Bid);
        Begin
          IF Bid = 255
            THEN Bid := 254
          End;
        Write(Fe,Bid);
      End;
    For Colonne:= 0 to 255 do
      Begin
        Bid := 255;
        Write(Fe,Bid);
      End;
    End;
    Bid := 255;
    For Ligne:= 0 to 255 Do
      For Colonne:= 0 to 511 Do
        Write(Fe,Bid);
      Close(F1);
      Close(Fe);
      Writeln(' ');
      Write('Voulez-vous convertir un autre fichier (O/N)? ');
      Write(' ');
      Write(' ');
      Readln(Poursuit);
      UNTIL (Poursuit = 'n') OR (Poursuit = 'N');
      IF (Poursuit = 'n') OR (Poursuit = 'N')
        THEN Writeln('Bye Bye!!');
    END.

```

Programme Entropie

```

Program entropie;
Uses Crt;
Var donnees, result : Text;
    Histo           : Array[0..255] Of integer;
    Entropie        : Array[0..255] Of Real;
    NivGris         : Integer;

(*-----procedure lecture des niveaux de gris-----*)
----*)

Procedure Lecture;
BEGIN
  ClrScr;

```

```

Assign (donnees, 'a:\histomos.prn');
Reset(donnees);
NivGris :=0;
While not Eof(donnees) do
  Begin
    read(donnees, histo[nivgris]);
    Nivgris := Nivgris+1;
  End;
Close(donnees);
End;

(*-----Calcul de E(k)-----
----*)

Procedure Calcul;
Var K,I : Integer;
    Fk,Fkp1,HC0,Hc1 : Real;
Begin
  For K := 0 to 255 Do
    Begin
      Fk := 0;
      Fkp1:=0;
      For I := 0 to K Do
        Fk:= Fk +Histo[I];
        Writeln(K, ' ',FK);
      For I := K+1 to 255 Do
        Fkp1:= Fkp1 +Histo[I];
      HC0:=0;
      HC1:=0;
      For I := 0 to K Do
        Begin
          if histo[I]<> 0 then
            HC0:=HC0+(histo[I]/FK)*Ln((histo[I]/FK));
          End;
        For I := K+1 to 255 Do
          Begin
            if histo[I]<> 0 then
              HC1:=HC1+(histo[I]/FKP1)*Ln((histo[I]/FKP1));
            End;
          Entropie[K] :=-HC0-HC1;
        End;
      End;

(*-----Programme principal-----
----*)

BEGIN
  Lecture;
  Calcul;
  Assign(result, 'a:\resultek');
  rewrite(result);
  For NivGris:= 1 to 253 Do
    writeln(Result,NivGris, ' ',Entropie[Nivgris]:8:3);
  close(result);
END.

```

Programme Translation_Rotation

```
Program Translation_Rotation;
{Mars 1995 J.riss M.Quirion}
Uses Crt,Dos, programm,
    MipsUtil,BaseUtil,
    BProgram,BTraitem,BMorphol;
Const NbreMax =120;
    Racine ='C:\marco\';
    NomFichierFin =Racine+'Bid.Res';
    NomFichierImageInitiale=Racine+'CGravit.dat';
    Nomimage = Racine+'MOSAFB.ima';
    Choix = 'Homo';
Var Coor,CoorTrans,CoorPtFixe,
    CoorRot,CoorHomo, CoorFin : Array[1..NbreMax,1..2] Of Real;
    MatRot : Array[1..2,1..2] Of Real;
    NombrePoints, I : Integer;
    Xt,Yt,XF,YF, HomothetieX,HomothetieY : Real;
    TX,TY : Real;
    Bid : Char;
(*-----*)
Procedure Anti_Translation;
Var Fe : Text;
    Xg,Yg,j,k: Integer;
BEgin

{ Loadgrlimage(1, nomimage);
  Displaygrlframe(1);}

Assign(Fe,NomFichierFin);
Rewrite(Fe);
For I := 1 To NombrePoints Do
Begin
  CoorFin[I,1]:=CoorRot[I,1]+XF;
  CoorFin[I,2]:=-CoorRot[I,2]+Yf;
  Writeln(Fe,I,' ',CoorFin[I,1]:8:3,' ',CoorFin[I,2]:8:3);
  Xg:=round(CoorFin[I,1]);
  Yg:=round(CoorFin[I,2]);
  for j:=-1 to 1 do for k:=-1 to 1 do
    if ((Xg+k>=0)and(Xg+k<=511)and(Yg+j>=0)and(Yg+j<=511))
then
  WriteBinPixel1(1,Xg+k,Yg+j);

  End;
  DisplayBinFrame(1);
  Close(Fe);

End;
(*-----*)
Procedure Rotation;
Begin
  For I := 1 To NombrePoints Do
  Begin
    CoorRot[I,1]:=
MatRot[1,1]*CoorHomo[I,1]+MatRot[1,2]*CoorHomo[i,2];
```



```

    CoorRot[I,2]:=
MatRot[2,1]*CoorHomo[I,1]+MatRot[2,2]*CoorHomo[i,2];
    End;
End;
(*-----*)
Procedure Determination_Rotation;
Var XF2,YF2, Xt2,Yt2 : Real;
    DistFixeX,DistFixeY,DistTransX,DistTransY : Real;
Begin
    Writeln('Donnez les coordonnées du 2ième point fixe sur l'image
finale');
    Write('X = ');Readln(Xf2);
    Write('Y = ');Readln(Yf2);
    Writeln('Donnez les coordonnées du 2ième point fixe sur l'image
à translater');
    Write('X = ');Readln(Xt2);
    Xt2:=Xt2/2;
    Xt2:=Xt2+TX;
    Write('Y = ');Readln(Yt2);
    Yt2:=Yt2/2;
    Yt2:=Yt2+TY;
    Writeln('Coordonnées du 2ième point fixe de l''image translatée
',Xt2:8:3,' ',YT2:8:3);
    XT:=XT+TX;
    YT:=YT+TY;
    DistFixeX:= Abs(Xf-Xf2);
    DistTransX:=Abs(Xt-Xt2);
    DistFixeY:= Abs(Yf-Yf2);
    DistTransY:=Abs(Yt-Yt2);
    If Choix ='Homo' Then
        Begin
            HomothetieX:= DistFixeX/DistTransX;
            HomothetieY:= DistFixeY/DistTransY
        End
    Else
        BBegin
            HomothetieX:=1;
            HomothetieY:=1
        End;
    For I := 1 to Nombrepoints Do
        Begin
            CoorHomo[I,1]:=CoorPtFixe[I,1]*HomothetieX;
            CoorHomo[I,2]:=-CoorPtFixe[I,2]*HomothetieY;
        End;
    Writeln('Facteur d''homoth,tie ',HomothetieX:8:3,'
',HomothetieY:8:3);
    Xf2:=Xf2-XF;
    Yf2:=- (Yf2-YF);
    Xt2:= (Xt2-XF)*homothetieX;
    yt2:= - ((Yt2-YF)*HomothetieY);
    Writeln('image finale ',XF2:8:3,' ',YF2:8:3);
    Writeln('image _ translater ',XT2:8:3,' ',YT2:8:3);
    MatRot[1,1]:=(Xf2*XT2+Yf2*YT2)/(Sqr(Xt2)+Sqr(Yt2));
    MatRot[1,2]:=(Xf2*YT2-Yf2*XT2)/(Sqr(Xt2)+Sqr(Yt2));
    MatRot[2,1]:=-MatRot[1,2];
    MatRot[2,2]:=MatRot[1,1];
    For I := 1 to 2 Do
        Writeln(Matrot[I,1]:8:3,' ',MATrot[I,2]:8:3);
    End;
End;

```

```

(*-----*)
Procedure Origine_Au_Point_Fixe;
Begin
  For I := 1 To NombrePoints Do
    Begin
      ·CoordPtFixe[I,1]:=CoordTrans[I,1]-XF;
      CoordPtFixe[I,2]:=CoordTrans[I,2]-YF;
    End;
  End;
End;
(*-----*)
Procedure Determination_Translation;
Begin
  Writeln('Donnez les coordonnées du point fixe sur l'image
finale');
  Write('X = ');Readln(Xf);
  Write('Y = ');Readln(Yf);
  Writeln('Donnez les coordonnées du point fixe sur l'image ..
translater');
  Write('X = ');Readln(Xt);
  Xt := Xt/2;
  Write('Y = ');Readln(Yt);
  Yt:=Yt/2;
  TX:= Xf-Xt;
  TY:= Yf-Yt;
  For I := 1 To NombrePoints Do
    Begin
      CoordTrans[I,1]:=Coord[I,1]+TX;
      CoordTrans[I,2]:=Coord[I,2]+TY;
    End;
  Writeln('La translation de l'image doit ^tre : ',TX:8:3,'
',TY:8:3);
End;
(*-----*)
Procedure Choix_Image_Initiale;
Var Fl : Text;
    I : Integer;
    Bid,X,Y : Real;
Begin
  Assign(Fl,NomFichierImageInitiale);
  Reset(Fl);
  I:=1;
  Repeat
    Readln(Fl,Bid,X,Y);
    Writeln(I,X:8:3,' ',Y:8:3);
    Coord[I,1]:=X/2;
    Coord[I,2]:=Y/2;
    I:=I+1;
  Until Eof(Fl);
  NombrePoints:=I-1;
  Writeln(NombrePoints);
  Close(Fl);
End;
(*-----*)
BEGIN
  ClrScr;
  ClearBinFrame(1);
  ConstantGr1Frame(1,0);
  DisplayGr1Frame(1);

```

```

Choix_Image_Initiale;
Determinacion_Translation;
Origine_Au_Point_Fixe;
Determinacion_Rotation;
Rotation;
Anti_Translation;
END.

```

Programme cdg

```

Program CDG;

uses Crt,Dos,
     MipsUtil,BaseUtil,
     BProgram,BTraitem,BMorphol;

(* ##### AIRE ET CENTRE DE GRAVITE #####*)

var air2,air3      : longint;
    Sx, Sy, N      : longint;
    p,i,j,k        : integer;
    Xg, Yg         : integer;
    nbreparticule  : integer;
    abid           : string[40];
    result         : text;

const racine       = 'c:\[chemin]\';
     fichier       : string[40]= 'nom de fichier';

(* -----procédure centre de gravité -----*)

procedure centre_de_gravite;

Begin
  ClrScr;

  {Par précaution on met tous les plans à noir pour le traitement
  suivant}
  for p:=1 to 15 do ClearBinFrame(p);

  LoadBinImage(1,Racine+fichier+'.BIN');
  DisplayBinFrame(1);           {affiche le plan Binaire 1}
  CopyBinFrame(1,2);
  (* Openingbin(1,2,2);         {effectue une ouverture de taille 3}
  displayBinFrame(2);         {affiche le plan Binaire 2}
  MarkerReconstruction(1,2);
  DisplayBinFrame(2); *)
  InnerOutline(2,5);           {contours des particules de l'image}

  nbreParticule:=0;

```

```

area(2,air2);                                {calcule son aire de façon à avoir
                                              un test d'arrêt de la procédure}
while air2 >0 do
  begin
    nbreparticule:=nbreparticule+1;
    FirstObject(2,3);                        {extrait la première particule}
    Area(3, air3);                           {calcule l'aire de la particule}
    InnerOutline(3,4);                       {donne le contour de la particule}
    CentreOfGravity(4,Sx,Sy,N); {calcule de CG de la particule}
    Xg:=round(Sx/N);
    Yg:=round(Sy/N);
    for j:=-1 to 1 do for k:=-1 to 1 do { point blanc au CG}
      if
((Xg+k>=0)and(Xg+k<=511)and(Yg+j>=0)and(Yg+j<=511)) then
        WriteBinPixell(5,Xg+k,Yg+j);
        DisplayBinFrame(5);
        symmetricaldifference(2,3,2); {enleve la part. de l'image
                                       d'origine}

        (*displaybinframe(2);*)
        writeln('Particule n°', nbreparticule, ' Xg :',Xg:3,' Yg
:',Yg:3, ' aire:',air3);
        writeln(result, nbreparticule, ' ',Xg:3,' ',Yg:3,' ',air3);
        Area(2,air2);

      end;
    end;
  end;

  (* -----PROGRAMME PRINCIPAL -----*)

Begin

  assign(result, 'c:\[chemin]\cgravit.dat');
  rewrite(result);
  centre_de_gravite;
  close(result);

end.

```

BIBLIOGRAPHIE

- AÏTCIN, P.-C. (1980) *How to produce high-strength concrete. It really takes the best of everything*, Concrete Construction, vol. 25, n° 3, p. 222-231.
- AÏTCIN, P.-C., JOLICOEUR, G., MERCIER, M. (1983) *Technologie des granulats*, Le Griffon d'argile, Québec, 372 p.
- AÏTCIN, P.-C., MEHTA, K. (1990) *Effect of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete*, ACI Materials Journal, vol. 87, n° 2, p. 103-107.
- AL-CHALABI, M., HUANG, C.L. (1974) *Stress distribution within circular cylinders in compression*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, vol. 11, p. 45-56.
- ANDERSON, T.L. (1991) *Fracture Mechanics - Fundamentals and Applications*, CRC Press inc., USA, 793 p.
- ASHBY, M.F., SAMMIS, C.G. (1990) *The damage mechanics of brittle solids in compression*, Pure and Applied Geophysics, vol. 133, n° 3, p. 489-521.
- ASTM (1991) *Standard test method for microscopical determination of parameters of the air-void system in hardened concrete - C457-90*, ASTM Concrete and Aggregates, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, vol. 4.02, p. 229-241.
- ASTM (1991) *Standard test method for specific gravity and absorption of coarse aggregates - C127-88*, ASTM Concrete and Aggregates, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, vol. 4.02, p. 65-69.
- BAALBAKI, W. (1990) *Bétons à haute performance à matrice constante: influence de la nature des granulats sur le comportement mécanique*, Mémoire de maîtrise, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, 123 p.

-
- BAJPAJ, A.C., CALUS, L.M., FAIRSLEY, J.A. (1978) *Statistical Methods for Engineers and Scientists*, John Wiley & Sons, New York, 444 p.
- BALLIVY, G., BENMOKRANE, B., SAGE, A.-P., SAILOUDI, A. (1988) *Stabilisation des talus rocheux à l'aide d'ancrages injectés: influence des chargements cycliques*, Glissements de terrains, Comptes rendus du 5^e symposium international sur les glissements de terrain, Lausanne, A.A. Balkema, Rotterdam, p. 839-846.
- BARD, J.P. (1990) *Microtextures des roches magmatiques et métamorphiques*, 2^e éd., Masson, Paris, 208 p.
- BEAUFILS, P.M, RAMI, M. (1988) *Le filtrage numérique*, Sybex, Paris, 313 p.
- BÉDARD, C. (1982) *Influence des matériaux et de leur dosage sur la résistance à la compression uniaxiale des bétons à très haute résistance*, Mémoire de maîtrise, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, 180 p.
- BICKLEY, J.A. (1994) *Study on production of high-strength concrete in Canada: National aggregate program - The characteristics and potential of Dufferin Milton Quarry Coarse aggregates and manufactured sand.*, Network of Centres of Excellence on High-Performance Concrete, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 50 p.
- BOURNAZEL, J.P. (1994) *Adhérence entre les couches de béton compacté au rouleau et développement d'un modèle de fissuration thermique*, Atelier scientifique international sur les bétons compactés au rouleau, Université Laval, Ste-Foy, Québec, Canada, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, p. 125-140.
- BOUSQUIE, P. et coll. (1980) *Contribution de la porosimétrie au mercure à l'étude de quelques propriétés des roches carbonatées*, Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, vol. 22, p. 225-232.
- CHASSERY, J.M., MONTANVERT, A. (1991) *Géométrie discrète en analyse d'images*, Hermès, Paris, 358 p.
- CHERMANT, J.L., COSTER, M. (1987) *Introduction à l'analyse d'images*, Journal de microscopie et de spectroscopie électroniques, vol. 12, n° 1, p. 1-21.
- COSTER, M., CHERMANT, J.L. (1989) *Précis d'analyse d'images*, Presses du CNRS, Paris, 560 p.
- DARWIN, D., DEWEY, G.R. (1989) *Image analysis of microcracks*, in *Cracking and Damage - Strain Localization and Size Effect*, Elsevier, London, p. 65-75.
- DIATTA, Y. (1987) *Corrélation entre le module d'élasticité, le module de rupture, le coefficient de Poisson et la résistance à la compression simple des bétons à très haute résistance (60 - 120 MPa)*, Mémoire de maîtrise, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, 142 p.

- DUFFAUT, P., WOJTKOWIAK, F., JOSIEN, J.P., PINEAU, J.L. (1979) *Les vides, principal facteur du comportement mécanique des roches*, Comptes rendus du 4^e Congrès International de Mécanique des Roches, Montreux (Suisse), A.A. Balkema, Rotterdam, vol. 1, p. 115-121.
- DUNN, D.E., LAFOUNTAIN, L.J., JACKSON, R.E. (1973) *Porosity dependance and mechanism of brittle fracture in sandstones*, Journal of Geophysical Research, vol. 78, n° 14, p. 2403-2417.
- EZELDIN, A.S., AÏTCIN, P.-C. (1991) *Effect of coarse aggregate on the behavior of normal and high-strength concretes*, Cement, Concrete and Aggregates, vol. 13, n° 2, p. 121-124.
- FABRIES, J., TOURET, J., WEISBROD, A. (1982) *Détermination des minéraux des roches au microscope polarisant de Marcel Roubault*, 4^e éd., Éditions Lamarre-Poinat, Paris, 382 p.
- GAVA, V. (1994) *Analyse d'images: création de programmes sur PC utilisant ou non une carte spécialisée*, Rapport de stage, Centre de développement des géosciences appliquées, Université Bordeaux I.
- GERVAIS, F. (1993) *Modélisation géométrique d'un réseau de fractures dans un massif rocheux stratifié - Application aux carrières marbrières du Comblanchien*, Thèse de doctorat, École nationale supérieure des mines de Paris, 298 p.
- GONZALEZ, R.C., WOODS, R.E. (1992) *Digital Image Processing*, Addison-Wesley Publishing Co., USA, 716 p.
- GOUSSOT, L. (1987) *Les systèmes de télévision - en ondes métriques et décimétriques*, Dunod, Paris, 369 p.
- GRAMBERG, J. (1989) *A Non-Conventional View on Rock Mechanics and Fracture Mechanics*, A.A.Balkema, Rotterdam, 250 p.
- GRIFFITH, A.A. (1920) *The phenomena of rupture and flow in solids*, Philosophical Transaction Series A, vol. 221, p. 163-198.
- GRIFFITH, A.A. (1924) *The theory of rupture*, First International Congress of Applied Mechanics, p. 55-74.
- GRILLS, F., ALEXANDER, M.G. (1989) *Stiffness of concrete made with granite and andesite aggregates*, The Civil Engineer in South Africa, vol. 31, n° 9, p. 273-285.
- GROLIER, J., FERNADEZ, A., HUCHER, M., RISS, J. (1991) *Les propriétés physiques des roches*, Masson, Paris, 462 p.
- GSA (1991) *Rock Color Chart*, Geological Society of America, USA, 9 p.

-
- HOUPERT, R. (1979) *Le comportement à la rupture des roches*, Comptes rendus du 4^e Congrès International de Mécanique des Roches, Montreux (Suisse), A.A. Balkema, Rotterdam, vol. 1, p. 107-114.
- HUGHES, T.J. R (1987) *The Finite Element Method - Linear static & Dynamic Element Analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 803 p.
- JAEGER, J.C., COOK, N.G. W. (1979) *Fundamentals of Rock Mechanics*, 3rd ed., Chapman & Hall, London, 593 p.
- JCPDS (1990) *Powder Diffraction File - Alphabetical Indexes - Inorganic Phases*, Center for Diffraction Data, USA, 871 p.
- KAPUR, J.N., SAHOO, P.K., WONG, A.K.C. (1985) *A new method for grey-level picture thresholding using the entropy of the histogram*, Computer Vision, Graphics and Image Processing, vol. 29, p. 273-285.
- KLEIN, C., HURLBUT, C.S. (1985) *Manual of Mineralogy*, 20th ed., John Wiley & Sons, New York, 596 p.
- KLUG, H.P., ALEXANDER, L.E. (1974) *X-ray Diffraction Procedures for Polycrystalline and Amorphous Materials*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 966 p.
- LAFON, D. (1989) *Application de l'analyse d'images et de la morphologie mathématique à l'étude de pyroclastites: exemple des dépôts de nuées ardentes des éruptions de 1902 à la montagne pelée (Martinique)*, Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, 141 p.
- LAHOUD, A. (1994) *Méthodes des éléments finis* (Notes et programmes du cours GCI-770), Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke. 10 chapitres.
- LI, C., NORDLUND, E. (1993) *Experimental verification of the Kaiser effect in rocks*, Rock Mechanics and rock engineering, vol. 26, n° 4, p. 333-351.
- MISIS IMAGE *Notes de cours manuscrites sur l'analyse d'images*.
- NIORTHE, D. (1994) *Quantification de paramètres structuraux de massifs rocheux en sites géotechniques par analyse automatique d'images*, Thèse de doctorat, École nationale supérieure des mines de Paris, 235 p.
- PÉRAMI, R. (1971) *Contribution à l'étude expérimentale de la microfissuration des roches sous actions mécaniques et thermiques*, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 276 p.
- PINOLI, J.C. (1987) *Contribution à la modélisation, au traitement et à l'analyse d'images*, Thèse de doctorat, Université de Saint-Etienne, (thèse article).
- PRATT, W.K. (1991) *Digital Image Processing*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 698 p.

- RISS, J. (1988) *Principes de stéréologie des formes en pétrographie quantitative*, Thèse de doctorat, U.F.R. Faculté des sciences, Université d'Orléans, 420 p.
- RUEGG, A. (1989) *Probabilités et statistique*, 3^e ed., Presses polytechniques romandes, Lausanne, Suisse, 153 p.
- RUSS, J.C. (1995) *The Image Processing Handbook*, 2nd ed., CRC Press, USA, 674 p.
- SANTALO, L.A. (1976) *Integral Geometry and Geometric Probability*, Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Massachusetts, 404 p.
- SAPORTA, G. (1990) *Probabilité et analyse des données et statistique*, Éditions Technip, Paris, 493 p.
- SARKAR, S.L., AÏTCIN, P.-C. (1990) *The importance of petrological, petrographical and mineralogical characteristics of aggregates in very high strength concrete, Petrography applied to concrete and concrete aggregates - ASTM STP 1061*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p. 129-143.
- SCHMITT, M., MATTIOLI, J. (1994) *Morphologie mathématique*, Masson, Paris, 211 p.
- SERRA, J. (1982) *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Academic Press, London, 610 p.
- SERRA, J. (mai 1983) *Morphologie mathématique*, La Recherche, vol. 14, n° 144, p. 723-732.
- SHAKOOR, A., SCHOLER, C.F. (1985) *Comparison of aggregate pore characteristics as measures by mercury intrusion porosimeter and Iowa Pore Index Test*, ACI Material Journal, vol. 82, n° 4, p. 453-458.
- SIRIEYS, P.M. (1966) *Sur les lois de fragmentation des roches*, *Proceedings of the First Congress of the International Society of Rock Mechanics*, Lisbonne, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, vol. 2, p. 81-86.
- SPRUNT, E.S., BRACE, W.F. (1974) *Direct observation of microcavities in crystalline rocks*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, vol. 11, n° 4, p. 139-150.
- TAPPONNIER, P. et BRACE, W.F. (avril 1976) *Development of stress-induced microcracks in Westerly Granite*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, vol. 13, n° 4, p. 103-112.
- THURSTON, P.C. et coll. (1992) *Paleozoic and Mesozoic Geology of Ontario; in Geology of Ontario*, Ontario Geological Survey, Ministry of Northern Development and Mines, Special volume 4, part 2, Ontario, Canada, p. 907-1008.

-
- TIGHIOUART, B. (1992) *Influence de la nature des granulats sur le comportement mécanique des bétons*, Mémoire de maîtrise, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, 97 p.
- TOUMAZET, J.J. (1987) *Traitement de l'image sur micro-ordinateur*, Sybex, Paris, 260 p.
- TOURENQ, C., FOURMAINTRAUX, D., DENIS, A. (1971) *Propagation des ondes et discontinuités des roches*, in *Fissuration des roches - Proceedings du Symposium International de Mécanique des Roches*, 4-6 octobre 1971, Nancy, France, p. I-1.
- TSAI, W. (1985) *Moment preserving thresholding: A new approach*, Computer Vision, Graphics and Image Processing, vol. 29, p. 377-393.
- WALSH, J.B., BRACE, W.F. (1966) *Cracks and pores in rocks*, Proceedings of the First Congress of the International Society of Rock Mechanics, Lisbonne, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, vol. 1, p. 643-646.
- WEIBEL, E.R. (1980) *Stereological Methods - Vol. 2 Theoretical Foundations*, Academic Press, London, 340 p.
- WEICHERT, R. (1991) *Theoretical prediction of energy consumption and particle size distribution in grinding and drilling of brittle materials*, Particle and Particle Systems Characterization, vol. 8, n° 1, p. 55-62.
- WILLIAMS G. (1991) *Linear Algebra with Applications*, 2nd ed., Wm. C. Brown Publishers, USA, 447 p.
- WILLIAMS, H., TURNER, F.J., GILBERT, C.M. (1982) *Petrography - An Introduction to the Study of Rocks in Thin Sections*, W.H. Freeman & Co., New-York, 626 p.
- WINSLOW, D. (1994) *The pore system of coarse aggregates, Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials - ASTM STP 169C*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, p. 429-437.
- ZERGUA, A. (1988) *Contribution à l'étude acoustique de la fissuration des roches à l'aide des techniques des émissions acoustiques et ultrasoniques*, Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, 190 p.