Caractérisation de la neige, du névé et de la glace par traitement d'images.

Michel Gay

▶ **To cite this version:**

Michel Gay. Caractérisation de la neige, du névé et de la glace par traitement d'images.. Géophysique [physics.geo-ph]. Université de Grenoble, 1999. Français. NNT : . tel-00930144

HAL Id: tel-00930144
https://theses.hal.science/tel-00930144

Submitted on 14 Jan 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE JOSEPH FOURIER-GRENOBLE 1
SCIENCES & GEOGRAPHIE

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER

Discipline : Physique

Présentée et soutenue publiquement

par

GAY Michel

Le 22 octobre 1999

CARACTERISATION DE LA NEIGE, DU NEVE ET DE LA GLACE PAR TRAITEMENT D'IMAGES

Directeur de thèse : Jean-Marc CHASSERY

COMPOSITION DU JURY :

Caractérisation de la neige, du névé et de la glace par traitement d'images.

Michel GAY

Thèse

Pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Joseph Fourier

Discipline : Physique (Méthodes Physiques Expérimentales)

Soutenue le 22 octobre 1999

Composition du jury

:

M. Paul DUVAL Préseident
M. Philippe BOLON Rapporteur
M. Dominique BERNARD Rapporteur
M. Daniel QUENARD Examinateur
M. Jean-Marc CHASSERY Directeur de these
M. Michel FILY Directeur de these

Laboratoire de glaciology et Géophysique de l'Environnement
UPR 15151 du CNRS – associé à l'Université Jospeh Fourier
Tél (33) 04.76.82.42.00
54, rue Molière-BP96-38402 Saint Martin d'Hères Cedex France

Sommaire

Chapitre I : Introduction 1

Chapitre II : Acquisition et type d' images 4

1 Introduction **4**

2 Les images de neige **4**
2.1 Les méthodes de prélèvement et d'observation des grains de neige 4
2.2 Bilan des prises d'images pour l'étude des grains de neige 10
2.3 La méthode de prise d'échantillons et de d'acquisition d'images de structure de la neige 11
2.4 Conclusion 13

3 Les images de névé **14**
3.1 Méthode expérimentale d'observation d'échantillons sublimés 14
3.2 Bilan des prises d'images pour l'étude du névé 17
3.3 Conclusion 19

4 Les images de glace **19**
4.1 Les propriétés optiques de la glace 19
4.2 La technique d'observation et le bilan des lames minces 22

5 Conclusion **24**

Chapitre III : Les bases de l'étude paramétrique des images **25**

1 Notions de base en géométrie discrète et paramètres morphomètriques **25**
1.1 Espace de travail ^{2} 25
1.2 Voisinage et distance discrète 26
1.3 Distances discrètes, image de distance 27
1.4 Axe médian et squelette 29

2 Définitions de base pour l'analyse topographique des microstructures et paramètres associés
2.1 Représentation par pavage de voronoi 31
2.2 Mesure de la topographie globale 33
2.3 Ordre et désordre, définitions des paramètres 33

3 Définition et choix des paramètres stéréologiques et secondaires **34**
3.1 Notations 34
3.2 Paramètres stéréologiques locaux 35
3.3 Paramètres relatif à la forme 36

4 Les fonctions d'auto-covariance ou d'auto-corrélation **39**
4.1 Définition de la fonction d'auto-covariance 39
4.2 Définition de la fonction d'auto-corrélation 40

5 Incertitudes en analyse d'images **41**
5.1 Biais introduit lors de la préparation du matériau 41
5.2 Biais introduit par le système de mesure 43
5.3 Incertitudes statistiques, détermination du nombre d'objets nécessaire à la mesure 47
5.4 Conclusion 53

Chapitre IV : Traitement des images de neige..... 54

1 Intérêt..... 54

2 Segmentation des images de neige..... 55

3 Taille des grains..... 57
3.1 Définition du rayon convexe moyen discret..... 57
3.2 Méthode basée sur l'analyse du contour..... 58
3.3 Méthode basée sur le squelette pondéré..... 63
3.4 Comparaison des rayons convexes et détermination de paramètres utilisés pour la reconnaissance des grains..... 76
3.5 Conclusion..... 78

4 Autres paramètres, type de neige..... 78
4.1 Indices de forme relatifs aux objets convexes et concaves..... 79
4.2 Indices gc et pc..... 81

5 Mesures et interprétation des données de taille de grains..... 84
5.1 Application à la télédétection..... 84
5.2 Snow grain size measurements in Antarctica..... 88

6 Conclusion..... 95

Chapitre V : Caractérisation du névé polaire par traitement d'images..... 96

1 Introduction..... 96

2 Filtrage et binarisation des images..... 97

3 Étude des paramètres métriques et topologiques des micro-structures..... 100
3.1 Mesure de la porosité..... 100
3.2 Evolution des paramètres spécifiques à la modélisation..... 102
3.3 Conclusion..... 109

4 Étude du grossissement des grains..... 109
4.1 Définition de la taille moyenne et influence sue la loi de croissance..... 109
4.2 Loi de croissance parabolique..... 113
4.3 Loi de croissance dans le névé poreux..... 114
4.4 Distribution de la taille des grains dans le névé et la glace..... 115

5 Étude et caractérisation de la phase poreuse..... 129
5.1 Étude du squelette des pores..... 129
5.2 Étude de la représentation de voronoi..... 131

6 Conclusions..... 133

Chapitre VI : Traitement des images couleurs de glace..... 136

1 Introduction..... 136

2 Filtrage et segmentation..... 136
2.1 Filtre linéaire stationnaire..... 137
2.2 Filtre non linéaire..... 138
2.3 Filtre d'ordre..... 139

2bis Synthèse des deux articles suivants..... 142 bis

3 Automatic reconstruction of polycrytalline ice. Microstructure from image analysis : application to the EPICA ice core at Dome Concordia, Antarctica..... 143
Abstract
3.1 Introduction..... 143
3.2 Experimental procedure..... 144
3.3 Preparation of thin sections and image recording..... 144
3.4 Image analysis..... 145
3.5 Application to the EPICA ice core (a preliminary study)..... 146
3.6 Mean grain size end grain growth..... 147
3.7 Shape anisotropy..... 149
3.8 Grains morphology..... 149
3.9 Conclusion and prospect..... 149

4 Shallow ice microstruture at Dome Concordia, Antarctica..... 157
Abstract
4.1 Introduction..... 157
4.2 Experimental procedure..... 158
4.3 The mean crystal size profile..... 158
4.4 Size distributions..... 159
4.5 Shape anisotropy..... 159
4.6 Conclusion..... 160

5 Evolution de la morphologie des grains..... 167

6 Conclusions..... 171

Chapitre VII : Conclusions et perspectives..... 172

Annexe A : Microwave Remote Sensing of Snow from a Cable Car at Chamonix in the French Alps..... 174

Annexe B : Imaging of firn and bubbly ice in coaxial reflected ligth: a new technique for the characterization of these porous media..... 180

Annexe C : Modelling of the densification of polar firn: characterization of snow-firn transition..... 189

Annexe D : Caratéristiques climatiques et localisation des sites étudiés pour le névé poreux.... 196

Références bibliographiques..... 198

I Introduction :

L'intérêt de l'étude de la neige, du névé et de la glace, généralités :

Il est maintenant admis que les activités humaines, de par l'ampleur qu'elles ont atteinte depuis l'ère industrielle, sont susceptibles de modifier le climat terrestre (IPCC, 1996). Les paléodonnées climatiques et les modèles d'évolution climatique démontrent que les calottes polaires sont particulièrement sensibles aux changements climatiques globaux. De plus elles sont susceptibles de jouer un rôle important mais inconnu à ce jour, sur le niveau des mers. Le terme positif du bilan de masse des calottes polaires est l'accumulation de neige, le terme négatif est constitué par l'écoulement de la glace vers les océans.

La taille des calottes polaires et de leur environnement hostile limitent la quantité de données de terrain disponibles. Seule la télédétection satellitaire est en mesure de fournir des informations sur des échelles géographiques aussi grandes que celles de l'Antarctique ou de l'Arctique et d'en effectuer un suivi régulier dans le temps. Mais pour être facilement interprétées, afin d'en déduire les caractéristiques du manteau neigeux observé depuis l'espace (taille, forme de grains, rugosité de surface...), les données satellitaires doivent être validées et inversées à l'aide de paramétrisations simples.

C'est donc en préalable à l'établissement de ces relations, qu'il est nécessaire de développer des modèles de réflectance de la neige (thèse C. Leroux 1996) prenant en compte les caractéristiques physiques et optiques de la neige, et des modèles d'émissivité micro-ondes (thèse S. Surdyck 1993) qui fournissent des informations de volume sur la morphologie du manteau neigeux. Le manteau neigeux est caractérisé par plusieurs paramètres physiques qui dépendent de la profondeur : la température, la densité, la taille et la forme des grains principalement. Il est alors indispensable d'établir une paramétrisation robuste et simple de la taille et de la forme des grains de neige à partir de leur observation. Un moyen d'observation et de mesure est le traitement d'images qui va permettre d' établir ces relations et qui va permettre un traitement automatique d'un grand nombre de données indépendamment de l'observateur.

Un autre problème glaciologique, du névé poreux est l'interprétation des données issues de l'analyse des gaz piégés dans les bulles d'air. Cette étude implique, en particulier, la datation de la glace dans le névé lors de la fermeture des pores, indispensable pour déterminer dans la glace profonde l'age du gaz par rapport à la glace qui l'emprisonne. En effet la datation des gaz contenus dans les bulles des carottes de glace s'effectue à partir de l'age de la glace, par conséquent, elle nécessite la connaissance de la différence d'age entre les gaz et la glace lors de la fermeture des pores.

A la fermeture des pores, le calcul de l'age de la glace nécessite un modèle de densification et celui de l'age des gaz un modèle de transport dans le névé poreux (thèse L. Arnaud 1997). Ces deux modélisations seront pleinement exploitées uniquement si la densité à la fermeture des pores est connue avec précision, d'ou le développement d'un troisième modèle physique de la fermeture des pores dans le névé polaire.

Les carottages réalisés depuis quelques années dans les régions centrales de l'Antarctique et du Groenland permettent d'obtenir des données expérimentales essentielles pour caractériser le névé polaire. Seul le traitement automatique des images issues de ces données est capable de fournir les paramètres de structure introduits dans les modèles de densification, de fermeture des pores, et de diffusion des gaz.

Un autre aspect étudié au Laboratoire de Glaciologie est l'augmentation de la taille moyenne des cristaux de glace (ou grains) avec la profondeur ou l'age de la glace. Ce grossissement des cristaux a été décrit dans la littérature glaciologique (Gow 1969, 1971 et 1975 ; Narita et al. 1978 ; Duval et Lorius 1980 ; Alley et al. 1982 ; Duval 1985 ; Alley et Bentley 1988). Les analyses manuelles des lames minces de glace permettant de déterminer ces lois de grossissement des grains, jusqu'à présent manuelles vont maintenant être réalisées automatiquement par traitement d'images 2D.

L'augmentation de la taille moyenne ne représente qu'un seul paramètre des modifications de la microstructure de la glace liées au grossissement normal des grains. L'utilisation du traitement d'image

appliqué à l'étude de ces microstructures va permettre l'observation et l'analyse de ces microstructures en terme d'évolution des distributions de taille et en terme d'évolution de la topologie des grains.

Nous constatons que le traitement d'images intervient dans plusieurs domaines indépendant les uns des autres. Il est devenu un outil indispensable pour la caractérisation, et la paramétrisation des différents stades de l'évolution de la neige à la glace.

Les objectifs du travail présenté étaient donc de plusieurs ordres :

Un objectif d'observation et d'acquisition de différents types d'images, qui sont des images de grains de neige, des images de microstructures du névé poreux, et des images de cristaux de glace (chapitre II). Nous verrons qu'une nouvelle technique va permettre la photographie directe sur site des grains de neige et une autre nouvelle technique va permettre la visualisation de la microstructure du névé poreux.

Une définition des concepts et des outils de la géométrie discrète utilisés dans ce travail (chapitre III). Nous présentons les concepts et les outils de la géométrie discrète et nous étudions la sensibilité par rapport à la résolution spatiale des paramètres calculés à partir des images 2D, liée au passage du domaine continu au domaine discret. Nous faisons une étude du nombre d'objets nécessaires pour avoir une bonne représentativité statistique des paramètres calculés.

Un objectif de définition et de mesure de la taille des grains de neige et un objectif de caractérisation de la forme des grains de neige (chapitre IV). Cette étude a pour but d'obtenir des paramètres robustes et représentatif des grains de neige à partir d'images 2D pour pouvoir les utiliser, et les comparer aux entrées ou aux sorties d'un modèle de métamorphisme de la neige (CROCUS), d'un modèle d'émissivité micro-ondes du manteau neigeux et d'un modèle de réflectance de la neige. Ceci est illustré par l'analyse et la comparaison des résultats de la modélisation et des mesures de taille et de forme de grains de neige obtenues à partir d'un grand nombre d'échantillons prélevés en Antarctique.

Un objectif de caractérisation et de modélisation de la micro-structure du névé poreux, (chapitre V). Ce travail a pour but d'apporter l'information nécessaire à la modélisation de la densification et à la modélisation de la fermeture des pores (thèse L. Arnaud 1997), de décrire les mécanismes locaux de déformation et d'étudier les informations contenues dans ces micro-structures pour voir si l'on peut en déduire la profondeur de la fermeture des pores. Une autre approche a consisté à essayer de générer des images de microstructure à partir d'une image initiale, ceci dans le but d'avoir une description continue de l'évolution du névé poreux.

Un objectif de caractérisation et de paramétrisation de la microstructure de la glace (chapitre VI). Cette étude a pour but de reconstruire automatiquement la microstructure de la glace polycristalline à partir de traitement d'images et cela à différentes profondeurs. Une des applications sera de comparer les lois de croissance des cristaux de glace en fonction des paramètres choisis pour estimer la surface moyenne des cristaux. L'autre intérêt d'une étude systématique à partir des images de microstructures issues de données expérimentales est la validation des modèles de grossissement normal des grains et des microstructures qui en découlent.

Description des principaux processus d'évolution de la neige à la glace :

La neige : les cristaux de neige se développent à partir de particules de glace élémentaires, de formes hexagonales, présentes dans les nuages, qu'on nomme germes. Selon leurs séjours dans une ou plusieurs plages de températures différentes, les cristaux de neige pourront avoir des formes diverses, parfois complexes, dues aux différents types de croissance subis. La neige qui se dépose à la surface des calottes polaires se transforme progressivement en glace. Elle subit différentes transformations correspondant a des processus physiques différents. Les évolutions de la neige sont classées en trois

catégories appelé le manteau neigeux, le névé et la glace.

Evolution du manteau neigeux : en un point donné, les chutes de neige qui se produisent se déposent les unes sur les autres et se transforment sous les seuls effets des conditions météorologiques. Chaque couche ou strate peut avoir des propriétés et un comportement différent. Cet empilement de couches constitue un assemblage hétérogène : le manteau neigeux. A un instant donné, la structure et la hauteur du manteau neigeux vont dépendre des particularités météorologiques induites par les facteurs topographiques. L'altitude et l'exposition vont jouer un grand rôle : niveau d'humidification, durée d'ensoleillement, angle de pente, zones d'érosion exposée au vent ou au contraire, zones d'accumulation à l'abri du vent.

On appelle métamorphoses les transformations que vont subir les cristaux de neige, les amenant de leur forme originelle (neige fraîche) à des formes granuleuses. Ces métamorphoses résultent de l'action de nombreux paramètres parmi lesquels on peut citer : le vent, la nébulosité et les précipitations, le bilan radiatif de surface, la température et l'humidité de l'air. Deux types d'actions vont diriger ces métamorphoses : une action mécanique et une action thermodynamique. Dans les premiers mètres les évolutions lentes du manteau neigeux dans le cas des neiges sèches, ont pour moteur principal le gradient de température. L'efficacité des échanges glace/vapeur et vapeur/glace vont dépendre du gradient de température et des courbures caractérisant la périphérie des grains de neige. (Colbeck 1983). L'effet de gradient et l'effet du rayon de courbure sont simultanés mais antagonistes.

L'évolution microphysique du manteau neigeux, par transfert de vapeur d'eau et par glissement des grains les uns par rapport aux autres sont les facteurs qui contribuent à sa densification. A une profondeur de quelques mètres, tout gradient de température disparaît. Les flux de vapeur d'eau deviennent négligeables, et les possibilités de glissement des grains sont épuisées. La densification se fait plus lentement par fluage de matière aux points de contact : on parle alors de névé.

Processus dans le névé : le névé est considéré comme un milieu poreux isotherme. L'évolution ou la densification se fait par déformation visco-plastique des zones de contact entre les monocristaux de glace sous l'effet de la charge de la colonne de neige et de névé situé au-dessus. Les évolutions des micro-structures vont donc dépendre de la déformation visco-plastique des zones de contact mais aussi du grossissement des monocristaux de glace (Artz et al. 1983).

Transition névé-glace : par compaction croissante, la porosité du névé diminue et se ferme. On parle alors du passage d'un milieu à pores ouverts à un milieu à pores fermés : la glace. La densité de la glace à la fermeture de la porosité semble déterminée en partie par la forme et la taille que les grains ont acquises dans les couches inférieures du manteau neigeux à quelques mètres de profondeur. Cette profondeur de transition varie entre 60 et 120 mètres suivant la température du site, correspondant à des ages de glace variant entre 100 ans (glaciers tempérés) à 2500 ans (calottes polaires).

Glace : le dernier stade de densification correspond à la compression des bulles de la glace sous l'effet de la différence de pression entre les cristaux de glace et l'air des bulles. Cette dernière étape vient à son terme entre 600 et 1000 mètres de profondeur en Antarctique, lorsque les bulles de la glace disparaissent par formation de cristaux d'hydrates d'air. La taille moyenne des cristaux de glace augmente avec l'age de la glace. Dans la partie supérieure des calottes polaires, les évolutions des micro-structures sont principalement liées au grossissement normal des cristaux de glace.

1. Introduction :

La première étape de ce travail consiste à obtenir des images descriptives de la neige (profondeur 0 à ~ 5 mètres), du névé (profondeur : 5 à ~ 200 mètres) et de la glace (profondeur ~ 200 mètres et +). Ces images vont permettre une visualisation des grains de neige, de la structure du manteau neigeux, des différentes composantes de la structure du névé poreux et de la structure de la glace. L'objectif de ce chapitre est de présenter les différentes techniques utilisées et celles que nous avons mises au point pour obtenir des images de grains de neige et de la structure de la neige (§2), des images de la structure du névé poreux (§3), et des images de la structure de la glace (§4).

2. Les images de neige :

Le but est de pouvoir obtenir des images des grains de neige à différentes profondeurs. Les échantillons doivent représenter le mieux possible la structure verticale de la couche de neige et fournir les informations de taille et de type de grains de neige de chaque strate du manteau neigeux.

La taille et la morphologie des grains de neige sont des paramètres important pour comprendre le métamorphisme, et la densification de la neige. Pour décrire l'évolution de la neige en utilisant les lois de métamorphisme, il est nécessaire d'introduire un formalisme décrivant la neige comme une fonction de paramètres continus. Ces paramètres sont la dendricité, la sphéricité et la taille des grains. Ces paramètres utilisés dans le modèle de prévision des avalanches et de métamorphisme de la neige CROCUS (Brun et al., 1992) développé au C.E.N. nécessitent d'être comparer aux paramètres de taille et de forme obtenus à partir des échantillons de terrain.

D'autre part, Les signatures spectrales de la neige dans les domaines visible, infrarouge ou micro-ondes dépendent de la taille et de la forme des grains qui composent le manteau neigeux. Dans le domaine infrarouge par exemple, on constate que l'albédo qui est simplement le rapport du flux réfléchi sur le flux incident pour une longueur d'onde donnée, décroît lorsque la taille des grains augmente (Warren and Wiscombe, 1981).

Une classification internationale des grains de neige a été établie par Colbeck en 1990, qui prend en compte la taille et la forme des grains. Un exemple de définition de la taille d'un grain de neige est la plus grande dimension mesurée en millimètre de ce grain. Une méthode simple pour mesurer sur site la taille des grains de neige est de placer les grains sur une plaquette ou un quadrillage de lignes est inscrit tous les millimètres. La taille moyenne est estimée en comparant la plus grande dimension du grain avec le nombre d'interligne (ou de millimètre). Cette estimation peut être différente de celle obtenue par tamisage. Cette méthode dépend également de l'opérateur et devient très subjective lorsqu'on souhaite établir une classification des grains de neige suivant leurs formes.

Grâce à l'acquisition et au traitement d'images de grains de neige, nous allons pouvoir définir et mesurer automatiquement des paramètres métriques et morphologiques de la neige sans aucune intervention de l'opérateur. Le traitement automatique va également permettre l'analyse d'un grand nombre d'échantillons.

2.1 Les méthodes d'observation et de prélèvement de grains de neige :

Deux méthodes existent pour obtenir des images de grains de neige. La méthode dite "méthode iso-octane" (Brun et Pahaut 1991) consiste à prélever des grains de neige sur les sites. Ces échantillons sont transportés au laboratoire en prenant soin de conserver la "chaîne de froid". Ils sont ensuite numérisés grâce à un système d'acquisition d'images que nous avons installé en chambre froide.

L'autre méthode que nous proposons consiste à photographier les grains de neige sur le terrain. Les images des grains de neige sont alors obtenues en scannant les négatifs photographiques. L'avantage de cette méthode étant de supprimer le transport des échantillons à une température de -15°C du terrain jusqu'au laboratoire.

Méthode iso-octane :

Cette méthode, mise au point par "Brun et Pahaut (1991)" consiste à prélever des grains de neige dans chaque strate du manteau neigeux et à les stocker dans des flacons remplis d'iso-octane liquide à une température inférieure à -5°C. L'iso-octane est une substance présentant l'avantage de rester liquide jusqu'à -30°C, permettant de prélever des échantillons dans des zones froides du continent Antarctique. Les grains de neige dans l'iso-octane ne sont alors plus au contact de l'air. Les grains de neige n'évoluent plus tant qu'ils seront maintenus immergés dans le liquide et que la température sera maintenue en dessous de -5°C. Seule la diffusion en surface ou en volume de la glace peut se produire, mais ce sont des processus très lents.

Le stockage des échantillons, à plus long terme, s'effectue dans des chambres froides ou dans des congélateurs à des températures de -10°C à -15°C.

Acquisition des images :

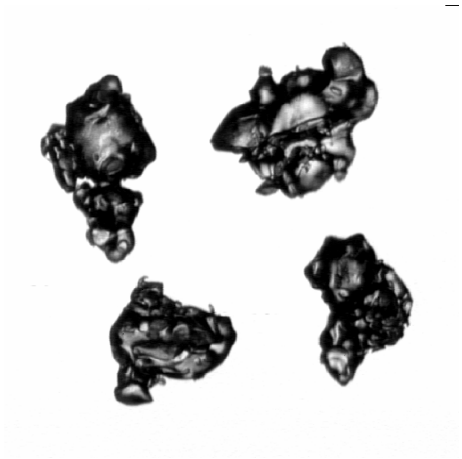
Il s'agit d'enregistrer les images des grains prélevés sur les sites au moyen d'une caméra numérique. L'analyse de l'échantillon se fait en chambre froide. On vide le flacon sur un filtre en papier qui retient les grains de neige. L'iso-octane s'évapore rapidement et l'on peut déposer les grains de neige sur une plaque de verre. On sépare alors les agglomérats de grains de neige à l'aide d'une pointe de crayon. Ceci est une étape difficile ou l'on passe beaucoup de temps parce que les grains ont tendance à s'agglomérer entre eux. On observe ensuite ces grains au travers d'une binoculaire (Leica MZ8). Nous avons équipé cette binoculaire d'une caméra C.C.D. (Sony XC003P) pour acquérir et enregistrer les images.

L'échantillon est éclairé en lumière transmise, pour augmenter le contraste. Le champ de prise de vue est plus petit que la plaque de verre, on effectue alors plusieurs prises d'images en sélectionnant plusieurs champs si possible aléatoirement. On montre sur la *figure 2.1* un exemple de trois images de grains de neige (a, b, c) prélevés en Antarctique et numérisées en chambre froide au L.G.G.E.. La quatrième image (d) montre le réticule que l'on utilise pour effectuer la conversion des pixels en millimètres.

Grâce à un logiciel d'acquisition spécifiquement développé, permettant le contrôle automatique du gain en fonction de la luminosité et de l'incrémentation automatique des noms d'images, le temps de manipulation et d'acquisition est d'environ 20 à 30 minutes par échantillon. Cela représente 20 à 30 images comportant de 1 à 5 grains chacune.

Les grains ainsi numérisés sont ensuite analysés par traitement d'images. Pour avoir une bonne représentativité statistique il est nécessaire d'analyser une cinquantaine de grains d'un même type, soit 25 images en moyenne. Cette technique a l'avantage d'être très pratique, en particulier sur le terrain, cependant elle ne permet de caractériser que des grains de neige isolés et ne prend pas en compte la structure du manteau. Le transport des échantillons jusqu'au laboratoire pose souvent des problèmes pour maintenir la chaîne de froid. Nous avons par exemple, perdu des échantillons provenant du Groenland, suite à une erreur d'un transporteur qui n'a pas maintenu la chaîne de froid durant le trajet.

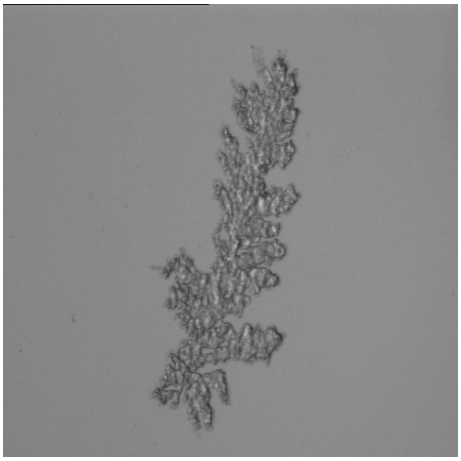
Nous proposons une autre méthode de prise directe de photographies de grains de neige sur le terrain.



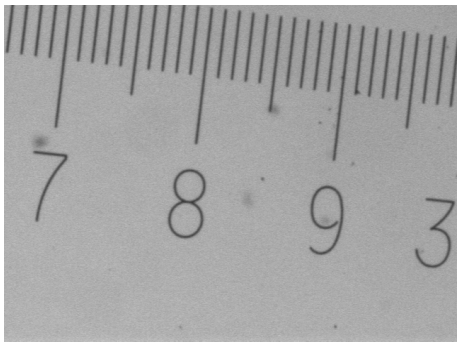
(a)

(b)

---------- 1 mm



(c)



(d)

Figure 2.1 : Images de grains de neige numérisés à l'aide d'une binoculaire et d'une caméra CCD Sony XC003P. Sur l'image (d), l'écart entre deux graduations numérotées est de 1 mm.

Méthode photographique directe :

Une nouvelle technique permet de prendre des photographies de grains de neige directement sur le terrain. Cette méthode a été mise au point par A. Hubert. A. Hubert est un Belge qui a effectué une traversée de l'antarctique avec un traîneau tracté par un cerf volant et qui a rapporté des photographies de grains de neige.

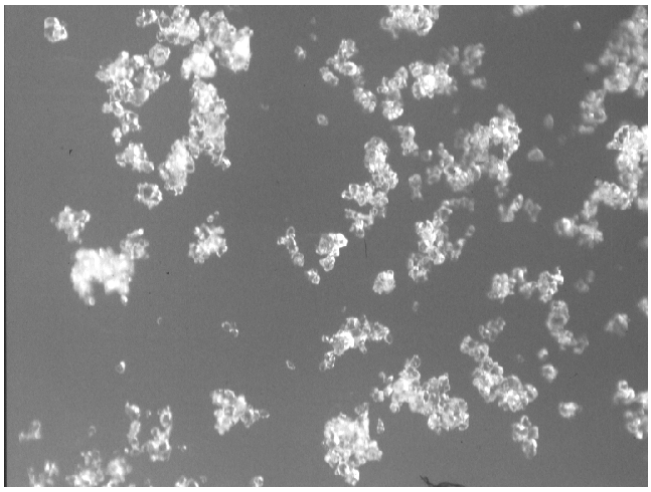
A. Hubert a effectué des prises de vues avec un dispositif comprenant un appareil photographique Nikon FM2, une bague allonge PN11, et un objectif de 50 mm monté à l'envers sur la bague, le tout est installé sur une boite "tuperware".

Lors de l'utilisation, les grains de neige sont déposés sur le couvercle de la boite de diapositives, on place alors la boite "Tuperware", et l'appareil photographique au-dessus. La distance focale fixe, implique qu'on ne peut pas faire varier le grossissement égal à deux. Ceci est un inconvénient lorsque la dispersion des tailles de grain est élevée. Il sera impossible de faire la mise au point et les photographies des plus gros grains seront floues.

On montre sur la *figure 2.2* ce dispositif, qui a l'avantage d'être simple, et léger. Les grains de neige sont éclairés par la lumière ambiante naturelle au travers du boîtier translucide "tuperware", et ne nécessite pas d'apport d'énergie supplémentaire.

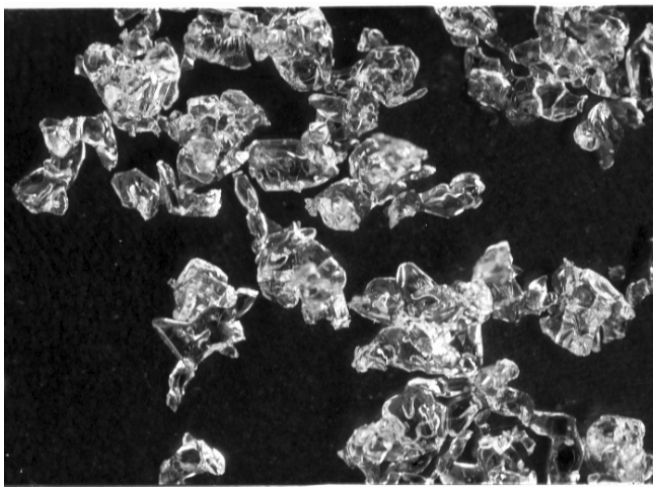
Figure 2.2 : Dispositif utilisé par A. Hubert lors de la traversée de l'Antarctique.

L'avantage d'un tel système comme nous l'avons dit, est de supprimer la chaîne de froid nécessaire au transport des échantillons du site jusqu'au laboratoire. Les images ont été prises par A. Hubert au cours d'un raid en Antarctique avec des pellicules Kodak Elite Chrome, 100 ASA (*Fig. 2.3*). Les négatifs sont ensuite numérisés à l'aide d'un scanner d'une résolution de 600 dpi. Nous constatons qu'elles n'ont pas la qualité de celle du laboratoire. Un algorithme spécifique de segmentation des images sera nécessaire pour pouvoir analyser ces images.



---------- 1 cm

Figure 2.3 : Photographie de grains de neige prise avec le dispositif mis au point par A. Hubert (raid Antarctique de A. Hubert).



---------- 1 cm

Figure 2.4 : Photographie de grains de neige prise selon le même principe et un dispositif amélioré (raid Antarctique Terra Nova Bay -> Dôme C, M. Gay).

Nous avons chercher à améliorer ce système pour nous permettre d'avoir une bien meilleure qualité des photographies. Selon le même principe, nous avons modifié la partie basse du dispositif pour obtenir un meilleur contraste. Nous montrons sur la *figure 2.5*, le nouveau dispositif et sur la *figure 2.4*, les images obtenues après numérisation des négatifs photographiques (pellicule noir et blanc Kodak Professionnelle T400CN).

Figure 2.5 : Dispositif utilisé par Gay M. lors du raid I.T.A.S.E..

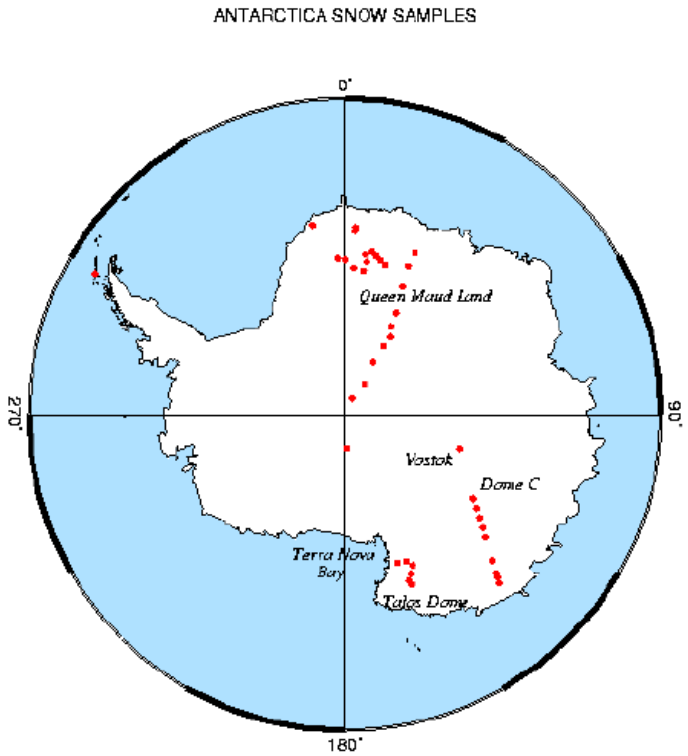
2.2 Bilan des prises d'images pour l'étude des grains :

Ces deux techniques ont permis de prélever et de photographier des grains de neige en Antarctique. Plusieurs campagnes ont été nécessaires pour obtenir des échantillons en plusieurs points de l'Antarctique. On montre sur la *figure 2.6* les sites de prélèvements des échantillons en Antarctique. La liste des raids et des participants est mentionnée dans le *tableau 2.1*. Ce tableau comprend le bilan des échantillons prélevés et des photographies réalisées par campagne et par site. Environ 6000 images ont été numérisées et analysées. Les analyses et les résultats sont présentés dans le *chapitre IV*.

Nous allons montrer au cours de ce travail une des applications de ces résultats dans le projet "Polar Snow". Les objectifs de ce projet intitulé "Investigation and modeling of the physical characteristics and properties of snow at the surface of polar ice sheet", sont :

- le développement et le test d'un modèle numérique de métamorphisme de la neige (CROCUS),
- l'acquisition, la détermination des tailles et des caractéristiques des grains de neige sur le continent Antarctique par une méthode objective.

Figure 2.6 : Localisation des sites de prélèvements des grains de neige en Antarctique.



Expérience	Dates	Participants	Nombre d'images
Dumont d'Urville - Dôme C traverse (ITASE, French traverse, IFRTP logistics)	Eté austral 95-96	F. Candaudap, LGGE	700
Vostok (Vostok ice core project with Russia and US)	Eté austral 95-96	L. Arnaud, LGGE	90
Dome C (EPICA project)	Eté austral 96-97	E. Lemeur et P.Journé, LGGE	697
Terra Nova Bay - Tallos Dome (ITASE Italian traverse)	Eté austral 96-97	M. Frezzoti, ENEA, Italy	1047
Queen Maud Land (EPICA Germany)	Eté austral 96-97	H. Oerter, AWI, Germany	1612
Queen Maud Land (Norvegian traverse)	Eté austral 96-97	J.G. Winther, NPI, Norway	951
Expedition South Through The Pole (Belgian trans-Antarctic expedition)	Eté austral 97-98	A. Hubert, STTP, Belgium	256
Terra Nova Bay - Dome C (ITASE, Italian traverse)	Eté austral 98-99	M. Gay, LGGE	315

Tableau 2.1 : Bilan des images de grains de neige numérisées et analysées.

2.3 La méthode de prise d'échantillons et d'acquisition d'images de structure de la neige :

Cette méthode a pour objectif d'obtenir des échantillons représentatifs de la structure du manteau neigeux à différentes profondeurs.

La méthode de prélèvement d'échantillons de neige est l'imprégnation (Good 1989) dans de l'acide diethyl phtalate qui est très peu soluble avec l'eau. La technique de prélèvement est délicate car elle ne doit pas endommager la structure : des blocs de neige d'environ 4 cm x 4 cm x 15 cm sont prélevés dans les puits de mesure, soit en enfonçant un carottier, soit en découpant un cube de neige à la scie si la densité le permet. Ce bloc est déposé dans une boite étanche et maintenu à une température inférieure à -5°C jusqu'à son arrivée en chambre froide.

En chambre froide on imprègne cet échantillon à une température de -5°C avec du diethyl phtalate coloré avec du noir de carbone. La technique consiste à verser le diéthyl phtalate liquide sur le coté de la boite qui remonte par capillarité et chasse ainsi l'air des pores. On congèle l'échantillon à une température de -30°C pour accélérer le processus. Le temps moyen de congélation est de l'ordre de 24 heures lorsque l'échantillon a été imprégné.

Une fois solidifié, il peut être manipulé jusqu'à une température de -5°C. Rappelons que le point de fusion du diéthyl phtalate est de -3°C. Cette technique permet d'imprégner des échantillons de neige dont la densité varie de 0.2 à 0.5.

On découpe ensuite ces échantillons en section de 4 cm x 4 cm x 1 cm, et on surface au microtome la grande section On acquiert une image de cette section en chambre froide avec une caméra CCD et un éclairage annulaire par réflexion à fibre optique (*Fig 2.7)*. Grâce à cet éclairage, on peut visualiser la glace et le réseau poreux dans le plan de coupe de l'échantillon.

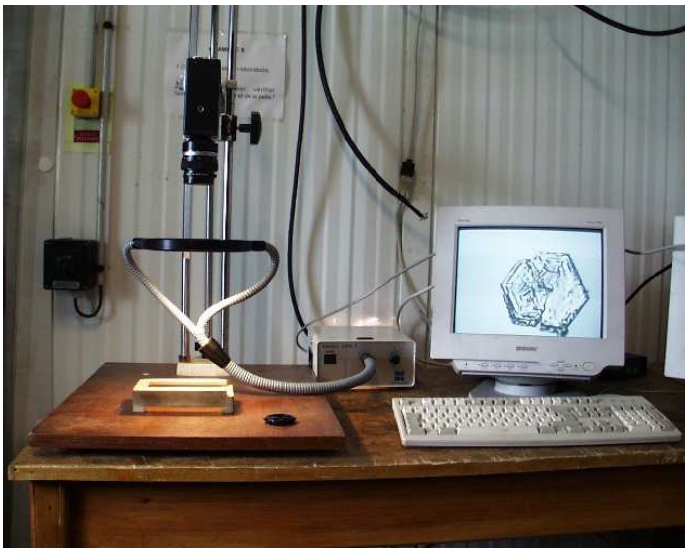
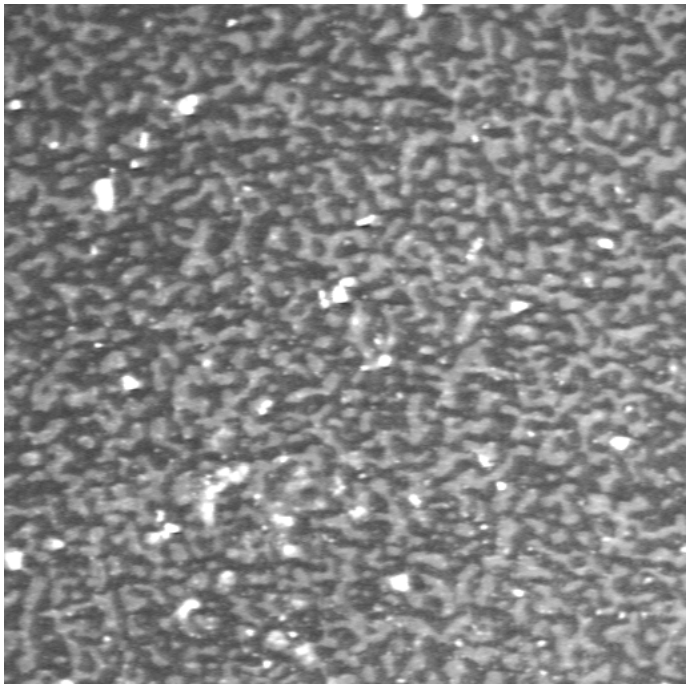


Figure 2.7 : Photographie du dispositif d'acquisition d'images de structure en chambre froide.

On montre sur la *figure 2.8* une image obtenue à partir d'un échantillon, les zones noires représentent la glace, les zones grises représentent le réseau poreux ou l'air, et les zones blanches sont des artefacts.



---------- 1 cm

Figure 2.8 : image de structure d'un échantillon de neige de densité 0.41, imprégné avec du diéthyl phtalate.

Une application de cette technique qui sera détaillée en annexe *A* est l'expérience PORTOS qui a eu lieu dans les Alpes.

L'acquisition, et l'analyse par traitement d'images 2D de structure a permis d'extraire deux paramètres qui rendent compte de l'interaction de la neige avec les micro-ondes. Ces paramètres sont la fonction d'autocorrélation de la neige et la longueur de corrélation associée.

Des échantillons prélevés sur le terrain mesuraient environ 8 cm x 8 cm x 20 cm. Des sections de 4cm x 4cm x 4cm découpées selon l'axe vertical ou l'axe horizontal ont été digitalisées au LGGE. Quinze images ont été analysées, représentant un échantillonnage entre 0.15 mètres et 4.45 mètres de profondeur.

2.4 Conclusion :

Nous avons deux méthodes de prélèvement et de visualisation des grains de neige permettant d'obtenir des images et de faire des analyses quantitatives des paramètres de taille et de forme des grains de neige.

Les images obtenues à partir de la méthode de photographie directe que nous avons développé en lumière réfléchie des grains de neige sont aussi bonnes que les images prises en lumière transmise au laboratoire. Le principal avantage de cette méthode est de ne pas nécessiter le transport des échantillons, et de supprimer l'éventuelle perte d'échantillon par fonte durant le transport. La principale difficulté est liée à l'utilisation de matériel photographique sur site dans des conditions difficiles (vent et température très basses) et au dépôt des grains de neige sur le support de prise de vue dans ces conditions.

La méthode d'imprégnation rend compte de l'évolution de la structure du manteau neigeux. Elle présente deux inconvénients :

- elle est longue à mettre en oeuvre,
- la température (-30°C) et le temps (24 heures) de congélation nécessite des équipements spécifiques (congélateur transportable) lorsqu'on manipule sur site.

3 Les images de névé :

L'analyse, le traitement et la paramétrisation des images de névé, nécessitent d'avoir des documents photographiques représentant la structure du réseau poreux, les cristaux de glace et les différentes interfaces. La difficulté d'obtenir de tels documents en glaciologie est illustrée par l'étude récente de Shatbaie et Bentley (Shatbaie 1994), dans laquelle il a utilisé des documents de 1959 (Fuchs 1959) pour avoir une description de la structure du névé. Ces documents, comme plus tard ceux de Alley (Alley 1987) ne sont pas directement des photographies de la structure mais des reconstructions faisant appel à plusieurs techniques d'observation. La première consiste à visualiser le milieu poreux et la glace en lumière réfléchie, la deuxième à visualiser chaque cristal de glace en lumière polarisée et transmise. A partir de ces deux techniques, il est possible d'élaborer un document comportant l'information réseau poreux, glace, cristal de glace et joint de cristaux. On estime à une demi-journée le temps nécessaire pour réaliser une structure d'une lame mince.

La série de photographies de structures réalisée par Gow, (Gow 1975) montre les possibilités des études en lumière réfléchie des lames minces de neige et de névé. Gow signale notamment de mettre en évidence les joints de grain par "gravure". Cette piste est à l'origine du développement de la technique mise au point par L. Arnaud (Arnaud 1997).

Des images de névé numérisées au laboratoire à partir des documents de Fuchs (Fuchs 1959) ont préalablement été traitées pour évaluer le nombre d'objets nécessaires à une bonne représentativité statistique. Ceci définissant le nombre de champs photographiques contigus. En gardant comme référence les images reconstruites par Fuchs ou Alley et les photographies de lames minces de Gow, nous avons mis au point une technique permettant de visualiser la structure des porosités ainsi que les joints de grains séparant les cristaux de glace en une seule photographie.

Cette nouvelle méthode a l'avantage d'être rapide et facile à mettre en oeuvre, elle ne nécessite pas d'imprégnation tant que la cohésion du matériau ne l'impose pas. Cette technique a été testée en laboratoire et sur le terrain, à partir d'échantillons non imprégnés de névé dans une gamme de densité de 0.5 à 0.9. Nous allons présenter la méthode expérimentale.

3.1 Méthode expérimentale d'observation d'échantillons sublimés :

L'idée déjà suggérée par Gow de sublimation des échantillons a été reprise par Nishida et Narita (Nishida 1996), pour mettre au point une méthode d'observation d'échantillon de glace (à partir de la densité de 0.8). Cette méthode est basée sur une dissolution différentielle à l'alcool de la surface de l'échantillon, et une observation en lumière réfléchie de la gravure des joints des cristaux. La taille de l'échantillon est suffisante pour visualiser 40 cristaux. Cette méthode est utilisée pour éroder plusieurs coupes d'un même échantillon et reconstituer une structure 3D de plusieurs cristaux de glace. La gravure à l'alcool se fait sur une épaisseur de 50 microns, la coupe sériée ne peut s'effectuer que tous les 100 microns. On peut constater que le champ d'investigation est relativement faible (8 mm environ) et que l'image n'est pas homogène. Ceci nécessite comme il est spécifié par les auteurs une retouche manuelle de chaque image.

Nous avons préféré compte tenu de la fragilité de nos structures poreuses, utiliser la sublimation pour "graver" préférentiellement les joints des cristaux. Cette méthode permet de travailler sans imprégnation jusqu'à des densités de 0.5 g/cm^3. L'utilisation d'un éclairage coaxial perpendiculaire à la surface permet d'améliorer le contraste entre les joints des cristaux ou les pores et le reste de la surface de la glace. L'observation en épiscopie coaxiale d'échantillons surfacés et sublimés constitue la base de cette nouvelle technique de caractérisation du névé mise au point et utilisée en Antarctique par L. Arnaud.

L'épiscopie coaxiale :

Utilisée depuis longtemps en métallurgie, cette technique d'observation en réflexion met en évidence des différences de relief sur une surface plane et réfléchissante. Les échantillons dans notre cas

proviennent de carottes de glace dans lesquelles sont prélevés des blocs de dimension 4 cm x 4 cm x 1 cm. Ils sont surfacés à l'aide d'un microtome, puis observés en lumière réfléchie grâce à une binoculaire (Leica MZ8) équipée d'un éclairage d'épiscopie coaxiale.

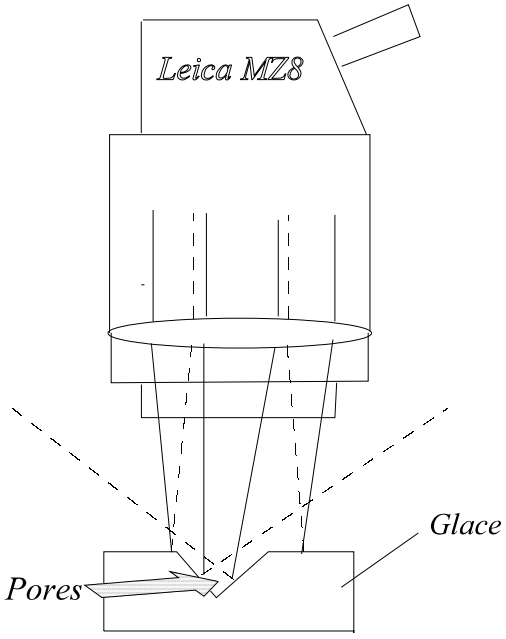


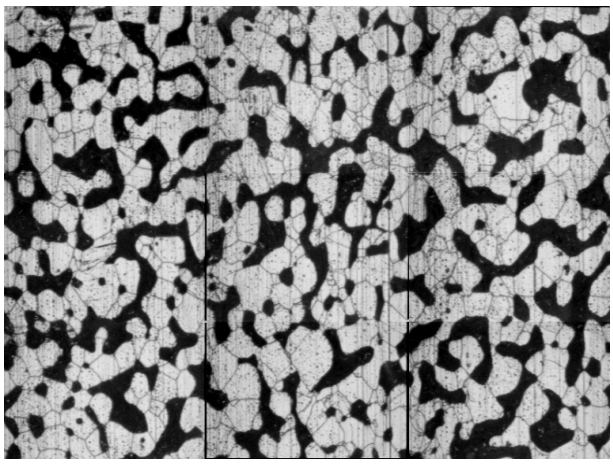
Figure 2.9 : schéma de principe décrivant l'origine du contraste du à des différences d'orientation des surfaces.

Le contraste est du à des différences de quantité de lumière réfléchie, liées à des différences d'orientation des surfaces éclairées (*Fig. 2.9*). La quantité de lumière réfléchie entre les zones planes surfacées (glace) et les zones concaves (pores) varie, induisant une réflexion claire pour la glace et une réflexion foncée pour les pores.

La limite pour les faibles densité (<0.35) provient de l'arrachement de grains lors du surfaçage au microtome ; cette limite est beaucoup moins critique que pour les travaux en lumière transmise qui nécessite d'amincir la lame à une épaisseur de l'ordre du rayon des grains.

Un inconvénient de cette méthode d'observation est la taille restreinte du champ d'observation, liée à la zone ou l'éclairage est homogène. L'utilisation du traitement d'images va permettre de pallier cet inconvénient en reconstruisant une mosaïque d'images à partir de plusieurs photographies contiguës (*Fig. 2.10*). Cela va permettre d'avoir un champ de mesure suffisamment grand pour que le nombre d'objets soit statistiquement représentatif. L'avantage est la visualisation simultanée, sans imprégnation des cristaux et des pores en une seule prise de vue.

.



---------- 1 cm

Figure 2.10 : Mosaïque de 9 photographies contiguës reconstruites par traitement d'images. La phase poreuse est en noire, la glace est en blanc.

Des procédures adaptées de filtrage par traitement d'images vont permettre de supprimer les traits de microtome et les traits de juxtaposition des négatifs. Le névé est le milieu pour lequel cette technique est la plus appropriée. Elle ne nécessite que très peu de préparation sur les lames, on conçoit qu'elle ne puisse pas être utilisée si la structure du milieu devient peu dense (<0.35) donc trop fragile. Cette technique a été testée en laboratoire et sur le terrain, à partir d'échantillons non imprégnés de névé et de glace dans une gamme de densité de 0.5 à 0.91.

3.2 Bilan des prises d'images pour l'étude du névé :

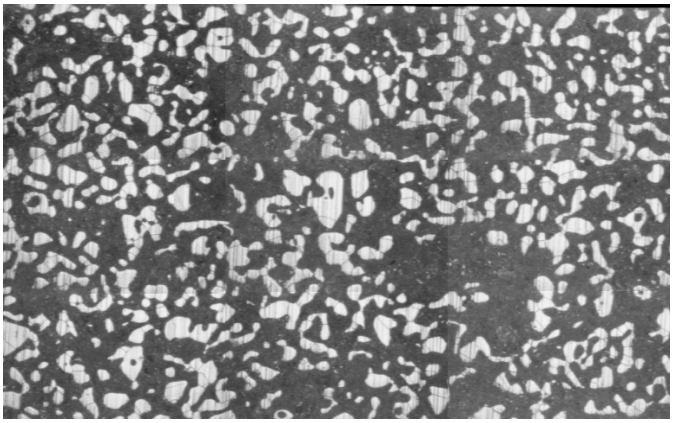
Une campagne de mesures effectuées à Vostok durant l'été austral 95-96 a eu entre autre pour objectif de réaliser trois séries de photographies, dans le but d'étudier la densification, la fermeture des pores, et la diffusion des gaz dans le névé polaire. Une partie du travail réalisé par L. Arnaud a été de réaliser des photographies sur des échantillons provenant d'un forage d'une carotte de glace de 250 m réalisé sur place, ainsi que sur deux autres carottes stockées à Vostok et provenant de forages effectués sur l'axe Mirny-Vostok à 105 km et 200 km de Mirny (sur la côte Est de l'Antarctique). Les caractéristiques climatiques des trois sites sont résumées dans le *tableau 2.2.*

Site	Vostok (Bh7)	Km200	Km105
Température °C	-55°C	-30°C	-24°C
Accumulation $g/cm^2/an$	2.2	20.7	36.0

Tableau 2.2 : Caractéristiques climatiques des trois sites étudiés.

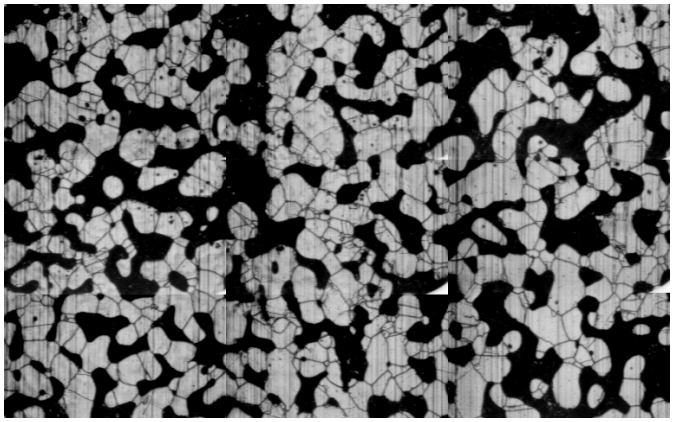
La technique a été appliquée sur 40 niveaux de profondeur différents sur la carotte de Vostok (Bh7) entre 7 et 250 mètres (densité : 0.35 à 0.91), sur 17 niveaux de Km105 et Km200 entre 5 et 100 mètres. Au total 1500 photographies ont été réalisées, et un bilan (en fonction de la densité) de l'ensemble des images de structure est présenté en annexe B.

On montre sur la *figure 2.11*, les images d'une structure de névé. Elle montre l'évolution de la structure 2D du névé de bh7 en fonction de la densité. Ce sont ces mosaïques d'images de chaque profondeur qui vont être utilisées pour obtenir des paramètres quantitatifs sur les pores, la glace, et les cristaux de glace (*Chapitre V*). Un inconvénient de cette méthode est qu'elle nécessite une précision de prise de photographies micro-métrique pour avoir des champs contigus recouvrables, ceci exclue toute possibilité de coupes sériées pour obtenir une image 3D de la structure.



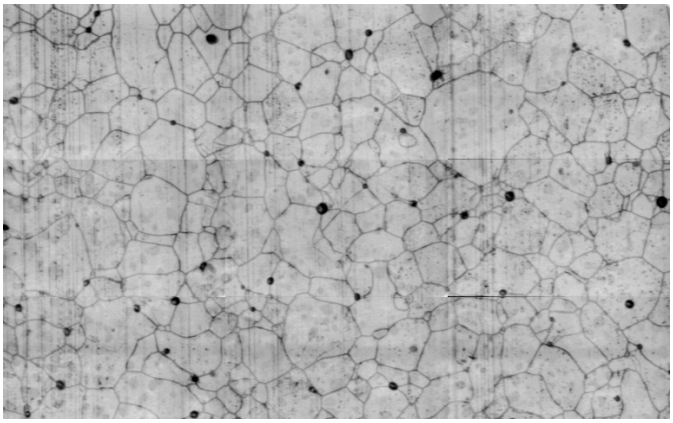
Profondeur : 5 m
Densité : 0.362

---
1 cm



Profondeur : 25 m
Densité : 0.552

---
1 cm



Profondeur : 236 m
Densité : 0.92

---
1 cm

Figure 2.11 : Évolution de la structure du névé en fonction de la densité

3.3 Conclusion :

Une méthode de caractérisation du névé et de la glace permettant de visualiser simultanément les cristaux, les pores et les différentes interfaces a été mise au point. Les avantages de cette méthode sont la facilité et la rapidité de préparation des sections et la capacité de visualiser toutes les composantes de la structure.

Cette méthode a été validée sur le terrain par des acquisitions de photographies de la structure de trois névés représentant des conditions climatiques différentes. Un ensemble conséquent de données "brutes" (1500 négatifs) a été constitué. Une procédure de traitement d'images a été développée permettant l'acquisition et la reconstitution semi-automatique d'images représentant un champ de mesure suffisamment grand.

A ce stade nous avons des images des grains de neige, et de la structure de la neige dans les premiers mètres, des images de la structure du névé poreux allant de 5 mètres à 200 mètres, la dernière étape consiste à avoir des images de la structure de la glace.

4. Les images de glace :

4.1 Les propriétés optiques de la glace :

La technique d'obtention d'images 2D la plus répandue en glaciologie est basée sur l'observation de lames minces en lumière transmise polarisée (Bader 1939), (Gow 1975). Du fait de leurs différences d'orientation, les cristaux de glace de la lame mince placée entre un polariseur et un analyseur croisé ont des couleurs différentes dues à la biréfringence de la glace. Cette technique d'observation permet de caractériser les cristaux : tailles, orientations, formes.

Nous allons exploiter cette propriété afin de déterminer les caractéristiques des grains de glace. Rappelons tout d'abord le principe.

E = champ électrique
H = champ magnétique
k = vecteur d'onde
ε = permittivité diélectrique du milieu traversé
D = vecteur "D" avec $D = \varepsilon E$

D rend compte de l'interaction entre l'onde et le réseau cristallin. Le plan d'onde (ensemble des points vibrant en phase) est défini par (D, H) et sa direction de propagation est donnée par k, vecteur d'onde. La direction des rayons lumineux, "trajectoire de l'énergie", est donnée par le vecteur de Poynting :

$$P = E \wedge H \qquad (2\text{-}1)$$

Dans un milieu anisotrope ε est un tenseur : D et E ne sont pas colinéaires, les rayons lumineux ne se propagent pas dans la même direction que l'onde. Pour comprendre la propagation d'une onde dans un milieu anisotrope comme dans notre cas pour la glace, les grandeurs à considérer sont le vecteur k, direction de propagation normale au plan d'onde et le vecteur D, direction de vibration de l'onde. On montre sur la *figure 2.12* la représentation de ces vecteurs.

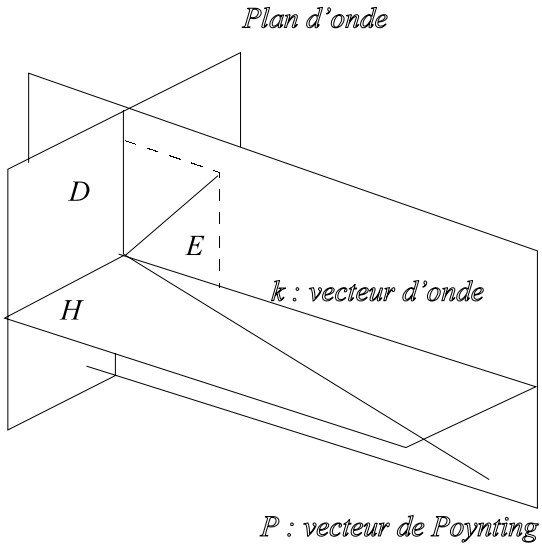


Figure 2.12 : Propagation d'une onde dans un milieu anisotrope , D et E ne sont pas colinéaire.

La lumière naturelle vibre aléatoirement dans toutes les directions. La polarisation de la lumière consiste à orienter sa direction de vibration *figure 2.13*.

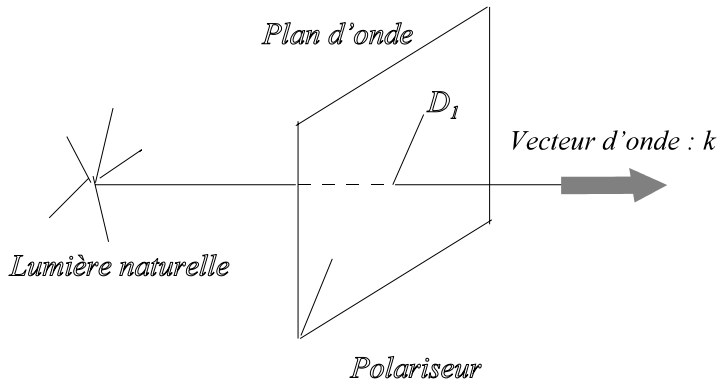


Figure 2.13 : Polarisation de la lumière.

La polarisation rectiligne se fait par un filtre polarisant de direction de polarisation Δ caractéristique. Deux polariseurs sont dits "en position croisée" lorsque les directions de polarisation sont perpendiculaires. Dans ce cas l'onde est éteinte (*Fig. 2.14)*.

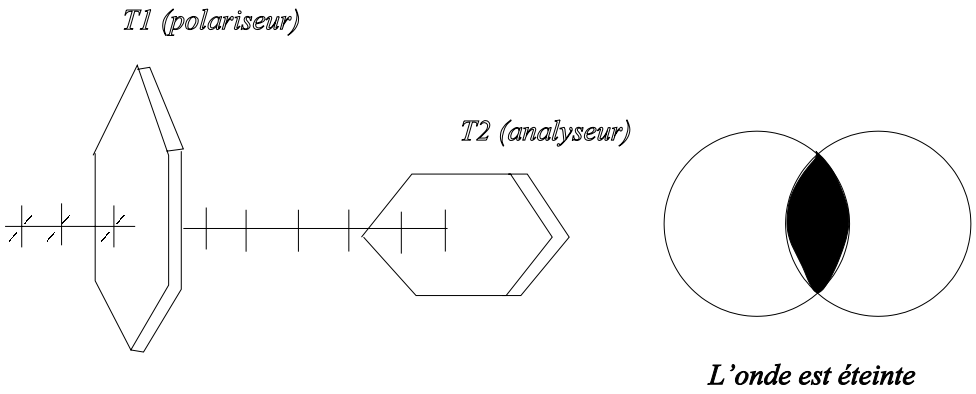


Figure 2.14 : Propagation d'une onde entre deux polariseurs croisés.

On montre qu'il existe dans un milieu anisotrope, pour une direction donnée de propagation de l'onde, des directions privilégiées de vibration du champ électromagnétique avec des vitesses de propagation associées :

- deux directions de vibration, et deux seulement, se propagent dans le milieu en conservant leur direction de polarisation,
- ces directions de vibrations sont rectilignes et mutuellement orthogonales,
- les vitesses de propagation de ces vibrations diffèrent, elles sont reliées aux indices de propagation par la relation n=c/v avec :

n : indice de réfraction.
c : vitesse de la lumière.
v : vitesse de propagation de l'onde.

On appelle milieu uniaxe un milieu anisotrope dont deux des trois indices principaux sont identiques. La glace dont la structure cristallographique est à l'origine d'une telle propriété, a un axe de symétrie hexagonale qui est également son axe optique. Les deux indices principaux égaux sont appelés indice ordinaire (n_o), le troisième indice principal s'appelle indice extraordinaire (n_e).

La lame mince de glace à analyser est placée entre deux polariseurs croisés. Lorsqu'il y a extinction de la lumière cela signifie que la direction de polarisation coïncide avec une des directions privilégiées et donc que l'axe optique est :

- soit parallèle à la direction de propagation du faisceau incident (coïncidence avec la direction ordinaire),
- soit perpendiculaire au vecteur d'onde et la première direction de polarisation coïncide avec une des deux directions privilégiées. Une rotation d'axe parallèle au faisceau incident de la lame de glace conserve l'extinction dans le premier cas. Dans le deuxième cas il y a extinction tous les 90°.

C'est grâce à cette propriété que l'on va pouvoir observer chaque cristal de glace et déterminer les caractéristiques en 2D de la structure de la glace à différentes profondeurs. Notons également que ce sont ces propriétés qui permettent de déterminer l'orientation des axes optiques ou axe "c"de chaque cristal d'une lame mince de glace.

4.2 La technique d'observation et le bilan des lames minces :

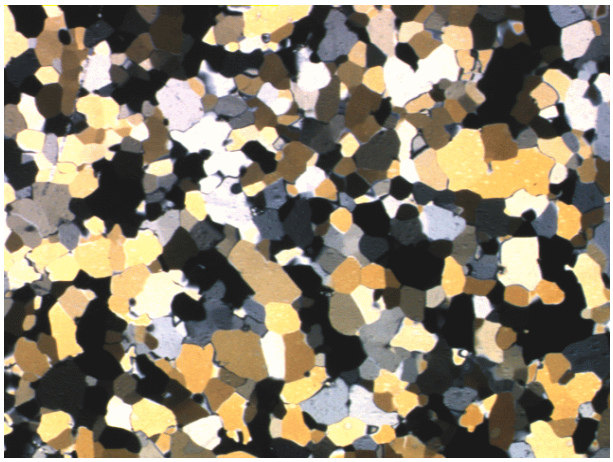
A partir de cette technique d'observation en lumière transmise, nous avons réalisé un montage permettant de faire tourner simultanément les deux polariseurs, la lame mince étant positionnée entre les deux. On réalise trois photographies de la lame mince en tournant le polariseur et le polariseur croisé d'un angle de 20° à chaque fois. Ceci nous permet d'avoir trois images en couleur de la même zone de glace. Par un traitement approprié de ces trois images nous allons segmenter puis analyser chaque image (*Chapitre VI*) et reconstruire la structure des cristaux de glace. La *figure 2.15* montre un exemple du type d'images brutes et la structure résultante.

Une campagne de mesure a été réalisée sur site à Dome Concordia. Un des objectifs de ces mesures est de caractériser la glace et son évolution au cours de la densification. Des lames minces entre 100 m et 300 m de profondeur ont été photographiées en couleur. Les photographies par rapport à une numérisation directe sur site ont l'énorme avantage d'avoir une excellente définition, et de permettre ainsi de numériser une ou plusieurs zones de la lame ou bien de grossir un endroit particulier. Comme précédemment ces images sont numériser grâce à un scanner couleur de résolution 600 dpi, et dont la résolution maximum est de 2700 dpi

Notons que le choix de la résolution est un compromis à trouver entre l'espace mémoire alloué à l'image le temps de calcul des opérateurs appliqués à l'image, et la définition nécessaire au calcul des paramètres que l'on peut extraire. Le bilan de l'ensemble des images à notre disposition et les caractéristiques du site sont résumés dans le *tableau 2.3*.

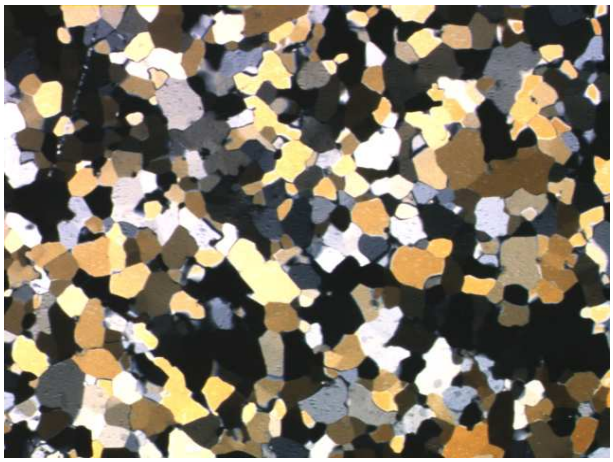
Site	Dome "C"
Température (°C)	-53
Accumulation (kg/m²/an)	36
Participants	J. Weiss, L. Arnaud
Nombre de photographies	

Tableau 2.3 Bilan des photographies prises en Antarctique (Dome Concordia)



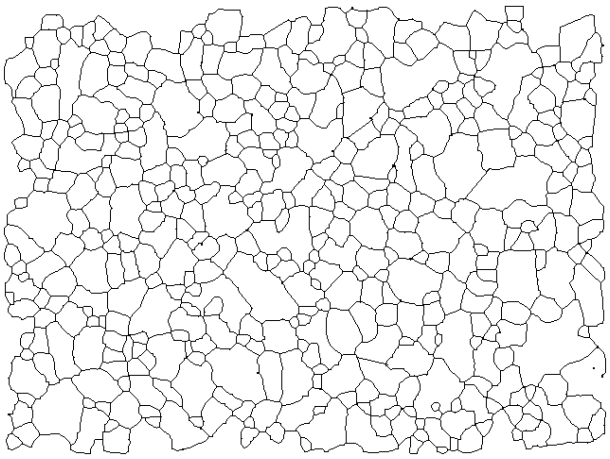
Profondeur : 139 m

---
1 cm



Profondeur : 139 m

---
1 cm



Profondeur : 139 m

---
1 cm

Figure 2.15 : Images de deux lames minces de Dôme C, prises en lumière polarisée et de la structure obtenue après traitement de trois images en couleur.

5 Conclusion :

Nous avons présenté dans cette première partie l'ensemble des techniques expérimentales permettant d'obtenir des données de base caractéristiques des grains de neige et de la structure de la neige, de la structure du névé et de la structure de la glace. Ces techniques sont basées sur des prises d'échantillons et si possible la prise directe de photographies sur site.

Nous avons mis au point une nouvelle technique de caractérisation du névé et de la glace permettant de visualiser simultanément les cristaux ou grains de glace, les pores et les interfaces grain-pore et grain-grain. Les deux principaux avantages de cette méthode sont la facilité et la rapidité de préparation des sections (sublimation des lames épaisses) et la possibilité de visualiser toutes les composantes de la structure. Un inconvénient de cette méthode est le champ restreint d'observation nécessitant la reconstitution d'une mosaïque d'images.

Nous avons mis au point un dispositif permettant de prendre trois photographies d'un même champ d'une lame mince que l'on fait tourner d'un angle de 20° à chaque prise de photographie. Ceci permet de visualiser chaque cristal de glace dans la glace profonde.

Ce travail a permis de constituer la première base de données d'images importantes sur la neige, le névé et la glace.

Les outils mathématiques qui vont permettre l'analyse de ces images vont être présentés au *chapitre III,* les méthodes de détermination des paramètres de la neige et la comparaison avec la modélisation vont être présentées au *chapitre IV*. L'analyse, la caractérisation et la modélisation du névé vont faire l'objet du *chapitre V*. La caractérisation de la structure de la glace, la comparaison avec les données obtenues jusqu'à maintenant manuellement, et la validation des lois de comportement des grains seront réalisées au *chapitre VI.*

L'objectif de cette présentation est de définir l'ensemble des outils mathématiques qui vont être utilisés au cours de ce travail. Nous allons d'abord définir l'espace de numérisation, puis introduire les notions de métrique et de distance de chanfrein inhérentes à l'analyse discrète quantitative. Les définitions de mesures topographiques seront ensuite introduites. Nous définirons enfin l'ensemble des paramètres utilisés dans les chapitres suivants.

1 Notions de base en géométrie discrète :

1.1 Espace de travail ^{2} :

L'analyse d'images par ordinateur nécessite de travailler avec des données discrètes de support fini. Etant donné une distribution de points P, l'ensemble des voisinages Rp (région) que l'on définit doit former une partition du support de la fonction image analogique f. Le *pavage* est défini comme étant une restriction des configurations possibles pour les régions, lorsque l'on utilise répétitivement les mêmes configurations de base pour recouvrir ^{2}.

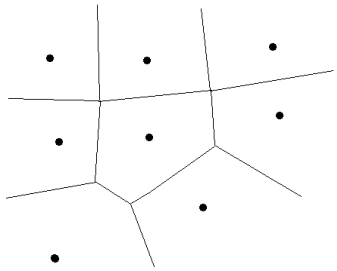


Figure 1.1 : Pavage généré par propagation à partir de germes irrégulièrement distribués.

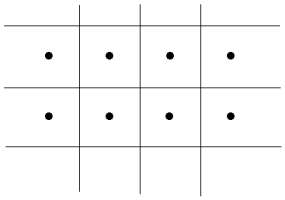


Figure 1.2 : Pavage générés par propagation à partir de germes régulièrement distribués.

Pour se rapprocher de la réalité, et du contexte de l'analyse d'images, la distribution des points P correspond à des capteurs régulièrement répartis, pour lesquels il convient de considérer un pavage ayant des propriétés telles que la répétitivité à l'infini du partitionnement, suivant une juxtaposition régulière.

Il existe plusieurs façons de définir un *pavage*, (Chassery 1991), citons :

- le pavage par propagation à partir de germes : on positionne les points P médiateurs des régions. Les points P sont considérés comme les germes de cellules que l'on fait isotropement grossir en parallèle (*polygone de Voronoi, figures 1.1, 1.2*) jusqu'à l'élaboration du partitionnement.
- le pavage par tesselles : on génère des modèles de régions ou formes auxquels on associe un point P. Ces modèles sont utilisés comme des tuiles (*tesselles*) pour partitionner le plan. On se limite à l'utilisation de polygones convexes et réguliers : *pavages par triangles, carrés, et hexagones* sont les trois partitions réalisables du plan.

Une propriété intéressante pour un pavage est d'être récursif (redécomposable à l'infini avec les mêmes tesselles), les *pavages triangulaire* et *carré* ont cette propriété. Ayant défini un pavage, convexe régulier, on associe un point P à l'intérieur de chacune des tesselles Vp intervenant dans sa constitution. Ces points P sont appelés pixels (picture elements).

On définit le *maillage* associé tel qu'à tout point P est associé l'ensemble des points q tels que Vp

et Vq ont une arête commune. L'ensemble de tous les segments (P,Q) ainsi définis forme le maillage. *Pavage et maillage* sont des représentations *duales* du partitionnement du plan.

Ayant défini l'espace discret de représentation, pour que les données soient directement manipulables par ordinateur et s'adaptent à une structure de données matricielle, il a été choisi trois types de maillage, le maillage carré, le maillage triangulaire, et le maillage hexagonal.

Le maillage carré est le plus couramment utilisé, pour représenter des images discrètes, c'est celui que nous utiliserons par la suite. Une image de dimension NxN est codée par une matrice A de même taille d'indice A[i,j].

Maillage carré Maillage triangulaire

La représentation discrète du support de l'image étant présentée, il reste à définir les concepts d'éléments et d'objets (chemin, arc, courbe...). Ceci nécessite d'introduire une notion de distance, induisant une notion de voisinage et par conséquent de consécutivité (métrique) et de connexité.

1.2 Voisinage et distance discrète :

Maillage carré : En restant dans l'espace discret, il convient de définir l'ensemble des voisins de P ou points adjacents ou *points consécutifs.* Un point quelconque d'une image est défini par ses coordonnées cartésiennes (i,j). On définit ainsi une distance discrète (relation définie positive, réflexive et vérifiant l'inégalité triangulaire), que nous appellerons d_4, par :

$$d_4(P,Q)=|i_p-i_q|+|j_p-j_q| \tag{3-1}$$

Ceci étant insuffisant pour définir correctement les notions topologiques courantes, on introduit une autre distance d_8 :

$$d_8(P,Q)=\max(|i_p-i_q|,|j_p-j_q|) \tag{3-2}$$

La distance Euclidienne discrète est définie par :

$$d_E(P,Q)=\sqrt{(i_p-i_q)^2+(j_p-j_q)^2} \tag{3-3}$$

Les quatre points Q distincts de P qui vérifient $d_4(P,Q)<1$ sont appelés points 4-adjacents à P ou voisins directs de P, de même pour le 8-voisinage de P, on a $d_8(P,Q)<1$.

Chemin, ligne : soit P et Q deux points du maillage, un chemin de P à Q est une suite de points du maillage $P = P_0, P_1 ..., P_k = Q$ telle que P_i est voisin de P_{i-1} pour i=2...k. Le maillage carré présente deux types de chemins, les chemins 4-connexes ou 8-connexes suivant que l'on utilise les points 4-adjacents

ou les 8-adjacents.

Arc : Un arc est un chemin tel que chaque point a exactement 2 voisins, sauf les extrémités qui n'en ont qu'un. Une *courbe* est un arc fermé.

Les définitions d'objet, d'arc de courbe sont toutes liées au type de connexité fixé.

x	x	x	o	o
x	o	x	x	o
x	x	o	x	x
o	x	x	o	x
o	o	x	x	x
o	o	o	o	o

Courbe 4-connexe et intérieur 8-connexe

o	o	o	o	o
o	x	x	o	o
x	o	o	x	o
o	x	o	x	o
o	o	x	o	o
o	o	o	o	o

Courbe 8-connexe et intérieur 4-connexe

On constate sur la figure précédente qu'une courbe 4-connexe a son intérieur 8-connexe, de même une courbe 8-connexe a son intérieur 4-connexe. Le théorème de Jordan n'est pas vérifié si on utilise la même connexité pour une courbe et son complémentaire, d'où la formulation suivante pour l'espace discret.

Théorème de Jordan discret :

Le complémentaire de toute courbe discrète 4-connexe (respectivement 8-connexe) est formé de deux composantes 8-connexe (respectivement 4-connexe). L'une de ces composantes est l'intérieur de la courbe discrète, l'autre est l'extérieur.

Frontière et intérieur d'un objet :

Coder des frontières d'objets revient à coder les objets eux-mêmes, puisque les composantes connexes à l'intérieur des frontières définissent le reste des objets. Parmi les méthodes de codage des frontières, le codage de Freeman est le plus utilisé dans les systèmes de traitement d'images. C'est celui qui est implémenté dans le logiciel que nous avons utilisé.

Il existe d'autres méthodes de codage d'une image qui s'appuient explicitement sur la notion de région et non plus sur les frontières, ces procédés nécessitent de définir les images de distance.

1.3 Distances discrètes, image de distance :

La modification des distances élémentaires définies précédemment est un moyen d'étendre les possibilités de recouvrement d'un objet par des formes élémentaires, en l'occurrence par les boules associées à une distance donnée. Ainsi il est intéressant de définir des distances discrètes approchant la distance euclidienne, la principale motivation étant la définition de boules discrètes isotropes.

Image de distance :

Etant donné une image contenant des points de référence, on appelle image de distance l'image telle que la valeur attribuée en tout point P soit égale à la distance entre P et le point de référence le plus proche. Si les points de référence forment des contours d'objets, ceci revient à définir une carte de distance au contour pour les points des objets.

00000000000000000
00001111111111000
00001222222221100
00001233333332100
00001234444432100
00001123333321100
00001122222100000
00001111111000000

Image de distance au fond : d_4

Les boules d_4 et d_8 n'étant pas circulaires, les valeurs obtenues sont sensiblement différentes de celles associées à la distance Euclidienne d_E, d'où la présence d'une anisotropie. Il est important de remarquer que l'on construit une autre image à partir de l'image initiale et que les valeurs calculées sont des *entiers naturels.*

Jusqu'à présent, à chaque déplacement élémentaire a été associé un coût de 1, alors que certains déplacements sont vers les voisins directs et d'autres vers les voisins indirects. Nous allons pondérer ces déplacements élémentaires, ce qui nous amène à introduire la *distance de chanfrein.*

Distance de chanfrein :

Le principe des distances de chanfrein, notées d_c, est de pondérer par des valeurs entières les déplacements dans un voisinage donné, puis de fixer la distance entre tout couple de points, au coût du chemin minimal les rejoignant. L'ensemble des pondérations affectées aux déplacements autorisés est appelé le masque noté mp :

$$mp = \begin{matrix} b & a & b \\ a & 0 & a \\ b & a & b \end{matrix}$$

ou a et b sont des nombres entiers. On peut étendre ce masque à des voisinages plus larges 5x5 ou 7x7 etc... Notons que le type de distance utilisée génère des boules avec des contours biseautés entre les directions de pondération (*Fig. 1.3).* Il est important de garder en mémoire que le taux d'erreur relativement à la distance euclidienne varie de 41% pour d_4 à 2% pour $d_{5,7,11}$ (Thiel 1994). En pondérant des masques de plus grande taille, il est possible d'approximer plus finement encore la distance Euclidienne.

Figure 1.3 : Boules générées à partir de 5 distances de chanfrein différentes**.**

1.4 Axe médian et squelette :

L'axe médian est un concept faisant intervenir le recouvrement d'une forme par des boules, de manière à accéder à une représentation minimale de l'image. Cette notion est indispensable au calcul de la ligne médiane et du squelette pondéré. Nous utilisons ces concepts dans la suite de ce travail à la fois pour obtenir une paramétrisation des grains de neige, mais également dans le modèle d'évolution géométrique du névé.

La description des formes nécessite des méthodes pour extraire les caractéristiques importantes des objets présents dans une image. Un objet binaire est un ensemble de points qui pris séparément, ne donnent par d'information pertinente. Une représentation fréquemment utilisée est le contour de l'objet. Une alternative intéressante consiste à rechercher un "axe de symétrie généralisé" dans la forme. Cette approche "région" induit un squelette pondéré par l'intermédiaire de l'axe médian en conservant la totalité de l'information et permet de retrouver la forme.

Axe médian :

L'axe médian, noté AM, est le lieu des centres des boules maximales dans la forme (*Fig. 1.4*). Une boule est dite maximale dans la forme si elle n'est incluse dans aucune autre. Les principales propriétés de l'axe médian sont :

- la non minimalité,
- toute image de points porteurs d'une information de distance au fond est réversible et définit un objet grâce à la transformation inverse,
- la déconnexion,
- l'épaisseur.

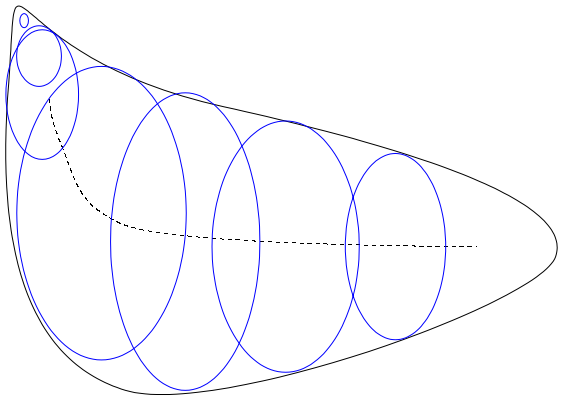


Figure 1.4 : L'axe médian est l'union des centres des boules maximales.

Convexité analogique :

Soit E une composante connexe de l'espace continu, E est convexe si et seulement si :
$\forall x,y \in E, [x,y]=\{\lambda x+(1-\lambda)y, \lambda\in[0,1] \}$ est dans E.

L'enveloppe convexe d'une forme E est l'intersection des formes convexes contenant E. On peut également définir une convexité dans le domaine discret sans être contraint de passer par une approximation analogique.

Convexité discrète **:**

Définition (Chassery 1991) : une composante connexe S est ε convexe avec ε réel élément de [h/2,h[(h est le pas de discrétisation) si :

- pour tout couple de points X et Y de S,
- pour tout réel a appartenant à l'intervalle 0,1.

Il existe un point discret R de la composante S tel que le point réel (aX+(1-a)Y) du segment de droite réel XY appartient à la boule fermée $B_\infty(R,\varepsilon)$.

Squelette pondéré :

Nous donnons ici une définition simple et intuitive, il s'agit d'une représentation filiforme d'un objet, qui est centré sur cet objet et qui est représentative de la forme de l'objet dont il est extrait. Au concept de squelette peut être associé une liste plus complète des propriétés souhaitées pour cette représentation :

- il est inclus et centré dans l'objet,
- il est mince,
- il comporte le même nombre de composantes connexes et de trous que l'objet, il est homotope,
- il a la même allure que l'objet,
- il assure la reconstruction initiale de l'objet.

Notons que le calcul du squelette est quasiment impossible dans l'espace continu. Le squelette pondéré est une bonne représentation de forme binaire et est un outil puissant pour la décomposition de formes, ce qui va nous servir pour comprendre l'évolution des grains de neige dans la suite de ce travail.

La méthode d'extraction du squelette est décrite dans la thèse de E. Thiel (1994), il est juste important de remarquer qu'il existe une méthode de simplification du squelette dite "méthode d'ébarbulage". Ceci consiste à supprimer les branches périphériques (i.e. les branches délimitées par un point terminal), celles correspondant à des renflements non significatifs pour une application donnée. Cela peut être du bruit du contour ou des artefacts de calcul.

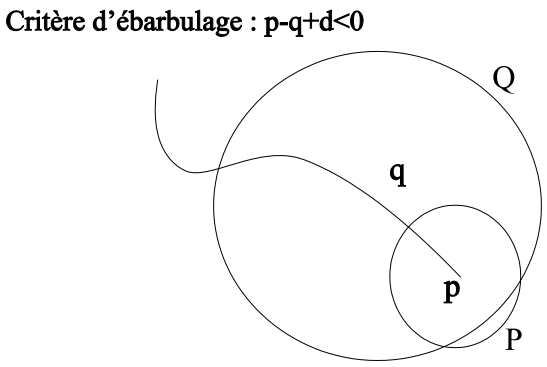


Figure 1.5 : Critère d'ébarbulage.

Etant donné une branche terminale du squelette sur laquelle sont positionnés deux points p et q avec q situé à proximité de l'extrémité de la branche. Soit P et Q leurs disques associés, la branche peut être élaguée

de p à q lorsque Q recouvre largement P. Le degré de recouvrement entre P et Q peut se traduire par (p-q+d(p,q)) ou d est la distance discrète utilisée pour construire la carte de distance (*Fig. 1.5)*. L e choix du seuil introduit une description hiérarchique des régions, par analogie avec les squelettes semi-continus.

Nous avons dans cette première partie présenté les outils de l'analyse d'images qui vont nous permettre de faire une analyse quantitative des objets étudiés dans nos images. Afin de décrire des notions topographiques d'inter relation de structures entre elles, il importe d'introduire en complément des outils qui vont nous servir à étudier les microstructures de névé poreux. Ces outils sont fondés sur la notion de pavage de Voronoi.

2 Définitions de base pour l'analyse topographique des microstructures et paramètres associés

2.1 Représentation par pavage de Voronoi :

Soit S= {P1, P2, ..., Pn} un ensemble de n points du plan analogique ². Ces points sont aussi appelés sites ou germes. On désire générer une partition du plan pour laquelle chaque élément est le sous-ensemble des points du plan qui sont plus proches d'un point de S que de tous les autres points S. Dans le cas de la métrique euclidienne, les éléments que l'on obtient sont alors des polygones construits à partir des médiatrices des segments de droite qui joignent certains couples de points de S (*Fig. 1.6*).

Définition : *polygone de Voronoi*

Pour chaque point P de S, la région polygonale composée des points plus proches d'un germe que de tous les autres est appelée *polygone de Voronoi* et V(P). Dans le cas de la distance euclidienne, les polygones de Voronoi sont convexes.

Définition : *diagramme de Voronoi*

Le réseau formé des points équidistants à deux germes constitue le *diagramme de Voronoi* de S, il est formé de sommets (points adjacents à plus de deux sommets) et d'arêtes (portions de médiatrices).

Corollaire :

Tout sommet du diagramme de Voronoi est centre d'un cercle passant par trois germes et ne contenant aucun autre germe. La triangulation obtenue en joignant les germes associés à des polygones adjacents est appelée triangulation de Delaunay (*Fig. 1.7*).

Ces différents modes de représentation vont nous permettre de mesurer l'évolution des topographies des microstructures de névé en fonction de la densification et de les différencier en fonction des sites. Nous allons pour cela présenter les paramètres nécessaires à cette quantification.

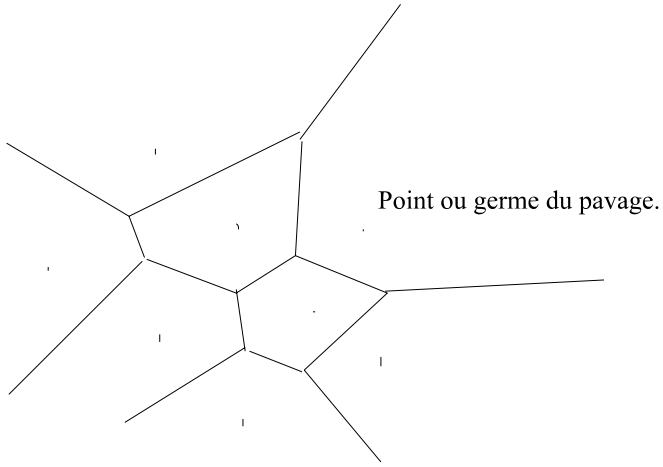


Figure 1.6 : Pavage de Voronoi.

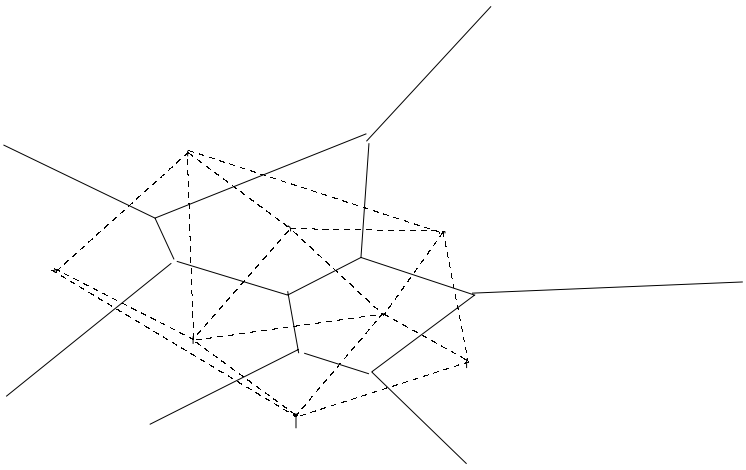


Figure 1.7 : Triangulation de Delaunay.

2.2 Mesure de la topographie globale :

Pour mesurer la topographie, on utilise la relation qui lie l'ordre à la forme. L'ensemble des polygones de Voronoi représentant une population est considéré comme un ensemble de formes caractéristiques de la population. La forme géométrique moyenne de ces polygones, leur hétérogénéité de taille et de forme sont les trois axes définissant l'espace ou les topographies sont représentées (Marcelpoil 1993).

Sans approfondir les problèmes de définition du plus proche voisin au sens des graphes, rappelons que le diagramme de Voronoi et la triangulation de Delaunay, duaux l'un de l'autre reposent sur la définition la plus informative du voisinage. Notons également que ce diagramme étant strictement déterminé à un niveau local, l'ajout d'un nouveau germe au sein du diagramme, tout comme la suppression d'un germe existant peuvent être réalisées sans modifier l'ensemble du diagramme (Ber 1994).

Cette propriété fait du diagramme de Voronoi un outil très performant pour la modélisation dynamique de l'organisation spatiale des populations de cristaux de glace. La quantification globale de l'ordre ou du désordre intègre la notion de forme et est basée sur le pavage de Voronoi. La détermination de l'ordre et du désordre passe par mesure des hétérogénéités de ces formes.

2.3 Ordre et désordre, définition des paramètres :

Trois paramètres vont permettre la mesure de la topographie, en mesurant la forme moyenne, le désordre géométrique et le désordre surfacique des formes élémentaires du pavage de l'espace de Voronoi. Soient X un ensemble convexe, A(X) son aire et L(X) son périmètre, on peut montrer que l'on a toujours l'inégalité iso-périmètrique suivante :

$$L(X)^2 - 4\pi A(X) \geq 0 \tag{3-4}$$

Les polygones de Voronoi étant strictement convexes, on peut caractériser la forme moyenne d'occupation de l'espace de la population par son facteur de forme moyen RF_{av} :

$$RF_{av} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{4\pi A(X_i)}{L(X_i)^2} \tag{3-5}$$

Chaque polygone V_i est caractérisé par son aire $A(X_i)$ et son facteur de forme RF_{av}. Le désordre intrinsèque de la population des polygones a été décomposé selon deux composantes principales, le désordre concernant les hétérogénéités de surfaces, et celui concernant les propriétés géométriques. Deux paramètres les quantifient, définis respectivement par AD (désordre de surface) et RFH (homogénéité du facteur de forme) (Marcelpoil 1993).

Ces deux paramètres sont tous deux bornés sur l'intervalle [0,1] et donnés par les formules :

$$AD = 1 - \left(1 + \frac{\sigma_a}{A_{av}}\right)^{-1} \tag{3-6}$$

$$RFH = \left(1 + \frac{\sigma_{RF}}{RF_{av}}\right)^{-1} \tag{3-7}$$

ou σ_a représente l'écart type sur la surface des polygones, σ_{RF} l'écart type sur le facteur de forme, A_{av} la surface moyenne, RF_{av} le facteur de forme moyen. Les écarts types étant définis par :

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - m)} \qquad (3\text{-}7\text{bis})$$

m étant la moyenne.

Ces trois paramètres sont définis sur l'intervalle [0,1] ce qui permet de représenter facilement leurs valeurs pour une population donnée. La topographie d'une population peut ainsi être représentée par la position d'un point dans le repère orthonormé défini par RF_{av}, RFH et AD.

3 Définitions et choix des paramètres stéréologiques :

Les paramètres que nous allons décrire dans ce paragraphe seront utilisés dans la suite de cette étude, soit pour la description quantitative du névé, soit pour l'étude morphologique des grains de neige.

3.1 Notations :

Les définitions utilisées dans ce chapitre et dans l'ensemble de cette étude correspondent à l'ancienne nomenclature préconisée par l'I.S.S. (International Stereology Society) et utilisée dans les livres de E.E. Underwood (1970), et R.T. De Hoff et F.N. Rhines (1972).

Les paramètres représentant des grandeurs géométriques ou topologiques caractérisant la structure sont représentés par des symboles primitifs, que l'on notera d'une manière générale **$S_I(X,\alpha)$,** avec **:**

S_I(ensemble analysé, [orientation])

Par exemple, A(X) correspond à la mesure d'une surface plane de l'ensemble X. L'orientation est facultative ; elle ne sera utilisée que lorsque le paramètre aura un caractère anisotrope.

Le terme en indice inférieur (également facultatif) représente lorsqu'il est entier positif ou nul, un paramètre à caractère global et la valeur de I indique l'espace considéré : 1 pour R^1 ... Si I est une lettre capitale, cela signifie que le paramètre S est connu de manière locale, et caractérise l'espace de référence :

L pour un espace de mesure à une dimension (réseau de ligne)

A pour un espace de mesure à deux dimensions (une surface issue d'une section)

V pour un espace de mesure à trois dimensions (un volume),

exemple : $A_A(X)$ est la fraction surfacique de X dans R^2**.**

X sera utilisé pour définir la phase considérée (G pour la glace ou P pour les pores), les objets (g pour les grains ou p pour les pores) ou les interfaces (g-p entre les grains et les pores et g-g entre les grains).

Exemple : $A_A(G)$ représente l'aire occupée par la phase glace par unité d'aire dans une section de névé ou de glace comprenant des bulles.

3.2 Paramètres stéréologiques locaux :

Une image est composée d'un ensemble d'objets plus ou moins dispersées. On peut effectuer un grand nombre de mesures pour décrire quantitativement cet ensemble, mais toutes ne sont pas bonnes du point de vue mathématique. H. Hadwiger (1951) a résolu ce problème et a énoncé les quatre critères auxquels doivent obéir ces paramètres :

- invariance par translation ou rotation,
- homogénéité,
- additivité,
- continuité.

Hadwiger a dressé la liste des paramètres globaux répondant à ces critères. Le *tableau 1* les résume dans le cas de l'analyse locale.

R^3	$V_v=N_p$	$S_v=4N_L$	$Mv=2\pi N_A$	N_V
R^2	$A_A=N_p$	$L_A=\pi N_L$	N_A	
R^1	$L_L=N_p$	N_L		
R^0	N_p			

Tableau I : Relation entre les différents paramètres et le nombre de connexité.

Pour chaque espace, nous avons un paramètre qui correspond à un dénombrement : le nombre de connexité noté N. La construction d'Euler-Poincaré permet à partir d'une construction unique établie par H. Poincaré de relier $N_n(X)$ dans R^n à $N_{n-1}(X)$ dans l'espace R^{n-1} ou N est le nombre de connexité de l'ensemble dans l'espace considéré.

A partir de ces paramètres de base, on peut créer un certain nombre de paramètres secondaires. Nous avons la corde moyenne intersectée, la surface moyenne, et la courbure moyenne par unité de volume notées respectivement :

$$\overline{L_1} = \frac{\overline{L_L}}{\overline{N_L}} \qquad \overline{A}=\frac{\overline{A_A}}{\overline{N_{i_A}}} \qquad et \qquad \overline{H}=\frac{\overline{M_V}}{\overline{S_V}} \tag{3-8}$$

Le nombre de joints triples dans R^3 est déterminé à partir du nombre de points triples par unité de surface dans R^2 par la relation :

$$\overline{L_V} = 2\overline{N_A}\ (T) \tag{3-9}$$

Un paramètre caractéristique de l'état de dispersion des grains est appelé continuité et est noté C(X/X).

J. Gurland (1958) a défini la contiguïté par l'expression :

$$C(X/X) = \frac{2\ S_V\ (X/X)}{2\ S_V\ (X/X) + S_V\ (X/Y)} \tag{3-10}$$

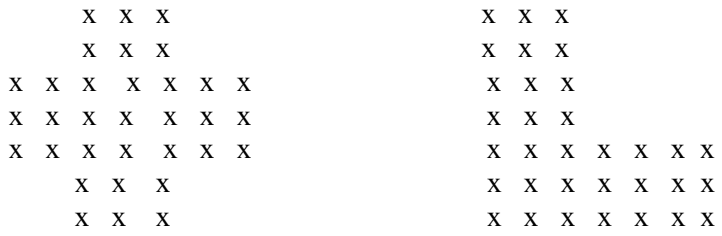
ou $S_V(X/X)$ représente la surface par unité de volume de joints de type X/X, grains-grains par exemple, et $S_V(X/Y)$ celle de type (X/Y), grains-pores.

$$S_V = 4\ N_L \tag{3-11}$$

3.3 Paramètres relatifs à la forme :

Aire :

Le calcul de l'aire se rapporte au calcul du nombre de pixels composant l'objet. C'est un paramètre non discriminant, deux objets différents peuvent avoir la même aire et des formes différentes. Elle est notée $A(X_i)$.



Exemple de deux objets différents de même surface et de forme différente.

Périmètre :

Une composante connexe est définie par une suite continue de pixel, le périmètre est évalué en comptant le nombre de pixels frontière de cette composante connexe. Si deux pixels consécutifs sont des voisins indirects la contribution au périmètre est affectée du coefficient racine de deux.

Facteur de forme :

Il est intéressant de définir des paramètres indépendants de la taille des objets et sans dimension comme par exemple : $P^2 / 4\pi S$ ou $P^2 / 16 S$. Le premier est égal à un pour un cercle et le second paramètre est égal à un pour un carré. Les objets précédemment décrits ont la même aire et le même périmètre donc le même facteur de forme.

Indices relatifs aux objets convexes :

Plusieurs relations ont été étudiées par les mathématiciens (Santalo 1976) qui décrivent d'une manière exhaustive les différentes propriétés des ensembles convexes. On peut rappeler quelques relations propres à ces ensembles. Le périmètre d'un ensemble convexe X est relié à sa variation diamétrale par la relation :

$$L_2(X) = \int_0^{\pi} D_2(X,\alpha)d\alpha \tag{3-12}$$

ou $D_2(X, \alpha)$ représente la projection linéaire totale de l'ensemble X dans la direction α pour l'espace R^2.

L'épaisseur d'un ensemble convexe est alors définie par :

$$D_e(X) = inf_{\forall\alpha}\ D_2(X,\alpha) \tag{3-13}$$

et son diamètre par :

$$D_s(X) = sup_{\forall\alpha}\ D_2(X,\alpha) \tag{3-14}$$

Dans le cas du cercle nous avons $D_e(X)=D_s(X)$. La principale inégalité concernant les ensembles convexes est donnée dans le livre de L.A. Santalo (Santalo 1976). Soient X un ensemble convexe, A(X) sa surface et $L_2(X)$ son périmètre, si on reprend la relation (3-4) que l'on écrit sous la forme :

$$(L_2(X))^2 - 4\pi A(X) \geq 0 \tag{3-15}$$

Le premier terme de l'inégalité est appelé déficit isopérimètrique. D'autres inégalités [Bon20] sont établies à partir des cercles inscrits et circonscrits ρi et ρe. On remarquera que cette inégalité fait intervenir le périmètre qui ne possède pas de bonnes qualités de continuité. On peut à partir de ces égalités définir des indices sans dimension.

Le rapport De(X)/Ds(X) donne des indications sur l'allongement de l'objet convexe. On définira l'indice d'allongement par :

$$IA_d(X) = D_e(X)/D_s(X) \tag{3-16}$$

Cet indice varie de 0 à 1 en allant du segment de droite au cercle. Un second indice est celui relatif au déficit isopérimétrique :

$$IP(X) = 1 - \frac{4\pi A(X)}{L_2(X)^2} \tag{3-17}$$

Cet indice varie de 1 à 0 en allant du segment de droite au cercle. On définit un autre paramètre Idf appelé degré fractal :

$$IDf = \frac{L_2(X)}{A(X)} \tag{3-18}$$

La valeur de Idf est d'autant plus proche de 1 que la forme de l'objet est fractale.

Objets concaves, degré de concavité :

De même que nous avons défini des paramètres de mesures des objets convexes, il convient de définir des paramètres des objets concaves ; soit A(X) la surface de l'objet et $A(C_v(X))$ la surface de son enveloppe convexe on définit le degré de concavité comme étant égale à :

$$IC_a = \frac{A(X)}{A(C_v(X))} \tag{3-19}$$

Des paramètres gc et pc traduisant respectivement l'importance des grandes concavités et des petites concavités :

$$gc = \frac{1}{nc} \sum_{i=1}^{nc} S(i)^2 \tag{3-20}$$

$$pc = \frac{1}{nc} \sum_{i=1}^{nc} \frac{1}{S(i)^2} \tag{3-21}$$

Courbure discrète et énergie de courbure :

La courbure en un point est définie par C=dθ/ds ou θ est l'angle de la tangente à la courbe et s son abscisse curviligne. Dans le domaine discret, le point pour lequel on veut calculer la courbure utilise d'autres points sur la courbe de part et d'autre de sa position. On définit ainsi pour le point P_i, les points P_{i-k} et P_{i+k} et la courbure normalisée à l'ordre k notée Cn_k par

Cn_k=angle (P_{i-k} P_i , P_i P_{i+k}) / ($|P_{i-k}$ P_i | + |P_i Pi_{+k}|) (3-22)

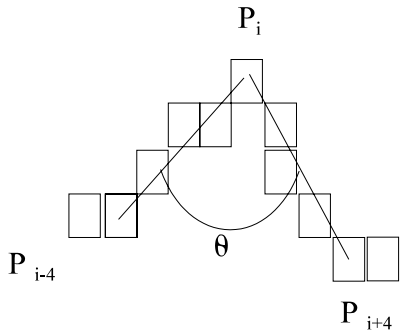


Figure 1.8 : C_k courbure à l'ordre k, pour k=4.

4 Les fonctions d'auto-covariance ou d'auto-

corrélation :

Ces fonctions vont être utilisées pour déterminer les longueurs de corrélation dans le manteau neigeux à partir des images de structure de la neige. Elles seront ensuite comparées aux valeurs des longueurs de corrélation obtenues à partir des expressions analytiques (Stogryn 1986).

4.1 Définition et propriétés de la fonction d'auto-covariance :

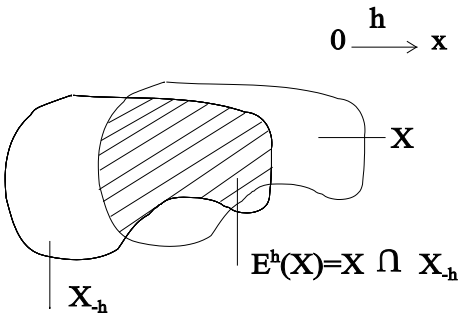


Figure 1.9 : Illustration de la fonction d'auto-covariance.

L'auto-covariance est la mesure de l'ensemble X érodé par h. Par définition elle est égale à :

$$K(X,h)=Mes.E^{h}(X)=\int h(x)\ \ h(x+h)dx \tag{3-23}$$

avec :

$$E^{h}(X)\ =\ X\cap X_{-h} \tag{3-24}$$

Elle se présente sous une version probabiliste, à l'aide de la fonction d'auto-covariance notée C(X,h). Cette fonction d'auto-covariance est la probabilité pour qu'un point x et un point x+h appartiennent à X, soit en notation ensembliste :

$$C(X,h)\ =\ P\{x\in X\ ,\ x+h\in X\} \tag{3-25}$$

Le passage à l'analyse locale comme c'est le cas en traitement d'image, suppose que X est un ensemble aléatoire stationnaire.

Cette fonction d'auto-covariance ou d'auto-corrélation peut s'appliquer sur des images binaires bidimensionnelles. Nous allons définir son expression dans le domaine discret.

4.2 Définition de la fonction d'auto-corrélation :

Le calcul de la fonction d'auto-corrélation peut être fait à partir d'une image de référence de taille (N_x x N_y) soit 256 x 256 pixels, sélectionnée dans l'image totale de taille 512 x 512 pixels. Le calcul de la fonction d'auto-corrélation est réalisé à partir de cette image de référence, déplacée dans l'image entière, dans deux directions, horizontale (x) et verticale (y). La définition normalisée de la fonction d'auto-corrélation (Vallese et Kong 1981) utilisée est :

$$C_n(x,y)=\sum_{j=1}^{N_x}\sum_{i=1}^{N_y}\frac{[R(i,j)-\prec R\succ][T(i+x,j+y)-\prec T\succ]}{N_xN_y\sigma_g\sigma_r} \tag{3-26}$$

R est l'image de référence, T est l'image translatée. Les moyennes et variances correspondantes sont recalculées à chaque translation et ont pour expression :

$$<R>=\sum_{j=1}^{N_x}\sum_{i=1}^{N_y}\frac{R(i,j)}{N_xN_y} \tag{3-27}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N_xN_y}\sum_{j=1}^{N_x}\sum_{i=1}^{N_y}[R(i,j)-\prec R\succ]^2 \tag{3-28}$$

5 Incertitudes en analyse d'images :

Il est important de connaître l'origine et de quantifier les incertitudes que nous commettons sur les mesures des paramètres des images. Les incertitudes ont plusieurs causes :

- les causes liées à la préparation de l'échantillon,
- les causes liées aux imperfections du système de mesures,
- les causes statistiques liées à l'interprétation des mesures souvent insuffisantes.

5.1 Biais introduits lors de la préparation du matériau :

Nous avons effectué quatre zooms (*Fig. 1.10, 1.11,1.12,1.13*) des différents types d'images analysés au cours de cette étude pour montrer les biais introduits lors de la préparation des échantillons.

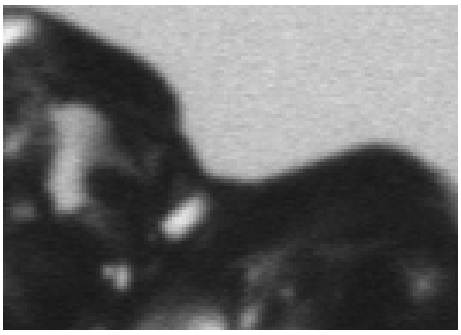


Figure 1.10 : Zoom d'une image de grain de neige.

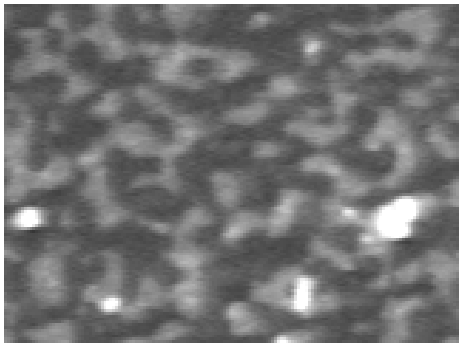


Figure 1.11 : Zoom d'une image de structure de la neige.

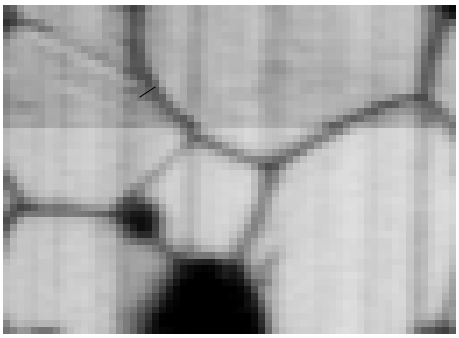


Figure 1.12 : Zoom d'une image de structure de névé (site Bh7, profondeur 45 mètres).

Figure 1.13 : Zoom d'une image de cristaux de glace (Dôme C, profondeur : 229 mètres).

Les grains de neige (*Fig. 1.10*) sont plongés lors du prélèvement dans l'isooctane et ne subissent pas de préparation. Il n'y a donc pas de biais introduit lors de la préparation.

Les échantillons de structure de la neige subissent une préparation par imprégnation avec du diéthyl phtalate. L'imprégnation ne permet pas au liquide de remplir les porosités fermées et des artefacts sont ainsi créés (zone blanche sur la *figure 1.11*). Le champ de mesure étant suffisamment grand, on choisira une zone restreinte de l'image n'ayant pas ces défauts.

On voit sur la *figure 1.12* une image de névé poreux ou le procédé de sublimation permettant de visualiser les joints des cristaux de glace élargit la phase poreuse. Les joints des cristaux de largeur de

deux pixels apparaissent grâce à ce procédé, mais la phase poreuse est aussi modifiée.

Dans la suite de ce travail, je corrige ce biais par une érosion de la phase poreuse équivalente à la largeur des joints des cristaux.

Sur la *figure 1.13* d'une lame mince de glace on voit des zones de mélange de couleur à proximité des joints des cristaux de glace. Ces zones sont créées lors de la préparation de la lame mince. La difficulté provient du fait que si la lame est trop amincie, on ne voit plus les couleurs et si on n'amincit pas suffisamment la lame on a des zone de recouvrement des couleurs aux joints des grains. Nous verrons au chapitre VI, comment l'algorithme de segmentation permet de déterminer les joints de grains malgré ces zones de mélange de couleurs.

On montre sur la *figure 1.14* les trois images en lumière polarisée, obtenues par rotation des filtres analyseur et polariseur de 20°. On constate qu'il est bien nécessaire d'avoir trois images pour pouvoir différencier chaque cristal de glace. La quatrième image représente l'image des grains avec la microstructure en surimpression (en bleue) après l'étape de segmentation.

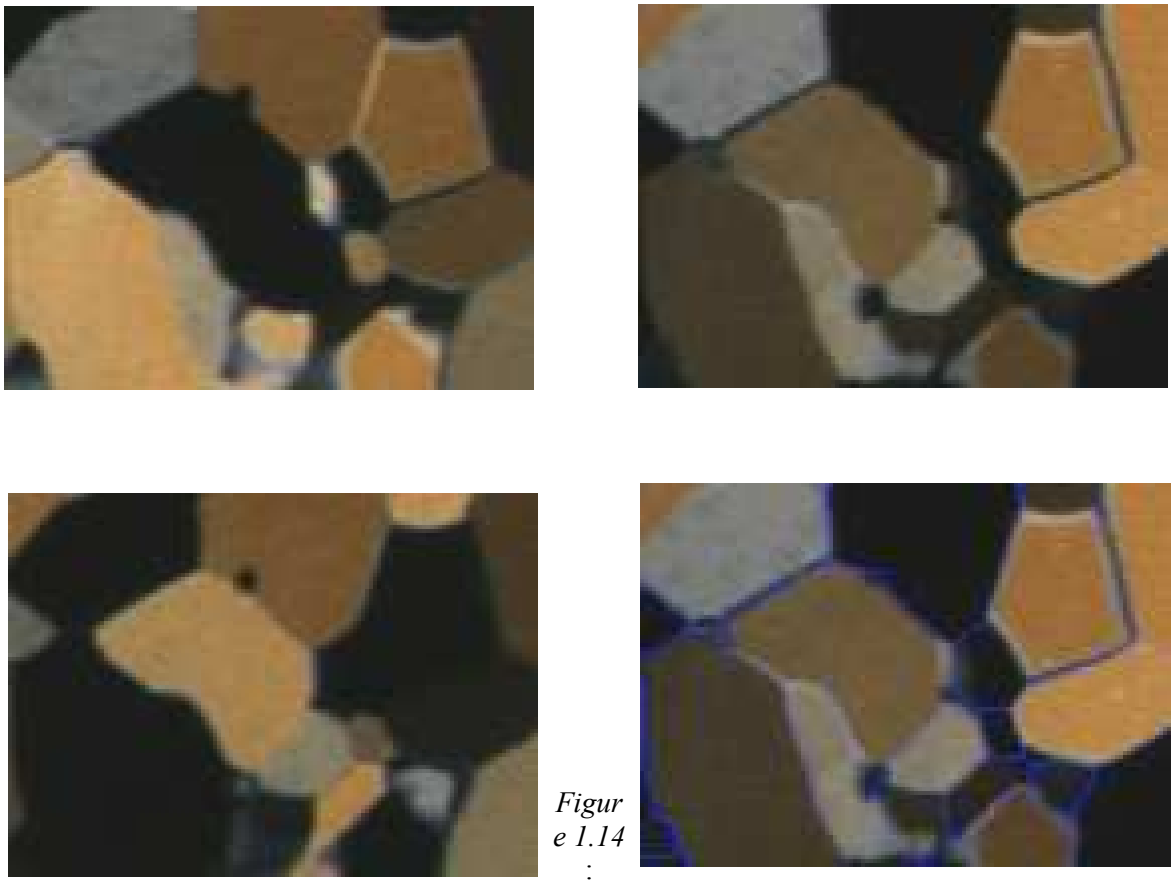


Figure 1.14 : Zoom de trois images en lumière polarisée de cristaux de glace obtenus après rotation des filtres analyseur et polariseur. La 4° image représente les cristaux avec en surimpression bleue la microstructure obtenue après l'étape de segmentation (Dôme C, profondeur 229 mètres).

5-2 Biais introduit par le système de mesure :

Le traitement d'images introduit deux biais :
- le premier est relatif à la résolution spatiale,
- le second est relatif au contraste de l'image.

Biais relatif à la résolution spatiale :

Grain de neige

Nous avons quantifié ce biais par une mesure simple d'une bille d'acier numérisée à différents grossissements et dont le diamètre mesuré au palmer est de 2.995 mm connu à +- 5 micromètres. Nous avons volontairement omis de traiter d'autres formes géométriques que le cercle, considérant que l'incertitude liée à la forme est bien inférieure aux autres incertitudes. Les paramètres considérés sont la surface, et le périmètre.
Les valeurs calculées de ces paramètres à partir de la mesure du diamètre au palmer sont :
- périmètre = 9.409 mm, +- 15 µm,
- surface = 7.045 mm², +- 25 µm.

Le *tableau II* résume les valeurs de ces deux paramètres déterminés par traitement d'images (T.I.). La valeur du seuil de segmentation (s=137) est constante pour l'ensemble des mesures.

Surface calculée par T.I. (pixel)	817	2661	5303.5	13192	32970
Surface convertie en mm².	6.484	6.719	6.716	6.722	6.926
Incertitude sur la surface (%)	8.6	4.8	4.8	4.8	1.7
Périmètre calculé par T.I. (pixel)	106.9	195.23	273.17	439.20	686.72
Périmètre calculé par T.I. (mm).	9.523	9.810	9.721	9.909	9.952
Incertitude sur le périmètre (%).	1.2	4.2	3.3	5.3	5.7

Tableau II : Paramètres d'une bille déterminés par traitement d'images.

Le *tableau II* montre que l'incertitude sur la valeur de la surface varie de 8.6% à 1.7%. Pour les cinq valeurs de pixels représentant l'objet (1ère ligne), cette incertitude diminue lorsque le nombre de pixels représentant l'objet augmente. Le grossissement a une incidence importante sur l'incertitude de la mesure.

Nous effectuerons si possible les mesures de la taille des grains à grossissement constant. Il sera nécessaire par la suite de choisir un compromis entre le nombre de grains à analyser par image et le nombre de pixels représentant chaque grain.

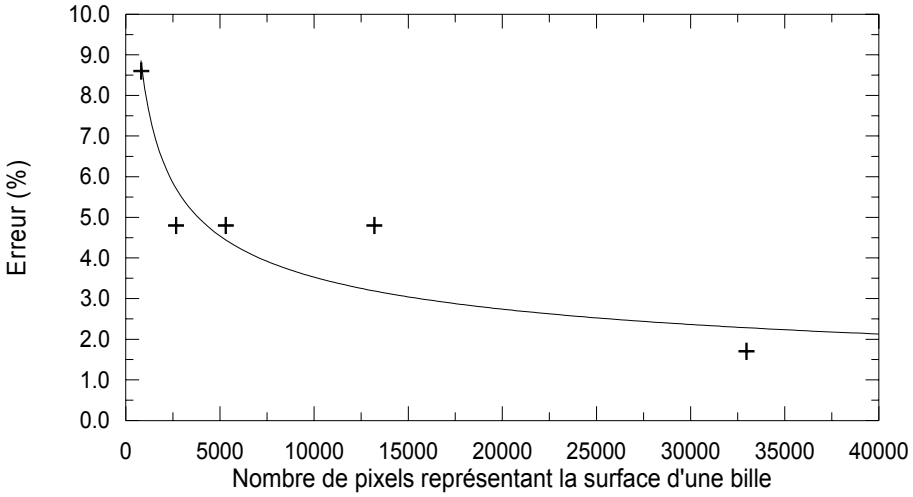


Figure 1.15 : Evolution de l'incertitude de mesure en fonction du nombre de pixels représentant l'objet.

La *figure 1.15* montre qu'à partir de la valeur de 3000 pixels pour la mesure de la surface d'un objet, l'incertitude de mesure est de l'ordre de 5%. La valeur de 3000 pixels sera utilisée comme valeur de référence, tous les grains de neige dont la surface sera inférieure à cette valeur ne seront pas pris en compte pour l'analyse.

Biais relatif au contraste de l'image :

Grain de neige :

Le deuxième biais a prendre en compte est l'influence du seuil de segmentation. De la même façon que précédemment, nous avons numérisé une bille d'acier (*Fig. 1.16*) et nous avons ensuite appliqué plusieurs seuils de segmentation.

Le diamètre de la bille est de 2.999 mm (mesuré au palmer). Les valeurs calculées de sa surface et de son périmètre sont respectivement de 7.068 mm², et de 9.421 mm. Le choix du seuil conduira à d'autant moins d'incertitude que le contraste de l'image sera élevé. Nous avons deux grandes classes d'histogrammes de distributions de niveaux de gris, les distributions bi-modales et les distributions unimodales. Nous avons regardé l'influence du seuil sur les paramètres dans le cas de la bille d'acier, et d'une distribution bimodale (*Fig. 1.16*).

Les paramètres déterminés par traitement d'images sont :

- la surface de la bille (rArea),
- le périmètre (rPerimeter).

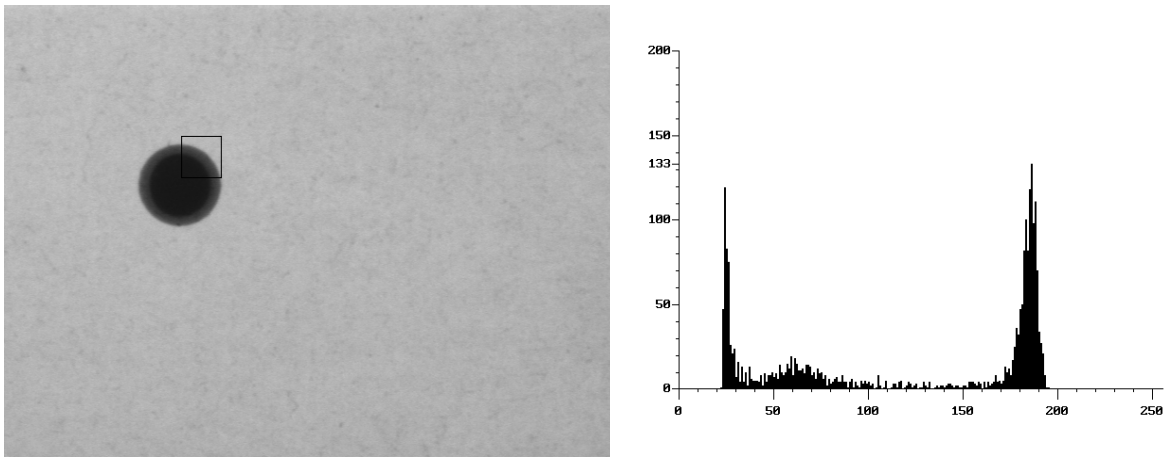


Figure 1.16 : Bille d'acier calibrée et histogramme d'une partie de l'image correspondant à la zone du carré noir.

La *figure 1.17* montre que les paramètres déterminés par traitement d'images sont très sensibles au seuil de segmentation. Il existe une valeur de seuil optimale qui permet de minimiser l'incertitude sur la mesure de la surface. On peut remarquer également que pour un seuil variant de 90 à 140, l'incertitude de mesure est inférieure ou égale à 5%.

L'incertitude sur la détermination du périmètre est par contre croissante avec la valeur du seuil. Nous n'avons pas la possibilité d'optimiser la valeur du seuil pour minimiser l'incertitude.

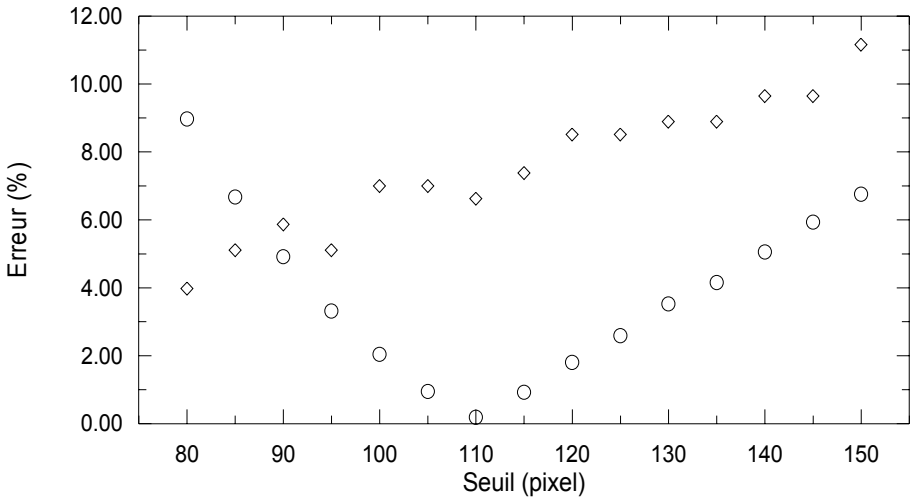
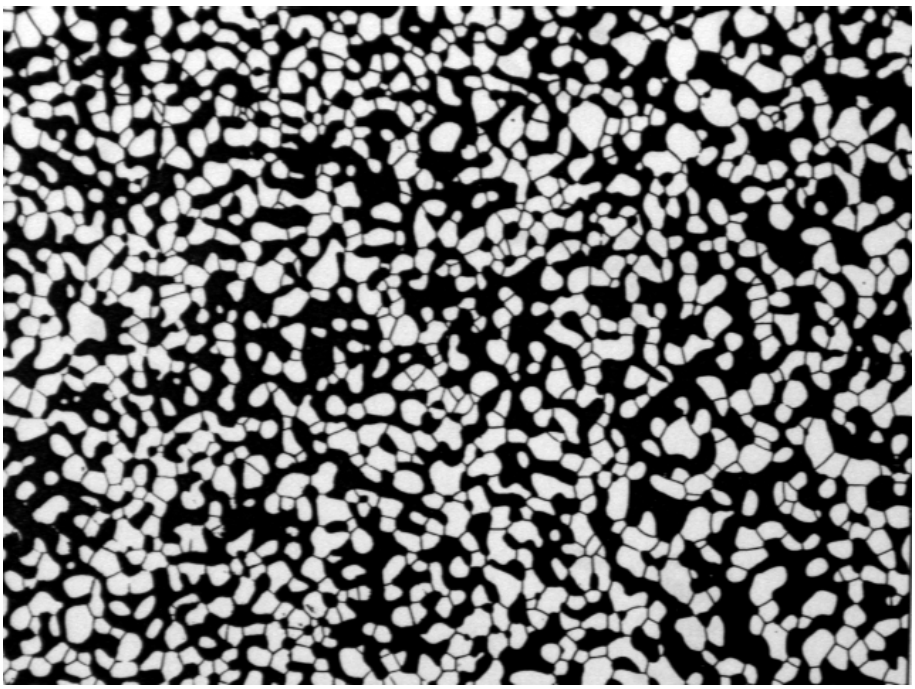


Figure 1.17 : Evolution de l'incertitude de mesure en fonction du seuil.
♢ périmètre
❍ surface.

Névé :

Nous avons étudié l'influence du seuil de segmentation sur l'évolution d'un paramètre, la porosité et nous avons déterminé un moyen pratique d'optimiser la valeur de ce seuil. Les valeurs et les comparaisons suivantes ont été établies à partir de données déterminées par un autre auteur (Fuchs 1959). Alfred Fuchs a déterminé manuellement des paramètres métriques à partir de lames minces de neige du Groenland à différentes profondeurs. Il a pour cela, réalisé des documents photographiques (*Fig. 1.18*) ou apparaissent les porosités et les joints de grains de glace.



---------- 1 cm

Figure 1.18 : Structure d'une lame mince de névé du Groenland (Fuchs 1959), profondeur 8 mètres.

La porosité est le rapport du volume occupé par les pores sur le volume total. Par analyse d'image, la porosité s'obtient à partir de la fraction volumique de glace $V_v(g)$ (ou de pore $V_v(p)$). La fraction volumique de la glace représente le volume occupé par la phase glace par unité de volume de névé.

$$V_v(g)+V_v(p) = 1 \qquad (3\text{-}29)$$

Les résultats de stéréologie (Underwood 1970) montrent que ce paramètre s'obtient directement sur une section 2D par la mesure de la fraction de l'aire de la glace (ou de la phase poreuse). Ce résultat est valable si le matériau est homogène et isotrope.

La porosité est un paramètre que l'on peut également déterminer par pesée. Fuchs a effectué des mesures par pesée sur 5 échantillons de névé du Groenland. Sur la *figure 1.19* on compare les valeurs déterminées par pesée, dont l'incertitude est de 0.2% et celles déterminées par traitement d'images.

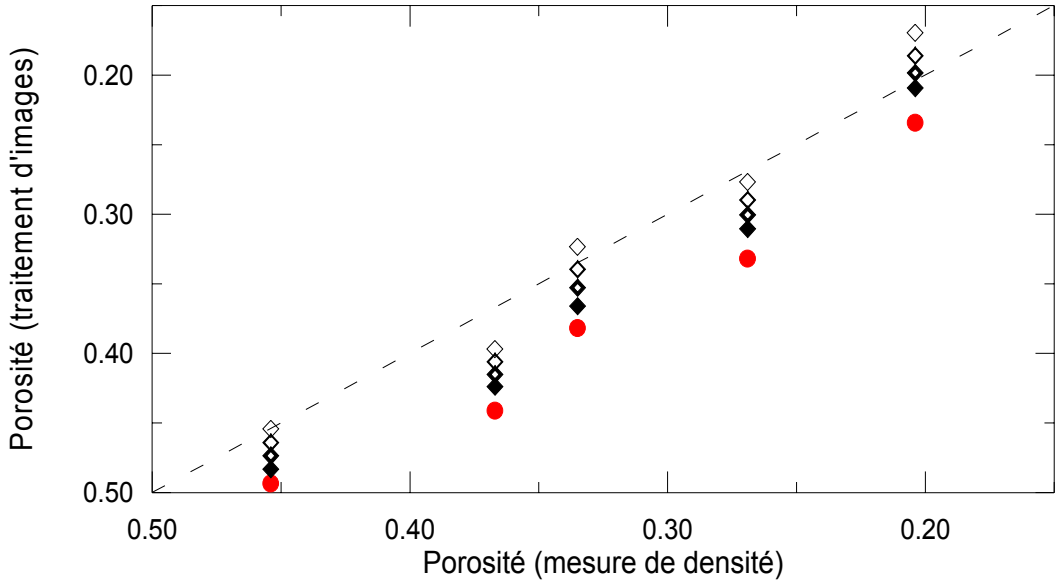


Figure 1.19 : Profils de la porosité obtenue par traitement d'images en fonction de la porosité calculée à partir des mesures de densité.
♢ seuil=70; ◇ seuil = 80; ◇ seuil = 90; ◆ seuil = 100;
● seuil déterminé par la méthode de Fisher.

La méthode de Fisher (1958) consiste à modéliser l'histogramme bimodale en niveaux de gris d'une image par une somme pondérée de distributions gaussiennes et à localiser les seuils comme les séparateurs des distributions. La *figure 1.18* montre que cette méthode ne donne pas de bons résultats dans notre cas.

Nous constatons également que le choix du seuil est déterminant pour retrouver la porosité mesurée par pesée, et que le calage de la valeur du seuil peut se faire à partir de la porosité déterminée par la mesure de la densité.

La mesure de densité par pesée étant systématiquement réalisée sur les sites en Antarctique ou sont prélevés les échantillons, nous utiliserons ces valeurs de densité pour effectuer le seuillage des images de névé.

5.3 Incertitudes statistiques, détermination du nombre d'objets nécessaire à la mesure :

Les incertitudes décrites jusqu'à maintenant sont des "incertitudes expérimentales". Il est maintenant intéressant de regarder les incertitudes dues à la statistique en considérant l'évolution des paramètres en fonction de la dimension de la fenêtre de traitement et du nombre d'objets considéré.

Névé : à partir des documents papiers numérisés, nous avons calculé, à différentes profondeurs les paramètres métriques suivants :

- la porosité,
- la surface moyenne des objets (rArea),
- le nombre moyen de grains/cm²,
- la sphéricité (Sph).

Le paramètre sphéricité défini par Fuchs est : $Sph = 3.545 \frac{\sqrt{rArea}}{rPerimeter}$

(3-30)

Il est intéressant de regarder l'influence de la fenêtre de mesure sur l'évolution de la porosité mesurée par traitement d'images. Nous avons pris pour chaque image la valeur optimisée du seuil et nous avons calculé la porosité normalisée p_{norm} en divisant la porosité calculée par traitement d'images par la valeur de la porosité déterminée à partir de la densité (Fuchs, 1959).

$$p_{norm} = \frac{p_{traitement\ d'images}}{p_{Fuchs}} \qquad (3\text{-}31)$$

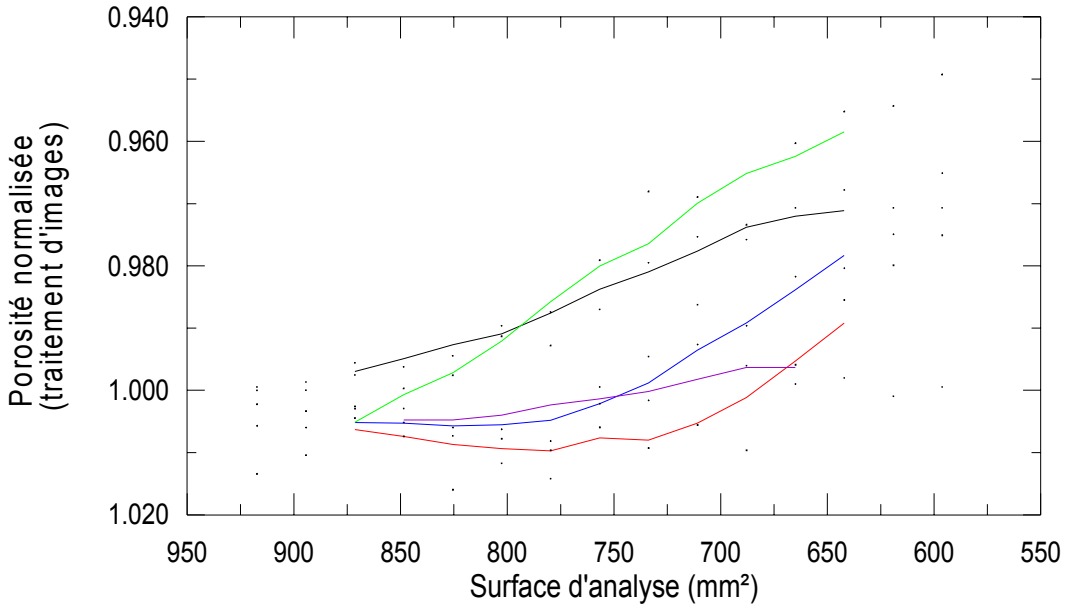
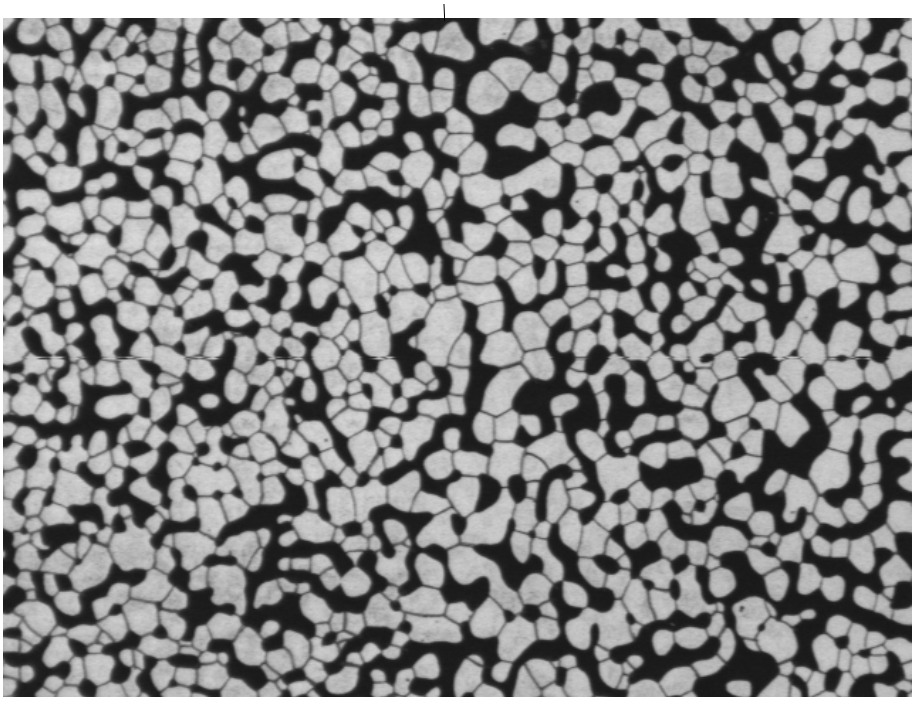


Figure 1.20 : Profils de la porosité normalisée obtenue par traitement d'images en fonction de la surface d'analyse.

On constate ——— p_{norm}=0.454; ——— p_{norm}=0.367; ——— p_{norm}=0.335; ——— p_{norm}=0.269; ——— p_{norm}=0.204 sur la *figure 1.20* que pour les valeurs de porosité $p_{norm.}$=0.454 et $p_{norm.}$=0.335 la valeur asymptotique n'est pas atteinte, ceci signifie que le champ de mesure est trop petit pour mesurer ce paramètre ou que l'échantillon n'est pas homogène. La surface analysée pour trois autres valeurs de la porosité (0.367, 0.269 et 0.204) est suffisante et peut même être réduite jusqu'à une valeur de 750 mm².

L'image de la lame mince (*figure 1.21*) nous montre une hétérogénéité de l'échantillon avec une stratification très marquée. L'image est divisée en deux parties par une ligne verticale passant par son milieu. La partie gauche comporte des fins cristaux alors que la partie droite est composée de porosités et de cristaux plus gros. Ceci explique pourquoi nous n'avons pas atteint la valeur asymptotique pour la porosité $p_{norm.}$=0.335.



---------- 1 cm

Figure 1.21 : Structure d'une lame mince de névé du Groenland (A.Fuchs 1959), profondeur 23.0 mètres.

Il est donc intéressant de trouver un indicateur de l'homogénéité de l'image ou des zones de l'image. Fuchs (1959) a montré qu'il existe deux paramètres qui rendent compte de l'homogénéité d'une image de microstructure. Ces paramètres sont le nombre de cristaux/cm² ou de grains/cm² et la valeur moyenne de la surface des grains. L'algorithme que nous avons développé, analyse au travers d'une fenêtre de comptage de 153 mm² le nombre de grains/cm². Cette fenêtre est déplacée par pas de 0.4 mm en x et y sur l'ensemble de l'image. Chaque niveau de gris de l'image résultat (*Fig. 1.22*) représente le nombre de grains/cm².

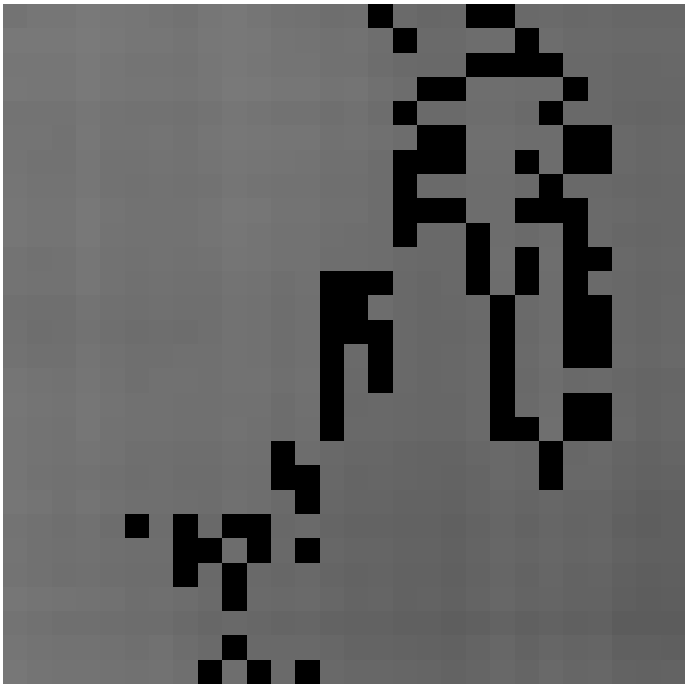


Figure 1.22 : Image résultat de l'analyse d'homogénéité de la lame mince de névé de profondeur 23 mètres. Les traits noirs représentent les lignes 107 et 108 grains/cm².

On montre sur la *figure 1.22* l'image résultat en niveaux de gris. Le premier point en haut à gauche a un niveau de gris de 115 et représente le nombre de grains/cm² (115) déterminé dans la première fenêtre d'analyse. Nous pouvons voir sur cette image une ligne noire qui distingue deux strates bien marquées. Cette ligne noire représente les niveaux de gris 107 et 108 que nous avons seuillé volontairement. La zone à gauche de la ligne noire a des niveaux de gris compris entre 107 et 122 (ou 107 à 122 grains/cm²) donc des petits cristaux. La partie à droite a des niveaux de gris compris entre 92 et 107 (ou 92 à 107 grains/cm²) donc des cristaux plus gros.

Nous retrouvons bien ce que nous avons perçu visuellement sur l'image en niveaux de gris. L'avantage d'une telle analyse est de permettre de différencier quantitativement les zones homogènes et les parties hétérogènes d'une même image. Ces zones sont détectées même lorsqu'elles ne sont pas perceptibles visuellement.

L'étude se poursuit maintenant sur la détermination du nombre de cristaux nécessaire à la mesure pour avoir une bonne représentativité statistique.

Détermination du nombre d'objets de l'image nécessaire à la mesure :

Le protocole que nous avons choisi est de calculer trois paramètres sur les cristaux de glace et de regarder l'évolution de ces paramètres en fonction du nombre d'objets utilisés pour calculer ces paramètres. Ceci revient à faire varier la dimension de la fenêtre d'analyse. Nous avons effectué ces calculs sur deux zones différentes d'une image de profondeur 8 mètres (porosité=0.454).

Une première étude permet de voir que la sphéricité est peu sensible à la variation du nombre d'objets dés lors que l'on a fixé un nombre minimum de 150 objets (*Fig. 1.23)*. La surface moyenne des grains et le nombre de grains par cm² nécessitent pour avoir une bonne représentativité un nombre d'objets supérieurs ou égaux à 400 (*Fig. 1.23)*. C'est cette valeur minimum que nous allons retenir par la suite. Il est intéressant de remarquer que nous n'avons pas la même évolution en fonction des zones analysées sur l'image**.**

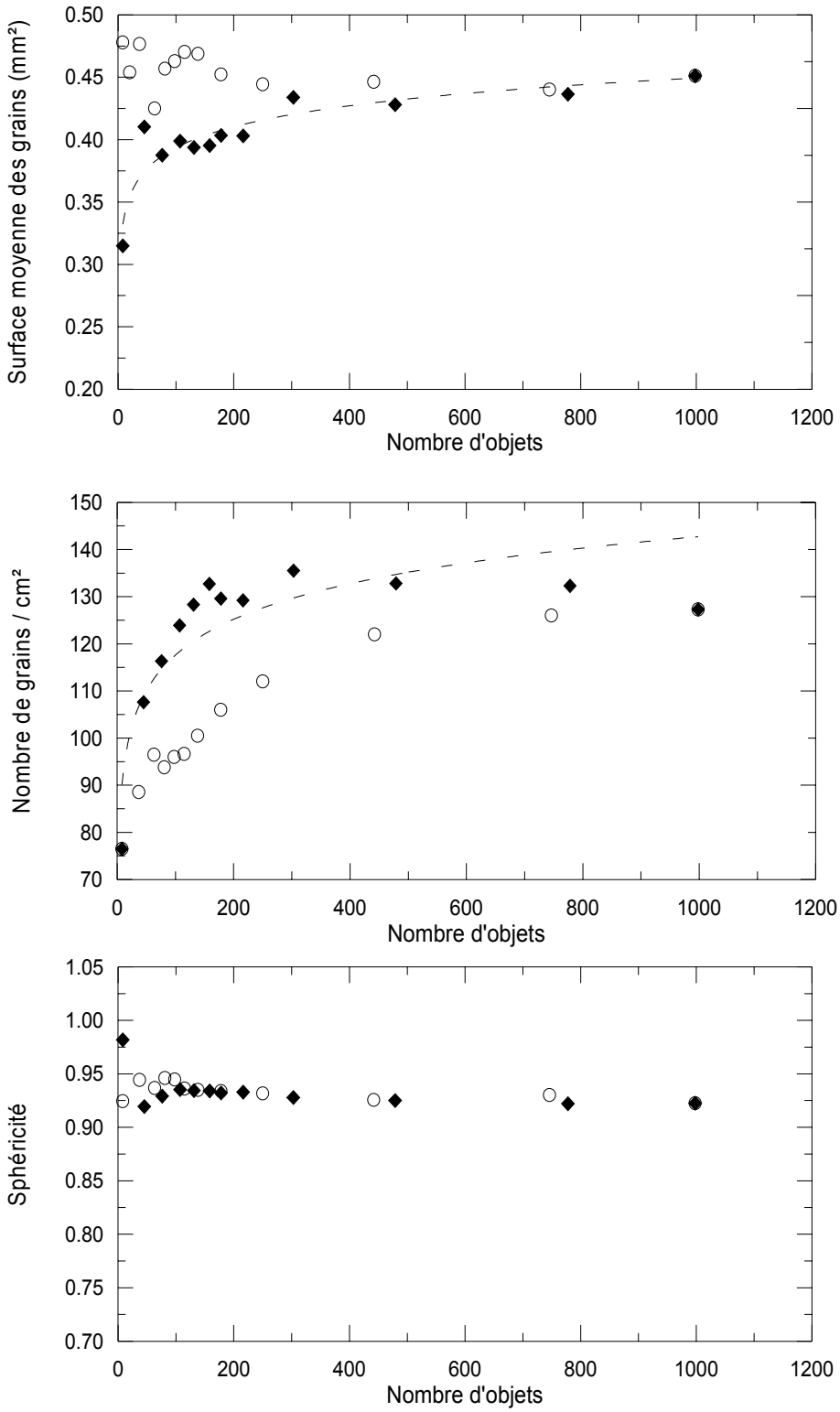


Figure 1.23 : Variations de trois paramètres en fonction du nombre d'objets déterminées d'après les images de Fuchs. Profondeur 8 mètres.

◆ zone gauche en haut de l'image; ❍ zone droite en bas de l'image.

Cette étude serait incomplète si nous limitions l'analyse à des simples valeurs des paramètres et de leurs tendances centrales. La deuxième catégorie de paramètres qui caractérisent une granulométrie sont les paramètres de dispersion. Nous avons donc étudié la représentativité *(Fig. 1.24)* des paramètres suivants en fonction du nombre d'objets :

- écart type de la surface moyenne des objets,
- écart type de la sphéricité,

On montre sur la *figure 1.24* que la dispersion des valeurs de la surface moyenne se réduit lorsque le nombre d'objets analysés est supérieur à 400. Nous étudions dans les chapitres V et VI l'évolution des distributions des aires des cristaux, il est donc nécessaire d'avoir un nombre de 400 grains pour avoir une bonne représentativité statistique.

Cette étude réalisée sur le névé est également valeur de référence pour l'étude de la glace, ce sont les mêmes cristaux que nous étudions. La zone d'échantillonnage dans le cas de la glace peut être évidemment plus restreinte puisque les pores sont remplacés par des cristaux.

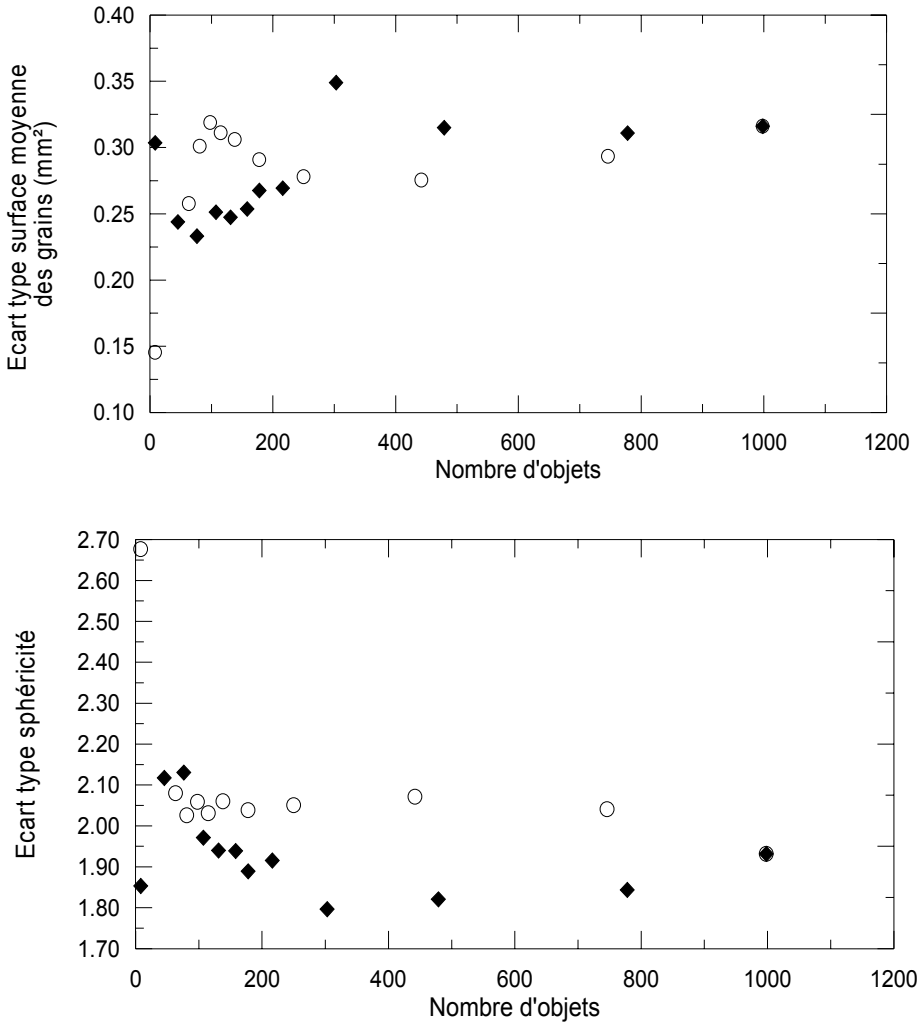


Figure 1.24 : Variation des écarts types des distributions de la surface moyenne et de la sphéricité en fonction du nombre d'objets. Image Fuchs, profondeur 8 mètres.

5.4 Conclusions :

L'étude détaillée de l'influence des biais et des incertitudes de mesure liées à la préparation de l'échantillon, aux imperfections du système de mesure et des causes statistiques liées à l'interprétation des mesures montrent les limites du traitement d'images appliqué à l'analyse de la neige, du névé et de la glace.

Les paramètres mesurés sur les grains de neige sont sensibles à la résolution spatiale. Nous considérons pour la suite que la limite ou un objet ou grain de neige n'est plus analysable est de 3000 pixels avec une incertitude de 5% sur la mesure de la surface. Le seuil de segmentation pouvant introduire des incertitudes sur les mesures, il est important d'avoir le plus grand contraste possible entre l'objet et le fond de l'image mais également un éclairage homogène de l'image.

Dans le cas du névé poreux, la mesure de la densité peut être retrouvée par la mesure de la porosité sur les images 2D. Ce paramètre sera utilisé pour seuiller les images en niveaux de gris du névé poreux. Pour des valeurs de porosité supérieures à 0.454, il est nécessaire d'avoir un champ de mesure plus grand que 875 mm² pour retrouver la valeur de la densité déterminée par pesée. Notons qu'il est quand même possible d'analyser les caractéristiques des cristaux de glace avec ces dimensions de surface à condition que le nombre d'objets analysés soit égal ou supérieur à 400.

Sur ces mêmes images, nous avons déterminé le nombre d'objets (égal ou supérieur à 400) ou de cristaux nécessaires à une bonne représentativité statistique des paramètres mesurés sur ces cristaux. Cette valeur est évidemment la même pour l'analyse de la glace. Dans la cas de glace, le réseau poreux n'existant pas, le fenêtre de mesure peut dans ce cas être réduite.

1 Intérêt :

L'objectif de cette étude est de déterminer automatiquement par traitement d'images 2D des paramètres représentatifs de la taille et de la forme des grains de neige. Le but est de disposer d'un outil de mesure objectif, c'est à dire indépendant de l'opérateur, des paramètres morphologiques des grains de neige. Ces paramètres sont essentiels pour les modèles de réflectance de la neige dans le domaine visible et dans le domaine micro-onde. Ce sont également des paramètres d'entrée du modèle physique de métamorphisme de la neige CROCUS.

Les notions de taille et de forme des grains de neige ont été définies par un groupe de travail sur la classification de la neige (Colbeck and Al. 1990). Il existe plusieurs définitions de la taille d'un grain de neige ou d'un amas de grains de neige.

La taille d'un grain de neige pris individuellement peut être définie comme la plus grande longueur observée et mesurée de ce grain posé sur une plaque graduée en millimètres. Le *tableau I* résume la terminologie correspondant aux tailles observées sur site. Une autre définition peut être le rayon (r) du disque équivalent :

$$S = \pi r^2 \tag{4-1}$$

avec S : surface du grain.

La définition utilisée par le Centre d'Etudes de la Neige est le rayon convexe moyen, (Lesaffre and Al. 1998) qui représente la moyenne des convexités du contour d'un grain de neige. Nous allons étudier comment varie ce rayon convexe moyen en fonction de la définition choisie et de la méthode de calcul utilisée.

Un autre aspect de ce chapitre est de définir un ou des paramètres représentatifs de la forme des grains de neige. On retrouve dans la classification de la neige (Colbeck and Al. 1990) un tableau permettant de différencier visuellement les grains de neige suivant leurs formes. Nous allons élaborer plusieurs paramètres et établir une correspondance entre la reconnaissance visuelle et la reconnaissance automatique par traitement d'images.

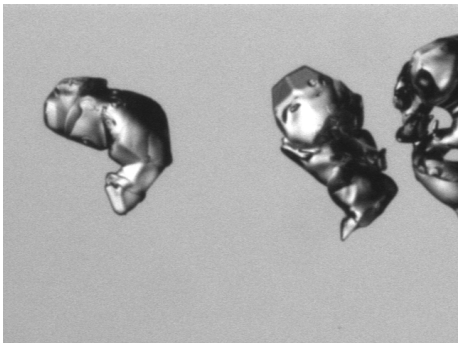
Taille (mm)	Terminologie
<0.2	Grain très fin
0.2-0.5	Grain fin
0.5-1.0	Grain moyen
1.0-2.0	Gros grain
2.0-5.0	Très gros grain
>5.0	Grain extrême

Tableau I : Terminologie des grains de neige d'après la commission internationale sur la neige et la glace (S. Colbeck and Al. 1990).

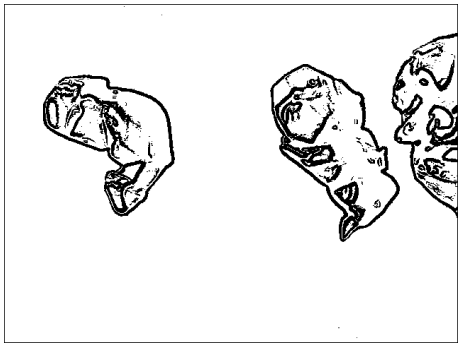
2 Segmentation des images de neige :

Nous avons présenté au *chapitre* II, les différentes techniques permettant de prendre des images ou des photographies des grains de neige. Nous allons voir comment il est possible de passer d'une image en niveaux de gris à une image binaire.

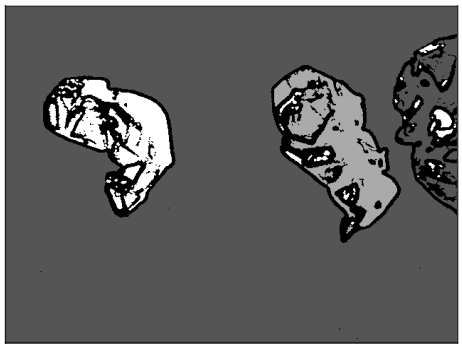
La première étape consiste à segmenter ces images. La difficulté réside dans la faible nuance de niveaux de gris que l'on peut avoir au bord des grains lorsqu'ils sont éclairés en lumière transmise (*Fig. 4.1 a*). Nous avons utilisé les approches dérivatives qui sont les plus simples et qui vont permettre de détecter le contour des grains. En effet certaines parties du contour des grains sont fortement contrastées, tandis que d'autres sont nettement moins nuancées.



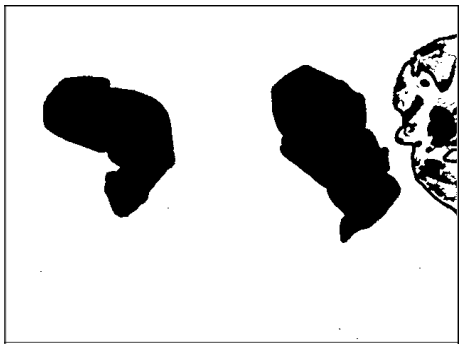
(a)



(b)



(c)



(d)

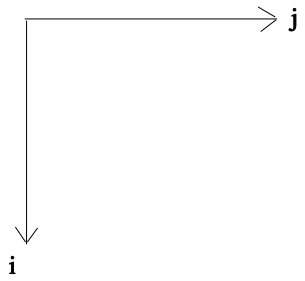
Figure 4.1 : Image de grains de neige pris en lumière transmise et les quatre étapes de segmentation.

Je rappelle ici la méthode dérivative du premier ordre en précisant les matrices que nous avons utilisées pour la segmentation.

Méthode dérivative du premier ordre :

Le principe général d'utilisation de la méthode dérivative dans le cas du gradient est basé sur :
- le calcul du gradient en chaque point de l'image,
- la création de l'image de la norme du gradient,
- l'extraction des maximums locaux (obtention de contours fins), dans la direction exacte du gradient,
- le seuillage par hystérésis de l'image des maximums locaux.

Soit A[i,j] un signal bidimensionnel discret. Dans le cas d'une image discrète, on prend l'indice i comme indice des lignes, et l'indice j comme indice des colonnes avec comme convention d'orientation des axes :



Dans le cas discret, les dérivées directionnelles suivant les directions horizontale et verticale au site [i,j] sont approchées par de simples différences finies :

$$\frac{\partial A}{\partial y} \approx \frac{\Delta A}{\Delta i} = A_i[i,j] = A[i+1,j] - A[i,j] \tag{4-2}$$

$$\frac{\partial A}{\partial x} \approx \frac{\Delta A}{\Delta j} = A_j[i,j] = A[i,j+1] - A[i,j] \tag{4-3}$$

La norme du gradient est alors donnée par :

$$|\nabla A[i,j]| = \max\ (\ |A_j[i,j]|,\ |A_i[i,j]|\ ) \tag{4-4}$$

Les dérivées directionnelles s'expriment également sous la forme :

$$A_i[i,j] = h_i * A[i,j] \tag{4-5}$$

La matrice h_i appelée aussi masque, est le noyau de convolution d'un filtre à réponse

impulsionnelle finie. Le masque de Sobel est défini par c=2. Par exemple, le filtrage suivant la direction horizontale est donnée par h_1 :

$$h_1 = \begin{matrix} 1 & 0 & -1 \\ c & 0 & -c \\ 1 & 0 & -1 \end{matrix} \qquad (4\text{-}6)$$

A partir de ce masque h_i (3x3) et avec c=2, nous avons utilisé un opérateur à huit masques correspondant chacun à une direction préférentielle et obtenue par rotation de $\pi/4$ de l'opérateur h_i. La numérotation des masques est faite dans l'ordre des directions de Freeman en 8-connexité (cf chapitre III). L'image résultat est obtenue par convolution de l'image originale A avec les masques h_i :

$$\max_i \langle |h_i * A| ; i=0,7 \rangle \qquad (4\text{-}7)$$

Ce filtre délimite les frontières des grains comme on peut le voir sur la *figure 4.1 b* et conserve l'homotopie c'est à dire les trous dans les objets ou les amas de grains. La labélisation de l'image inverse va permettre de créer un partitionnement du complémentaire des contours des grains (*Fig. 4.1 c*) et du fond de l'image. A partir de cette image (*Fig 4.1 c*) et de l'image de filtrage (*Fig. 4.1 b*), il est alors possible d'obtenir une image binarisée des grains de neige (*Fig. 4.1 d*). Notons que le grain sur le bord est coupé, il ne sera de ce fait pas pris en compte lors de l'analyse.

Cet algorithme *(annexe 2)* permet, pour une série d'images numérisées dans les mêmes conditions, de segmenter automatiquement l'ensemble de l'échantillon. Pour chaque série de mesure, nous avons segmenté dix à vingt images comportant en moyenne deux ou cinq grains par image. La détermination du seuil lors de la dernière étape est manuelle. Cette valeur est constante pour l'ensemble des images d'une série d'échantillons.

3 Taille des grains :

Nous allons d'abord étudier un paramètre défini par le Centre d'Etude de la Neige*, le rayon convexe moyen.* Suite aux travaux du CEN (Sergent et al., 1993), (Brun, 1989), il s'avère que le rayon convexe moyen est un paramètre caractéristique de la taille d'un type de neige. Ce paramètre garde une relative indépendance par rapport à la formation d'amas de grains. Le support des images étant numérique, nous allons donner une définition du rayon convexe moyen dans le domaine discret.

3.1 Définition du rayon convexe moyen discret :

On considère un contour d'un grain de neige composé de n points. *Le rayon convexe moyen* R_{conv} est égal à la moyenne des parties convexes du contour d'un grain, soit :

$$R_{conv} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} R_{i,conv} \qquad (4\text{-}8)$$

avec $R_{i,conv}$ le rayon convexe calculé au point i du contour.

L'intérêt de définir un *rayon convexe moyen* associé à une courbure discrète est de supprimer tout biais relatif au passage du domaine discret dans le domaine continu. Il existe deux approches pour déterminer ce paramètre. La première est basée sur un calcul utilisant le contour des grains, la seconde

utilise le squelette pondéré et la distance de chanfrein.

3.2 Méthode basée sur l'analyse du contour :

Nous avons défini au *chapitre III,page 38* la courbure discrète par :

$$Cn_k = angle\ (P_{i-k}\ P_i\ ,\ P_i\ P_{i+k})\ /\ (|P_{i-k}\ P_i|+|P_i\ P_{i+k}|) \tag{3-22}$$

Une autre façon de calculer cette courbure dans le cas d'une frontière quelconque est de déterminer l'angle du produit scalaire des deux vecteurs d'ordre k (*Fig. 4.2)* :

$$\vec{u}_k.\vec{v}_k = \|\ \vec{u}\ \|.\|\ \vec{v}\ \|\ \cos\ \alpha_k = u_x v_x + u_y v_y \tag{4-9}$$

avec :

$$\cos\ \alpha_k = \frac{(i_2-i_1)(i_3-i_2)+(j_2-j_1)(j_3-j_2)}{\sqrt{[(i_2-i_1)^2+(j_2-j_1)^2][(i_3-i_2)^2+(j_3-j_2)^2]}} \tag{4-10}$$

La courbure Cn_k est alors définie par :

$$Cn_k = \alpha_k\ /\ (|\ P_{i-k}\ P_i\ |+|\ P_i\ P_{i+k}\ |) \tag{4-11}$$

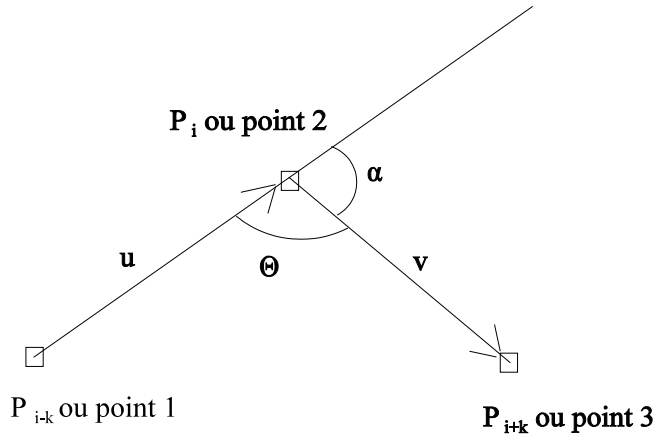


Figure 4.2 : Définition des vecteurs u, v pour le calcul de la courbure discrète.

Le rayon convexe moyen discret $R_{convexe}$

est égale à l'inverse de l'ensemble des Cn_k uniquement convexe :

$$R_{convexe} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} 1 \ / \ Cn_k \tag{4-12}$$

On peut définir de la même façon, le rayon concave moyen discret $R_{concave}$ comme l'inverse des Cn_k uniquement concave :

$$R_{concave} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} 1 \ / \ Cn_k \tag{4-13}$$

L'algorithme de calcul proposé est présenté en *annexe 3*.

Le principe de l'algorithme est la détermination des six coordonnées des origines et des extrémités des deux vecteurs u et v, puis pour chaque point du contour, on détermine si le rayon est convexe ou concave puis on somme les rayons. L'algorithme travaille donc sur le contour de chaque grain et détermine une valeur moyenne pour un ensemble de trente grains. L'ordre de la courbure k fixé à priori ne peut pas être modifié pendant le calcul.

Il est intéressant avant toute analyse de valider la méthode sur des objets de taille connue. Nous avons effectué un premier test sur des cercles de différentes tailles, puis sur des amas de cercles (*Fig. 4.3*). Les rayons convexes moyens étant parfaitement connus, il est alors facile de calculer l'erreur relative de la mesure. Les résultats sont présentés sur les *figures 4.4 et 4.5*.

La *figure 4.4* montre que plus le rayon du cercle est grand, plus l'ordre de la courbure doit être élevé pour réduire l'erreur relative. Pour une raison évidente, on ne peut pas calculer une courbure d'un cercle de rayon de 14 pixels avec un ordre de 16 pixels, un compromis doit être trouvé. Le test suivant a été réalisé à partir de l'amas de cercles de la *figure 4.3*.

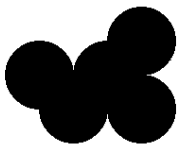


Figure 4.3 : Amas de cercles.

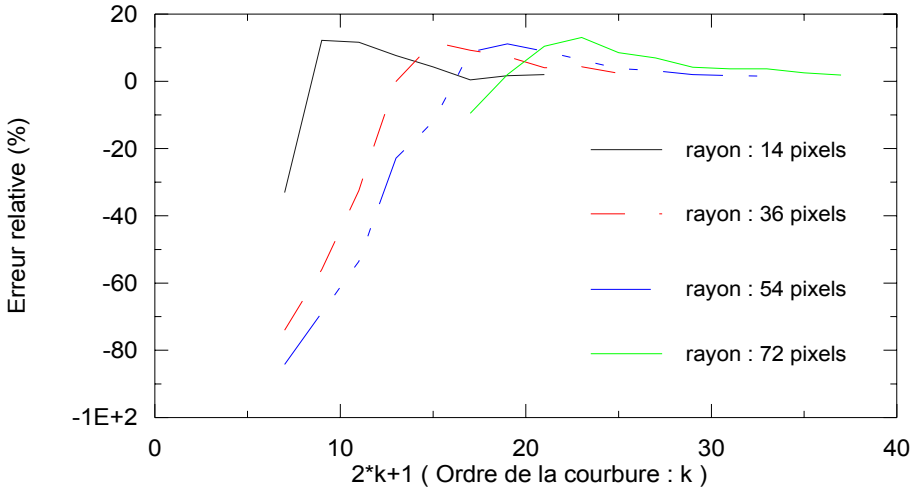


Figure 4.4 : Erreur relative du rayon convexe moyen de quatre cercles de rayons respectifs 14, 36, 54, 72 pixels.

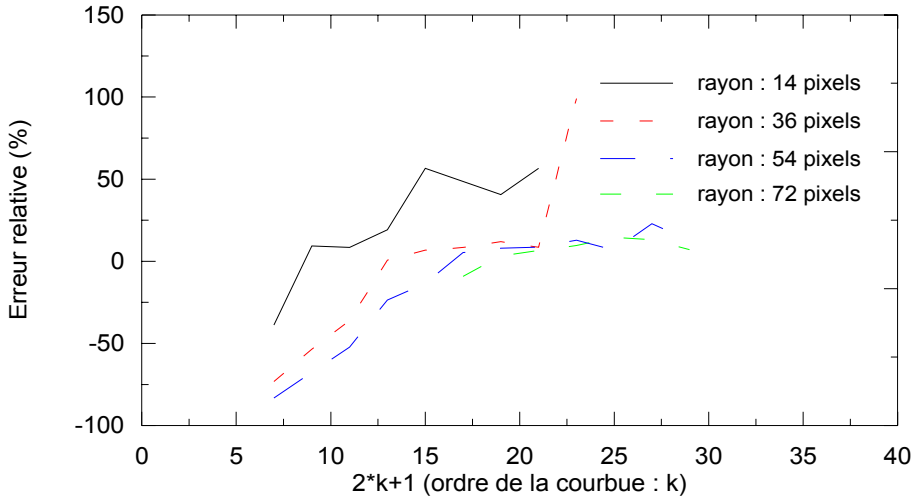


Figure 4.5 : Erreur relative du rayon convexe moyen de quatre amas de cercles de rayons respectifs 14, 36, 54, 72 pixels.

Les résultats de la *figure 4.5* montrent que pour un amas de cercles de faibles rayons, plus l'ordre croit, plus l'erreur sur la détermination du rayon convexe moyen augmente. Si on choisit un ordre de k pixels égal par exemple à 7, (2*k+1=15) l'erreur sur le rayon convexe moyen de l'amas de rayon 36 pixels sera faible, par contre elle sera importante pour les amas de rayon 14 pixels ou 54 pixels. On peut déduire de ce graphe que les zones de recoupement sont faibles, donc si l'étendue des courbures du contour des grains est grande, l'erreur sur le calcul du rayon convexe moyen sera importante.

Deux solutions sont proposées :

- modifier le grossissement lors de la prise d'images pour avoir à peu prés des grains représentant la même surface,
- adapter l'ordre de la courbure à la courbure locale.

Nous avons choisi la première solution qui est plus simple et plus rapide à implémenter. Il est maintenant intéressant de comparer les résultats obtenus à partir de notre méthode, et des observations visuelles, mais également de comparer les résultats avec la méthode utilisée par le CEN (Lesaffre et al. 1998). Regardons les résultats obtenus sur un ensemble de grains. Ces grains ont été prélevés an Antarctique de l'Est entre Dumont d'Urville et Vostok (*Fig. 4.6*).

Grenfell (1994) a fait des observations visuelles de la taille des grains de neige, à Vostok dans un puits de 50cm de profondeur.

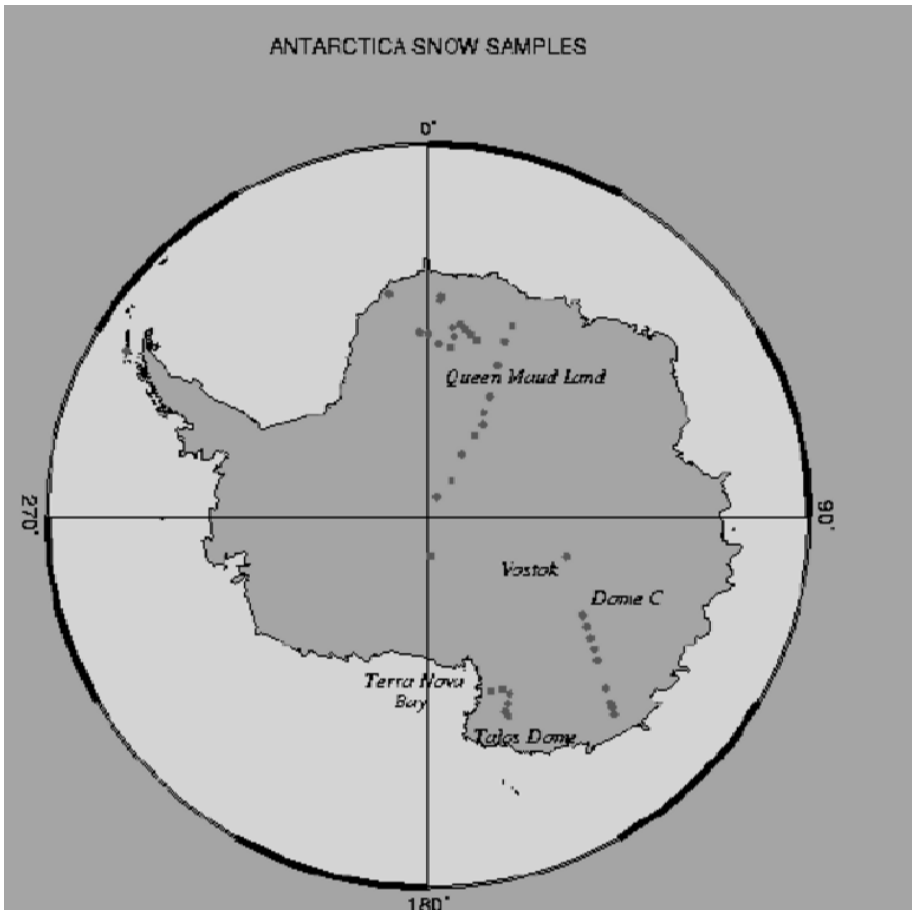


Figure 4.6 : Echantillons de grain de neige prélevés en Antarctique.

Sur la *figure 4.7*, on constate que le rayon convexe moyen varie en fonction de l'ordre de courbure et que la variation relative de la taille pour k=6 pixels ($R_{convexe}$) est cohérente avec les mesures de Grenfell. Sur la *figure 4.8* , on retrouve une variation relative de la taille semblable avec les mesures effectuées par le CEN par contre les minimas et les maximas sont différents. Les barres d'incertitudes sont égales à l'écart type σ calculé avec la formule suivante :

$$\sigma^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} (R_{convexe,i} - R_{convexe,moy})^2 \qquad (4\text{-}14)$$

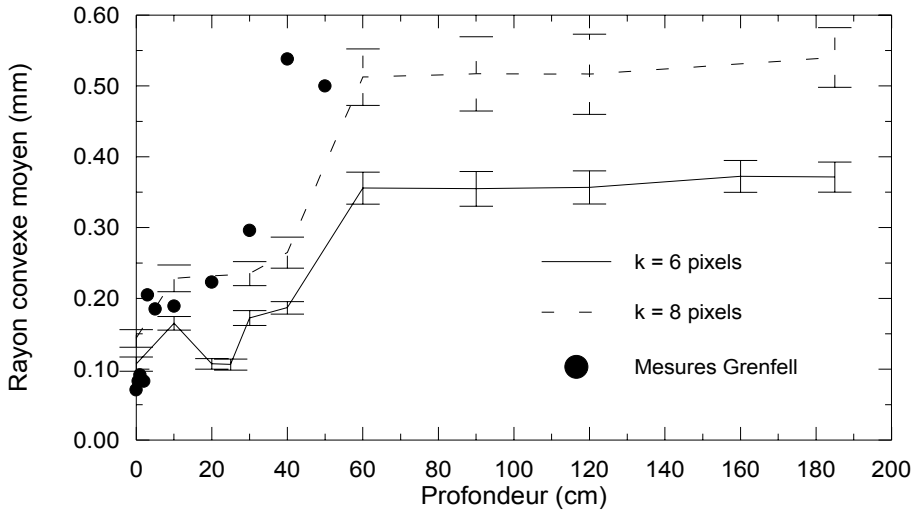


Figure 4.7 : Vostok, rayon convexe moyen pour deux ordres de courbure différents.

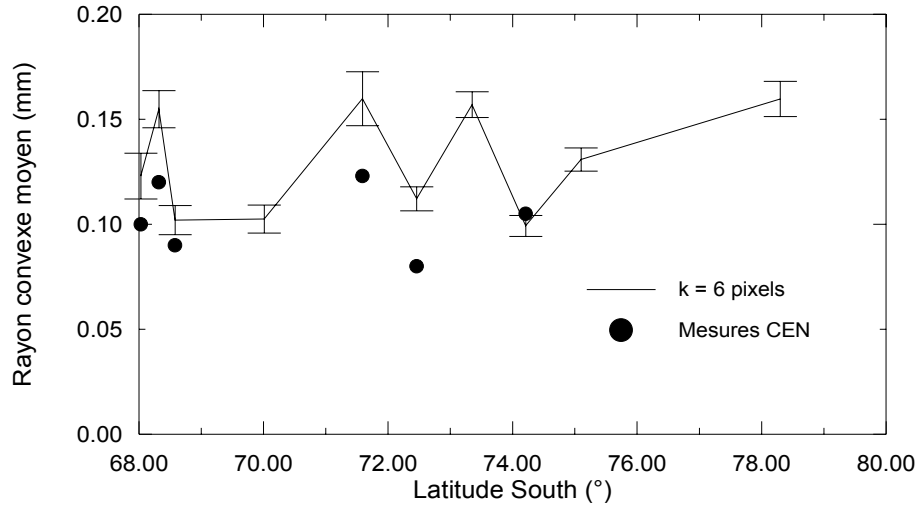


Figure 4.8 : Axe Dumont d'Urville - Dôme C, rayon convexe moyen des grains de surface.

On constate que la méthode est globalement bonne en variation relative mais n'est pas satisfaisante en valeur absolue et nécessite d'avoir des grains de même taille à l'écran et par conséquent de modifier le facteur de grossissement en permanence ce qui est pénalisant pour une analyse systématique d'un grand nombre d'échantillons.

3.3 Méthode basée sur le squelette pondéré :

Le rayon convexe moyen, peut être obtenu par une autre méthode : le squelette pondéré, à partir des images 2D de coupe de neige ou d'un ensemble de grains prélevés dans l'iso-octane. Cette approche est basée sur les notions de distance de chanfrein, d'axe médian et de squelette pondéré définis au *chapitre III*. La méthode unifiée pour extraire le squelette pondéré et les algorithmes a été développée pendant le travail de thèse de E.Thiel (Thiel, 1994). Nous avons utilisé ses algorithmes et nous avons développé les applications et les fonctions nécessaires pour calculer et pour extraire les paramètres qui nous intéressent.

Ces paramètres sont les tailles des grains de neige, calculées à partir des points nodaux et terminaux du squelette.

La distance de chanfrein que nous avons utilisée est $d_{5,7,11,}$ car elle est très proche de la distance euclidienne et elle donne une meilleure précision en morphométrie. Notons également que l'emploi de différentes distances produit naturellement des cartes de distance et des squelettes d'aspects et de propriétés différents.

La construction du squelette d'une forme analogique se modélise de la manière suivante :

- le contour de la forme sert d'initialisation à une onde, qui se propage à une vitesse constante *v* vers l'intérieur de la forme,
- les lieux ou les fronts d'ondes s'interceptent définissent la trace du squelette,
- l'instant auquel chaque point p du squelette est créé, soit t(p), par rapport à l'instant d'initialisation, est attribué au point concerné ; on l'appelle le poids de p.

L'ébarbulage du squelette que nous avons défini dans le *chapitre III* a été généralisé par E.Thiel. La formulation est que pour toute distance discrète, la distance entre deux points p et q peut être exprimée en fonction du nombre de déplacements unitaires horizontaux H et diagonaux D, le long d'un chemin 8-connexe de longueur minimale les rejoignant.

Pour $d_{a,b,c}$ le degré de recouvrement entre les disques P et Q est donc (*Fig.4.9*) :

$$p - q + aH + bQ + \delta\min(H,D) \prec \theta \qquad (4\text{-}15)$$

avec $\delta = c-b-a$.

Le seuil θ peut être fixé à a fois le nombre maximum de lignes ou de colonnes périphériques dont on accepte la perte. Il est courant d'utilisé $\theta = 2 \times a$ (Sanniti 1994).

Par exemple pour une distance $d_{5,7,11}$ et deux points p et q d'un rectangle tel que p soit au bord et q le premier point sur la diagonale à partir du bord, alors p=5 et q=10 ce qui donne :

5-10+(5*1)+(7*1)-1<10 d'ou 6<10 le point bord est perdu.

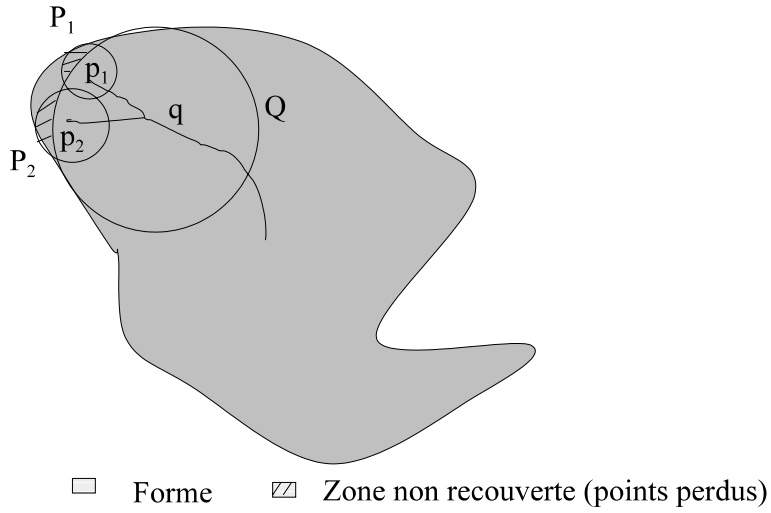
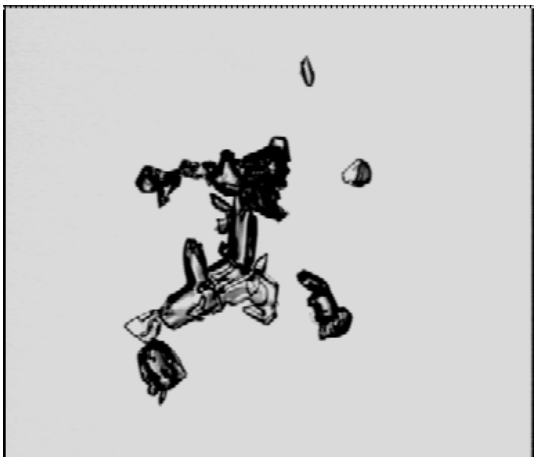


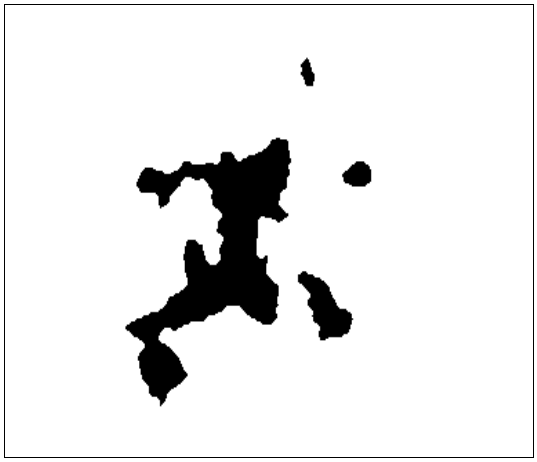
Figure 4.9 : Ebarbulage contrôlé.

La *figure 4.10* montre l'effet du seuil d'ébarbulage sur le contour, ceci est équivalent à un filtre, il supprime des aspérités du contour qui peuvent être des artefacts de l'acquisition ou de la segmentation. Les zones grisées sont enlevées du contour.

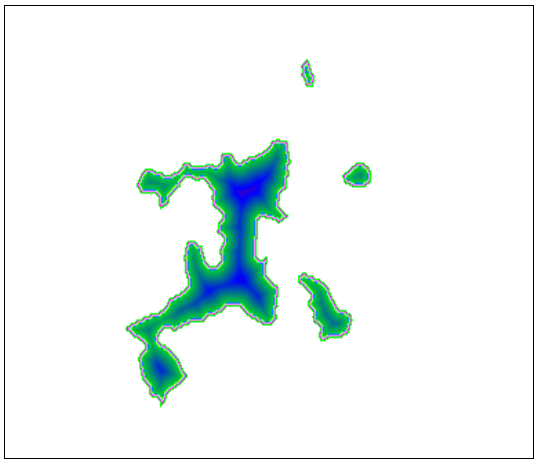
Figure 4.10 : Effet du filtre d'ébarbulage sur le contour d'un grain de neige.



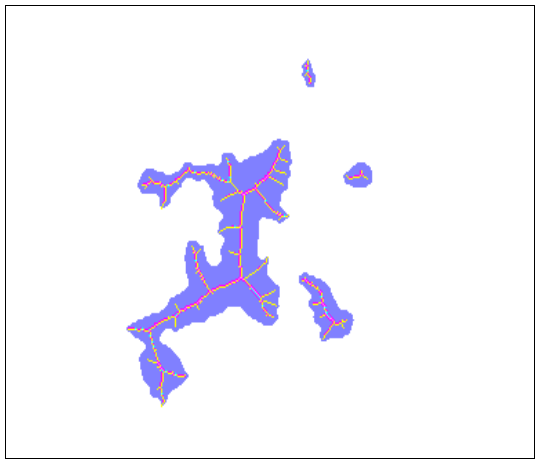
(a)



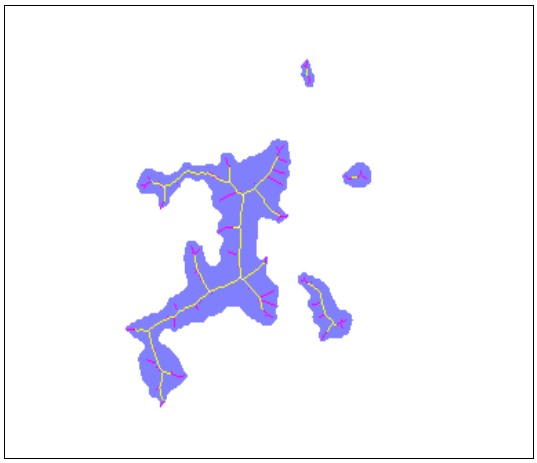
(b)



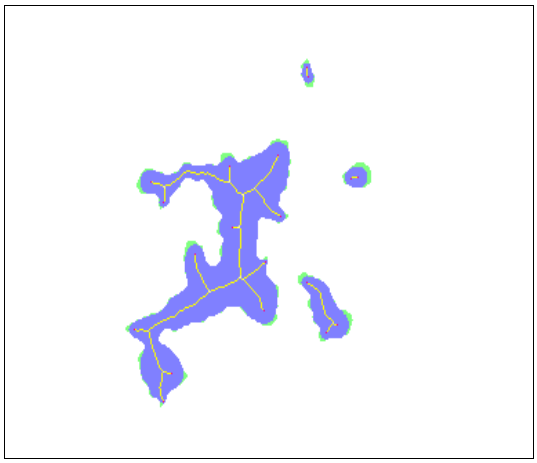
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig
ure 4.11 : Les différentes étapes de la détermination du squelette pondéré.
(a) grains de neige, (b) grains de neige segmentés,
(c) image de la carte des distances des grains, (d) ligne médiane des grains,
(e) squelette des grains, (f) squelette ébarbulé des grains.

Nous montrons sur la *figure 4.11 a* un amas de grains dont nous voulons extraire dans un premier temps le rayon convexe moyen. Suivent ensuite les images de la carte des distances (*Fig. 4.11 c*), de la ligne médiane (*Fig. 4.11 d*), du squelette réduit à l'épaisseur un (*Fig. 4.11 e*) et du squelette ébarbulé (*Fig. 4.11 f*).
Ceci correspond à l'algorithme suivant (Thiel, 1994) :

1. Calculer l'image de distances ou Distance Map notée DM.
2. Marquer l'axe médian, les points selles et les chemins de reconnection.
3. Remplir les faux trous et mémoriser les points du squelette.
4. Réduire à l'épaisseur un.
5. Elaguer et simplifier.

Au niveau macroscopique, le squelette comporte des branches qui sont composées et reliées entre elles par plusieurs points que l'on peut classer en trois catégories :

- le point extrémité, qui a une unique composante 4-connexe de voisins non dans le squelette,
- le point normal qui a exactement 2 8-voisins,
- le point de branchement ou nodaux, non-extrémité, qui a au moins 3 8-voisins.

Les quatre images ainsi mémorisées contiennent toutes les informations sur la taille des grains de neige mais également des informations sur la forme des grains de neige. Pour chacun des pixels de l'intérieur du grain, la distance de chanfrein le séparant du bord extérieur est calculée. Les courbes d'équidistance et le squelette du grain sont alors tracés et mémorisés dans deux images différentes. Les distances associées aux points terminaux du squelette sont représentatives des formes convexes de la frontière extérieure du grain. Celles associées aux points nodaux sont plus représentatives du volume du grain.

On peut définir quatre paramètres à partir des points extrémités qui sont la courbure convexe moyenne, l'écart type de la courbure convexe moyenne, le rayon convexe moyen et l'écart type du rayon convexe moyen. L'autre paramètre de taille que l'on peut définir est la moyenne des rayons des points nodaux. La *figure 4.12* montre un squelette avec les points extrémités, les points normaux ou points branches, et les points nodaux.

Figure 4.12 : Image d'un grain et de son squelette. Les gros points en noir sont les points nodaux, de ces points partent les branches. Le dernier point au bout des branches terminales s'appelle le point extrémité.

A chaque point extrémité du squelette correspond un point dans l'image de la carte des distances

notée DM (Distance Map). La valeur attachée à ce point dans DM représente le rayon de la convexité des points du contour en regard. On définit ainsi quatre paramètres :

- Le rayon convexe moyen d'un grain $R_{convexe}$, est égal à la moyenne des rayons calculés pour n points extrémités :

$$R_{convexe} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} R_i \tag{4-16}$$

- L'écart type des rayons convexes moyens noté Std R_{moyen} est calculé pour n grains d'après la formule suivante :

$$Std\ R_{moyen} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (R_{convexe,i} - R_{convexe,moy})^2 \tag{4-17}$$

- La courbure convexe moyenne $C_{convexe}$ est égale à la somme des inverses des rayons calculés pour n points extrémités :

$$C_{convexe} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i} \tag{4-18}$$

- L'écart type des courbures convexes moyennes noté Std $C_{moyenne}$ est calculé pour n grains d'après la formule suivante :

$$Std\ C_{moyenne} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{1}{R_{convexe,i}} - \frac{1}{R_{convexe,moy}}\right)^2 \tag{4-19}$$

Il est intéressant de comparer l'évolution du rayon convexe moyen calculé à partir des points terminaux pour différentes distances de chanfrein. On montre sur les *figures 4.13, 4.14* l'évolution de l'erreur relative du rayon pour 4 cercles de rayons 14, 36, 54, 72 pixels pris individuellement en fonction du seuil d'ébarbulage et pour deux distances de chanfrein d_4 et $d_{5,7,11}$.

On constate que lorsqu'on utilise une distance d_4 même pour un seuil d'ébarbulage de valeur T=6, l'erreur commise sur le calcul du rayon d'un cercle de 72 pixels par exemple est très élevée (55%). Ce seuil a un effet de filtre. Si la valeur de ce seuil est trop élevée, on perd de l'information donc des valeurs de convexité.

On constate sur la *figure 4.14* que l'erreur relative sur le rayon convexe moyen calculée avec la distance de chanfrein $d_{5,7,11}$ diminue rapidement et permet d'obtenir les valeurs initiales des rayons avec des valeurs de seuil faible 1.5 ou 2. Ceci justifie l'utilisation de cette distance dans la suite de ce travail.

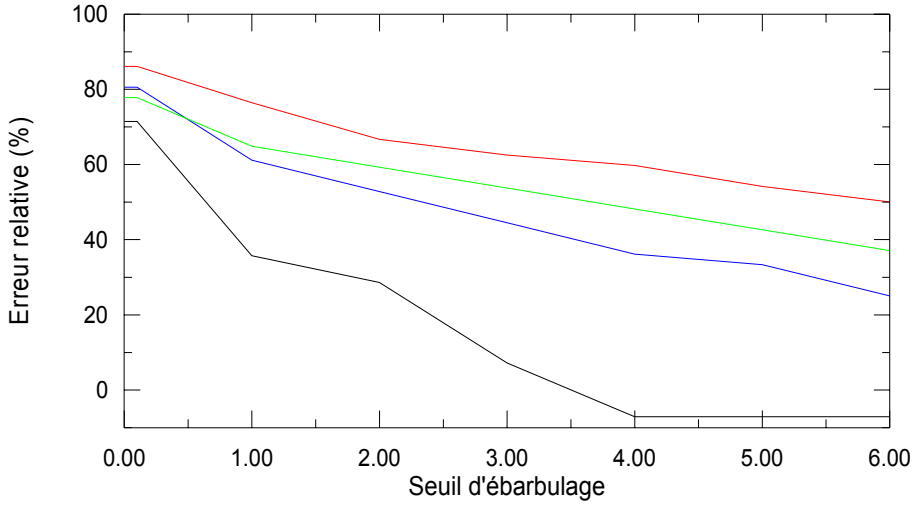


Figure 4.13 : Erreur relative du rayon calculée avec d_4 en fonction du seuil d'ébarbulage pour 4 cercles de rayon :
---- 14 pixels, ---- 36 pixels, ---- 54 pixels, ---- 72 pixels.

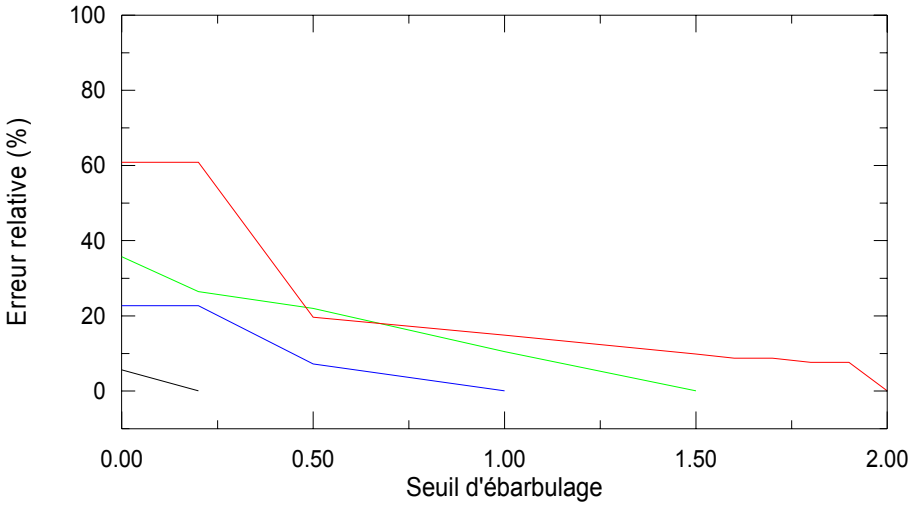


Figure 4.14 : Erreur relative du rayon calculée avec $d_{5,7,11}$ en fonction du seuil d'ébarbulage pour 4 cercles de rayon :
---- 14 pixels, ---- 36 pixels, ---- 54 pixels, ---- 72 pixels.

Regardons l'influence de ce seuil sur 4 amas composés de 4 cercles, de rayon respectivement de 14 pixels, puis de 36, 54 et 72 pixels. La *figure 4.15* montre l'erreur relative calculée avec ces 4 amas. On constate que pour une valeur de seuil de T=4 on tend vers une erreur de 5.7%.

Nous constatons également visuellement sur l'allure de spectre (sans le montrer) qu'en fonction du critère d'ébarbulage, on tend plus ou moins rapidement vers une erreur relative faible. Il importe par la suite de choisir le seuil et le critère d'ébarbulage les mieux adaptés au problème physique étudié.

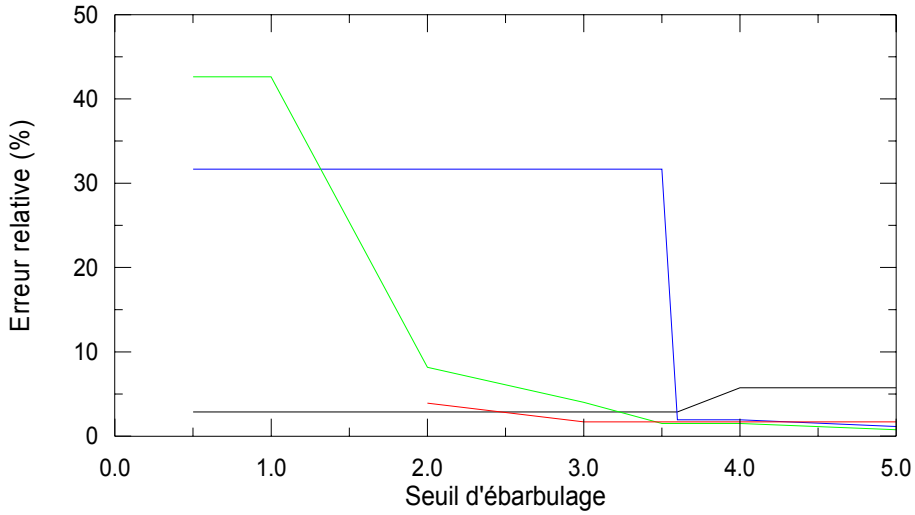


Figure 4.15 : Erreur relative du rayon calculée avec $d_{5,7,11}$ et un critère de seuil Perdus/Total<=T, en fonction du seuil d'ébarbulage pour 4 amas de cercles de rayon :
---- 14 pixels, ---- 36 pixels, ---- 54 pixels, ---- 72 pixels.

L'étape suivante consiste à étudier l'influence du seuil d'ébarbulage noté T et du critère d'ébarbulage sur le rayon convexe moyen calculé avec les points terminaux. Nous avons utilisé deux amas de cercles, composés de quatre cercles de rayon 14, 36, 54, 72 pixels. On montre sur la *figure 4.16* ces deux amas, le premier amas est peu groupé par rapport au second.

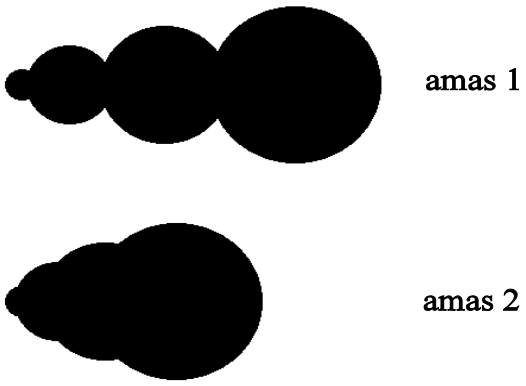


Figure 4.16 : Deux amas de cercles

Le rayon convexe moyen que nous avons défini (équation 4-16) correspond au rayon pondéré par la portion de cercle visible. On montre sur la *figure 4-17* sur le contour des amas en noir, les portions de cercles visibles. Le rayon convexe étant égal à la moyenne des rayons des points extrémités des branches terminales du squelette, la pondération induit un biais vers les grands rayons.

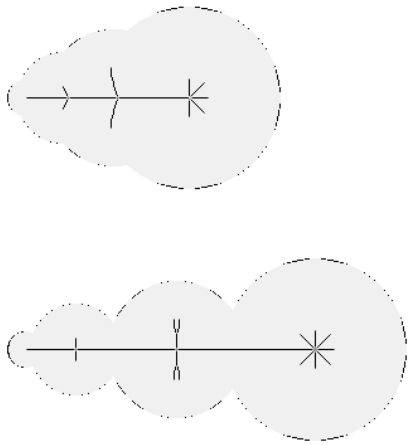


Figure 4.17 : Squelette des amas 1 et 2, portion de cercle visible en noir sur le contour des amas.

Les deux critères d'ébarbulage sont :

p-q+d <= T (4-20)

avec p rayon du petit cercle, q rayon du grand cercle et d distance entre les centres des cercles P et Q, définis au *Chapitre III* page 31 et T seuil.

Points Perdus/Total des points <= T (4-21)

On montre sur les *figures 4.18, 4.19* que la valeur du rayon convexe moyen varie fortement en fonction du seuil d'ébarbulage et du critère d'ébarbulage. Le seuil induit une perte d'information de l'objet. Plus le seuil est élevé, plus on perd des points de l'objet par réduction de la surface en partant du contour.

On constate également qu'au delà de la valeur de 2 pour le second critère (*Fig. 4.19*) nous avons une relative stabilité de la valeur du rayon convexe moyen. Si on considère la valeur du rayon convexe moyen théorique comme étant égale à la moyenne des valeurs des rayons des cercles 14, 36, 54 et 72 pixels soit 44 alors l'incertitude sur le rayon varie entre 1.36% et 5% pour un seuil variant de 1.8 à 5.

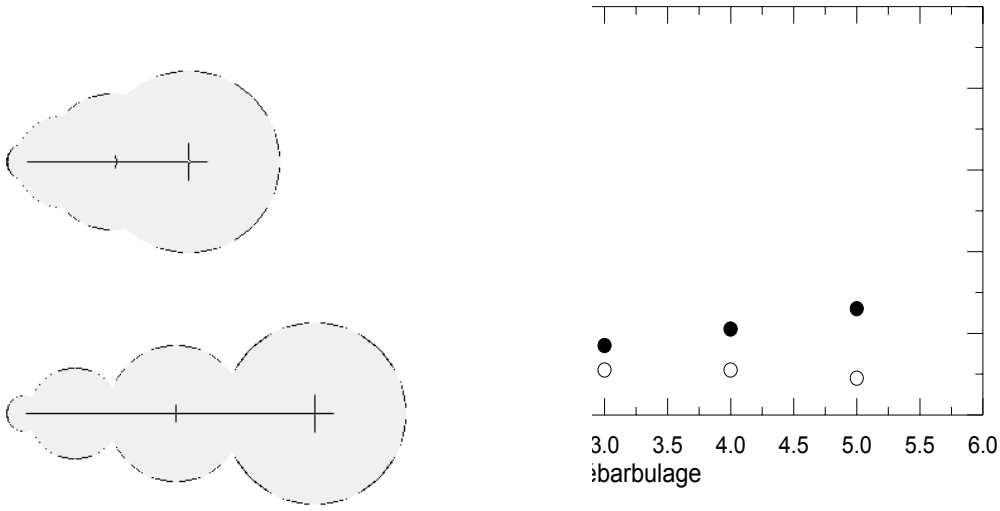


Figure 4.18 : Evolution du rayon convexe moyen pour deux amas de cercles, (a) le critère d'ébarbulage est : p-q+d <= T.
❍ amas 1
● amas 2.

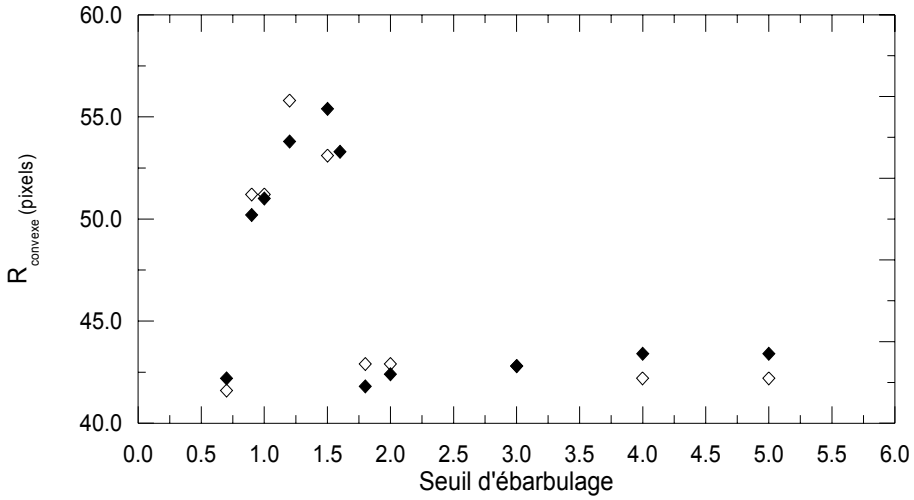
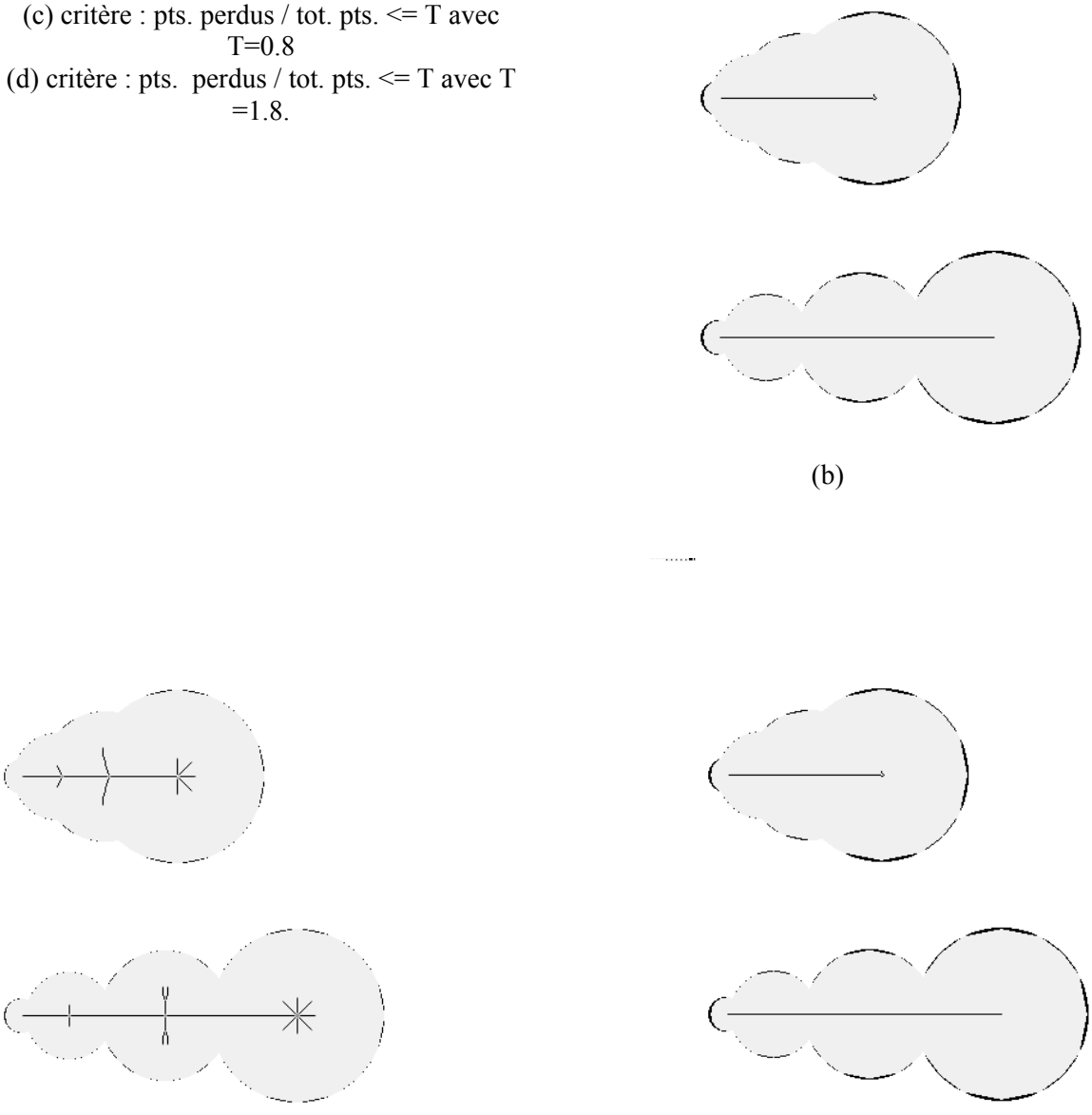


Figure 4.19 : Evolution du rayon convexe moyen pour deux amas de cercles, le critère d'ébarbulage est : Pts perdus / Total des pts <= T.
◇ amas 1
♦ amas 2.



(b)

(c)

(d)

Figure 4.20 : Evolution des squelettes en fonction du critère d'ébarbulage et du seuil :
(a) critère : p-q+d <= T avec T=0.8
(b) critère : p-q+d <= T avec T=1.8
(c) critère : pts. perdus / tot. pts. <= T avec T=0.8
(d) critère : pts. perdus / tot. pts. <= T avec T =1.8.

On constate sur la *figure 4.20* que pour une même valeur de seuil T=0.8, les squelettes différent en fonction du critère d'ébarbulage utilisé. Le second critère (*Fig. 4.20 c*) prend en compte les convexités de chacun des cercles du contour, mais introduit un biais en pondérant les petits cercles par des rayons plus faibles. Pour la valeur T=1.8 on obtient les mêmes squelettes.

Ces résultats montrent que le rayon convexe moyen est un paramètre relatif de la taille des objets analysés. Plus le seuil T est faible, moins on perd d'informations sur l'objet. Le critère d'ébarbulage a également une influence sur le squelette obtenu. Une fois que l'on a fixé le seuil T et le critère d'ébarbulage, il est nécessaire de garder cette valeur et ce critère pour l'analyse de l'ensemble des échantillons.

Nous avons également fait un test en réduisant d'un facteur deux les deux amas et nous avons calculé le rayon convexe moyen avec un seuil T = 2 et avec le critère d'ébarbulage p-q+d<=T. Je trouve une valeur de $R_{convexe}$ = 21, la valeur précédemment calculée était de $R_{convexe}$ = 41.6. On conserve bien la valeur du rayon convexe en faisant varier les dimensions des objets.

Il est intéressant maintenant de regarder l'influence du seuil d'ébarbulage sur un grain de neige et de comparer les différents squelettes obtenus. On montre sur la *figure 4.21* l'évolution du squelette pour des valeurs de seuil allant de T=1 à T=40. Pour des valeurs supérieures à T=40 le squelette n'évolue plus, je ne l'ai donc pas représenté.

On constate que plus T est grand, moins on va prendre en considération les petites convexités. Le squelette sera d'autant plus compact que les valeurs de seuil seront élevées, jusqu'à obtenir une limite T=40.

En conclusion, de ce travail, nous constatons qu'il est possible de faire le choix de deux critères, de même qu'il est possible de choisir plusieurs seuils. Il est impossible de faire un choix absolu.

Pour la télédétection, le seuil T=8 avec le critère p-q+d<=T permet de retrouver le rayon déterminé à partir du modèle de réflectance en fonction du rayon convexe mesuré sur les grains de neige en surface (cf chapitre III p. 92). Nous avons donc choisi ce critère et ce seuil pour l'analyse de l'ensemble des échantillons de l'Antarctique en gardant à l'esprit que ce choix est arbitraire, mais que ce qui nous intéresse est de comparer la variation relative de la taille des grains et non pas de déterminer une valeur absolue.

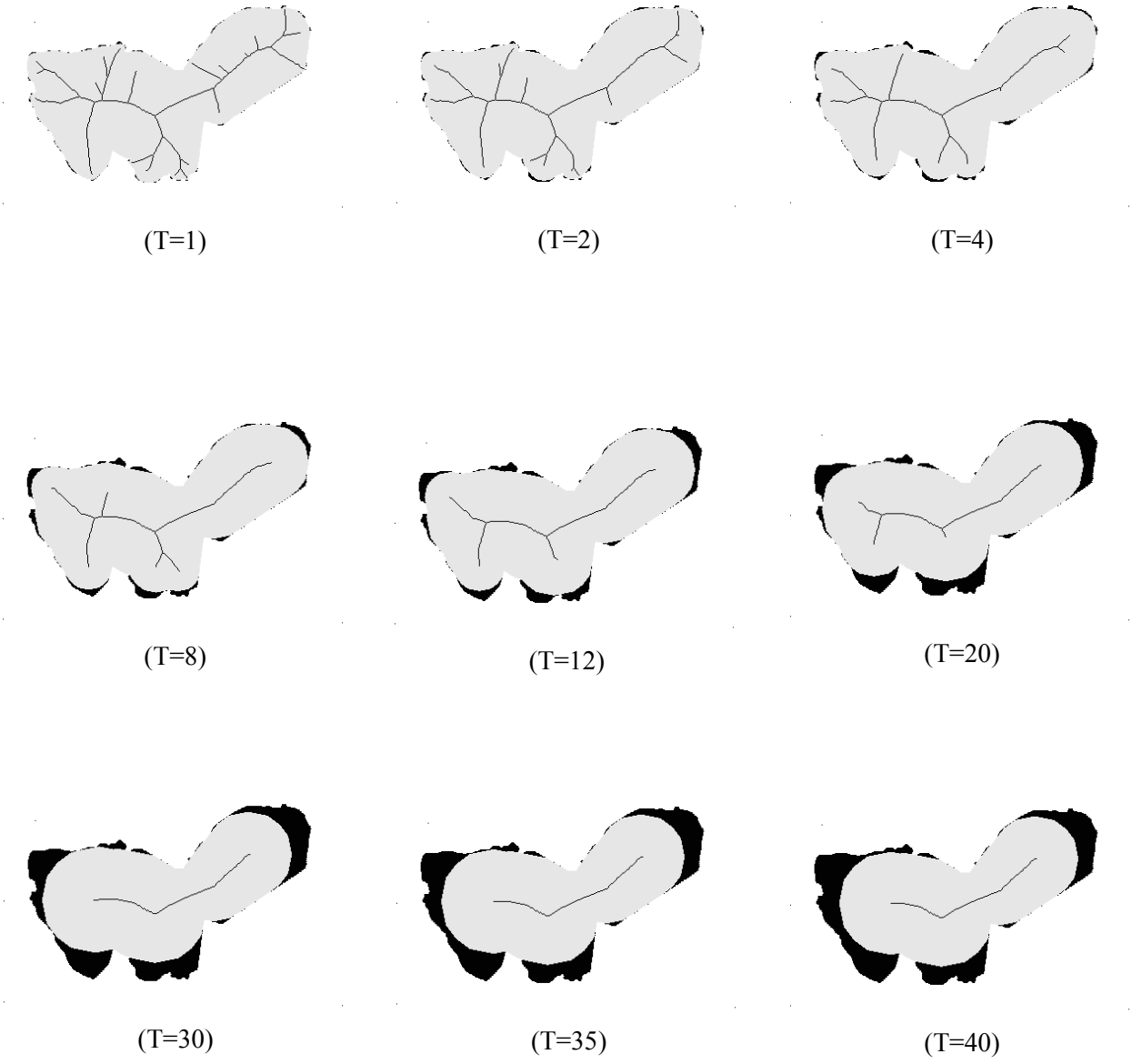


Figure 4.21 : Evolution du squelette d'un grain de neige (gobelet) pour différentes valeurs de seuil avec le critère p-q+d <= T.

On montre sur la *figure 4.22,* la comparaison du rayon convexe déterminé à partir des points terminaux et des points nodaux du squelette pondéré, pour un critère p-q+d<=T et un seuil T=8. Le rayon convexe moyen calculé à partir des points nodaux est égal à la moyenne des rayons calculés dans l'image de la carte des distances (DM) des n points nodaux du squelette d'un grain. On moyenne ensuite sur environ 30 grains. Ceci pour un ensemble d'échantillons de grains de neige prélevés sur l'axe Dumont d'Urville - Dôme C.

Les points nodaux (ou points de branchement) sont forcément plus grands, ils sont plus représentatifs du volume du grain.

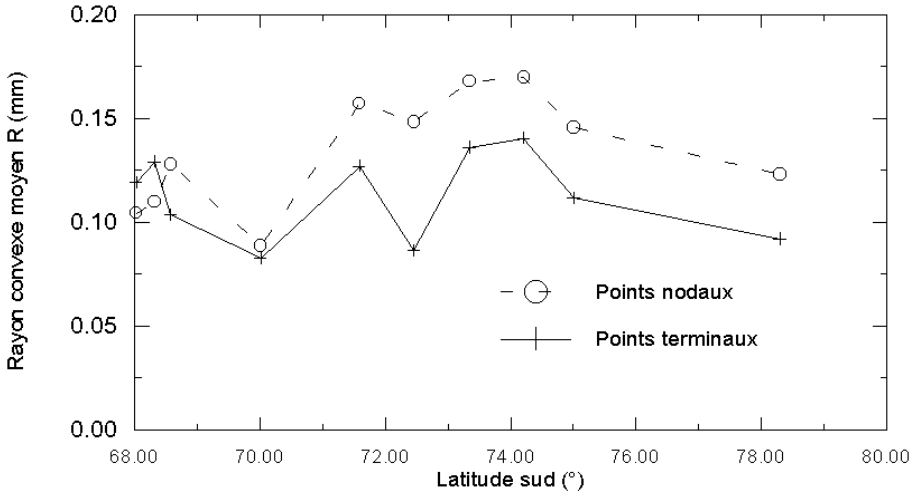


Figure 4.22 : Axe Dumont d'Urville - Dôme C, rayon convexe moyen en fonction de la latitude (°)

3.4 Comparaison des rayons convexes et détermination de paramètres utilisés pour la reconnaissance des grains :

Le Centre d'Etude de la Neige (CEN) détermine le rayon convexe moyen des grains de neige à partir du contour des grains par une méthode recherchant une fonction de lissage sur un nombre N de pixels du contour (Lesaffre at al. 1998).

On montre sur la *figure 4.23* la comparaison du calcul du rayon convexe moyen calculé avec le squelette pondéré (crit.: p-q+d<=T et T=8) et par la méthode de recherche de fonction de lissage (17 pixels) du CEN.

On ne peut pas conclure sur la validité d'une méthode par rapport à l'autre. On peut par contre remarquer que les erreurs relatives des rayons convexes calculés par la méthode de recherche de fonction de lissage du CEN utilisée avec un nombre N=17 pixels peuvent varier de +10% à -30%.

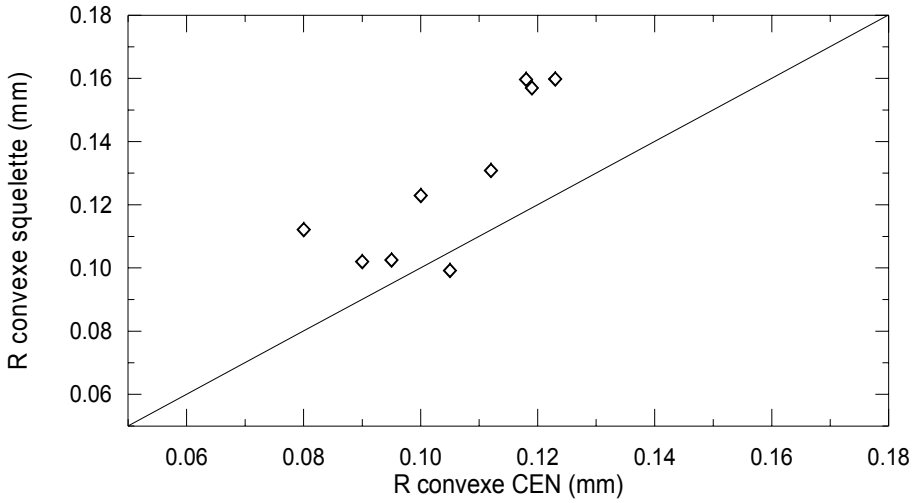


Figure 4.23 : Comparaison du rayon convexe moyen calculé avec le squelette pondéré et par la méthode de recherche d'une fonction de lissage (CEN).

Calcul de paramètres utilisés pour la reconnaissance des grains :

L'intérêt du travail suivant est d'essayer de différentier les grains de neige avec des paramètres utilisés par le CEN. Le CEN a mis à ma disposition une série d'images complète de grains de neige, avec lesquelles nous avons calculé les quatre paramètres définis par les équations 4-17, à 4-18. Nous avons traité 50 échantillons, répartis de la façon suivante :

- 6 échantillons de neige fraîche,
- 4 échantillons de particules reconnaissables,
- 4 échantillons de grains fins,
- 5 échantillons de grains ronds,
- 5 échantillons de grains à faces planes,
- 7 échantillons de gobelets (ou givre de profondeur).

On peut voir sur la *figure 4.24* que ces résultats sont similaires avec les analyses du Centre d'Etude de la Neige (Lesaffre 1998). Pour certains types de neige, on peut définir une zone disjointe des autres zones. C'est le cas pour la neige fraîche, les grains fins, les grains ronds, les grains à faces planes, le givre de profondeur. Les particules reconnaissables sont trop étendues et recouvrent plusieurs autres zones, on ne peut pas les distinguer des autres grains.

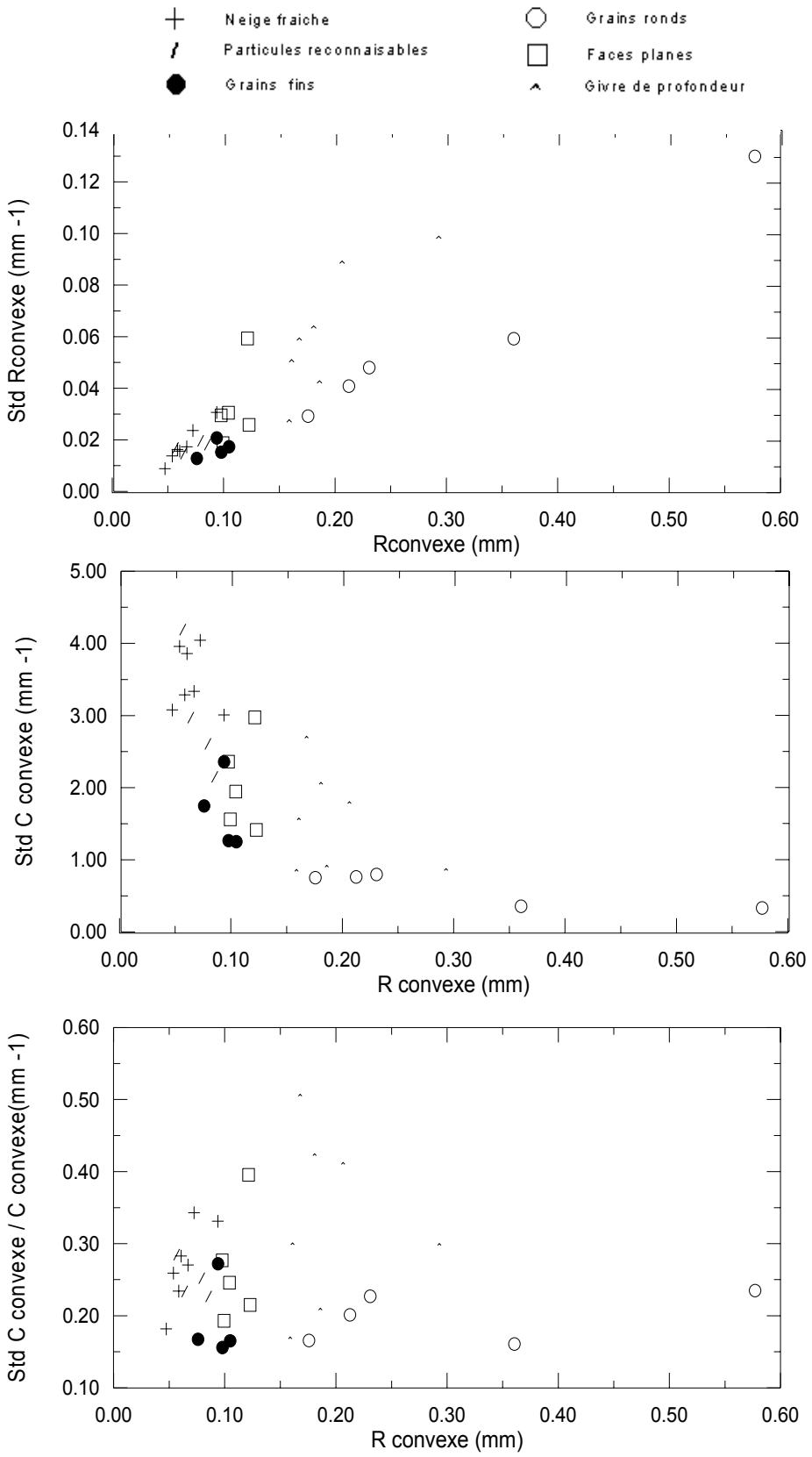


Figure 4.24 :
Paramètres de différents types de neige en fonction du rayon convexe moyen.

3-5 Conclusion :

Nous avons testé deux méthodes de calcul du rayon convexe moyen des grains de neige. La première utilise le contour des grains de neige, la seconde basée sur la détermination du squelette pondéré et la carte des distances (DM) prend en compte la surface des grains.

A partir des tests effectués sur des cercles et sur des agglomérats de cercles, nous avons mis en évidence que le rayon convexe moyen calculé avec la première méthode basée sur le contour des grains dépend de l'ordre de la courbure k. Si cet ordre est par exemple de k=5 pixels et que le cercle a un rayon de 36 pixels, l'erreur de calcul du rayon convexe moyen est de 40%. Nous avons donc regardé une autre approche : l'approche région, basée sur le squelette pondéré et la carte des distances.

Cette méthode utilise les distances de chanfrein, et nous avons constaté que la distance la plus proche de la distance Euclidienne est la distance $d_{5,7,11}$. Avec cette distance de chanfrein, et du squelette pondéré, nous avons défini le rayon convexe moyen comme étant la moyenne des distances (DM) associées aux points terminaux du squelette. Ces distances sont significatives des convexités en regard des points terminaux du squelette.

Le rayon convexe moyen calculé par cette méthode basée sur le squelette pondéré dépend de la distance de chranfrein utilisée, du seuil et du critère d'ébarbulage. Nous avons vu que grâce à ce calcul, les erreurs relatives sont de moins de 5% sur des cercles de taille 14, 36, 54 et 72 pixels une fois le seuil et le critère d'ébarbulage fixés. Cette méthode a l'avantage d'être une représentation compacte des grains et lorsque l'on a fixé la distance de chanfrein, le seuil et le critère d'ébarbulage, le squelette d'un grain de neige est unique. Par conséquent le calcul du rayon convexe est stable.

Nous avons fait une comparaison avec des mesures du rayon convexe utilisant la méthode de lissage du contour du CEN. Les courbes montrent des valeurs de ce rayon sont du même ordre de grandeur. Nous allons utiliser cette méthode basée sur le squelette pondéré pour effectuer une étude de la taille des grains sur le continent Antarctique et comparer les valeurs obtenues par rapport à la modélisation de la réflectance de la neige. Afin que l'analyse soit complète nous allons également étudier des paramètres de forme des grains de neige.

On peut également remarquer que grâce à cette représentation, on peut extraire d'autres paramètres qui peuvent être utiles pour l'étude de la neige et du névé, comme par exemple le rayon moyen des liaisons des grains (Fullman 1953).

4 Autres paramètres, type de neige :

La caractérisation de la forme est un problème qui ne présente pas de solution générale. Lorsque l'on cherche à décrire la forme d'un objet, on se réfère généralement à une forme géométrique parfaitement définie (particules sphériques, en aiguille, ...). La description de la forme n'est possible que si l'on peut faire coïncider l'objet à analyser avec un objet de référence, ce qui est peu fréquent.

Deux techniques dépendant de la nature de l'ensemble à analyser et du problème à résoudre permettent l'analyse de la forme**.** La première, consiste à comparer les objets inconnus à un objet de forme parfaitement définissable. La seconde consiste à analyser paramétriquement l'objet et à effectuer un classement en fonction de ces paramètres. Cette approche paramétrique peut être divisée en deux catégories : d'abord l'analyse paramétrique simple ou l'objet analysé n'est caractérisé que par un ou plusieurs indices de forme, ensuite l'analyse harmonique ou l'objet est décrit par un ensemble de coefficient. Notons que l'analyse harmonique peut être abordée par trois méthodes : l'analyse de Fourier, l'analyse morphologique et l'analyse fractale.

Dans notre cas du fait que la forme des grains de neige peut s'écarter beaucoup (regroupement de grains, ...) par rapport à un modèle, nous utiliserons essentiellement la seconde technique.

4.1 Indices de formes relatifs aux objets convexes et concaves :

Un autre aspect intéressant à regarder sur l'ensemble des grains du CEN est l'évolution de différents indices de forme que nous avons définis au *chapitre III*. L'objectif étant d'étudier différents indices et d'essayer de caractériser les différents types de neige. Ces indices sont l'indice d'allongement, noté IA_d, le degré fractal noté ID_f et l'indice de concavité noté IC_a.

Rappelons les formules de ces indices :

$$IA_d(X) = D_e(X)/D_s(X) \tag{4-22}$$

avec $D_e(X)$ la largeur et $D_s(X)$ la longueur du rectangle d'encadrement du grain de neige.

$$ID_f = \frac{L_2(X)}{A(X)} \tag{4-23}$$

$L_2(X)$ et $A(X)$ sont respectivement le périmètre et la surface du grain de neige.

$$IC_a = \frac{A(X)}{A(C_v(X))} \tag{4-24}$$

$A(C_v(X))$ est la surface de l'enveloppe convexe du grain de neige.

On montre sur la *figure 4.25* que l'indice d'allongement IA_d ne révèle pas de distinction des types de neige. L'indice ID_f ou degré fractal permet de séparer la neige fraîche, les particules reconnaissables, les grains fin, et les gobelets, en effet plus l'objet sera filiforme (la neige fraîche) plus cet indice sera élevé. Il permet également de différencier les grains ronds des gobelets.

L'indice de concavité IC_a permet d'identifier la neige fraîche et les faces planes ou les particules reconnaissables et les grains fins.

On constate que les deux indices ID_f et IC_a permettent de définir six ensembles disjoints identifiant 5 types de neige. Il nous manque un indice pour pouvoir différencier les grains fins et les faces planes. C'est une combinaison de plusieurs indices qui va nous permettre de différencier les différents types de neige.

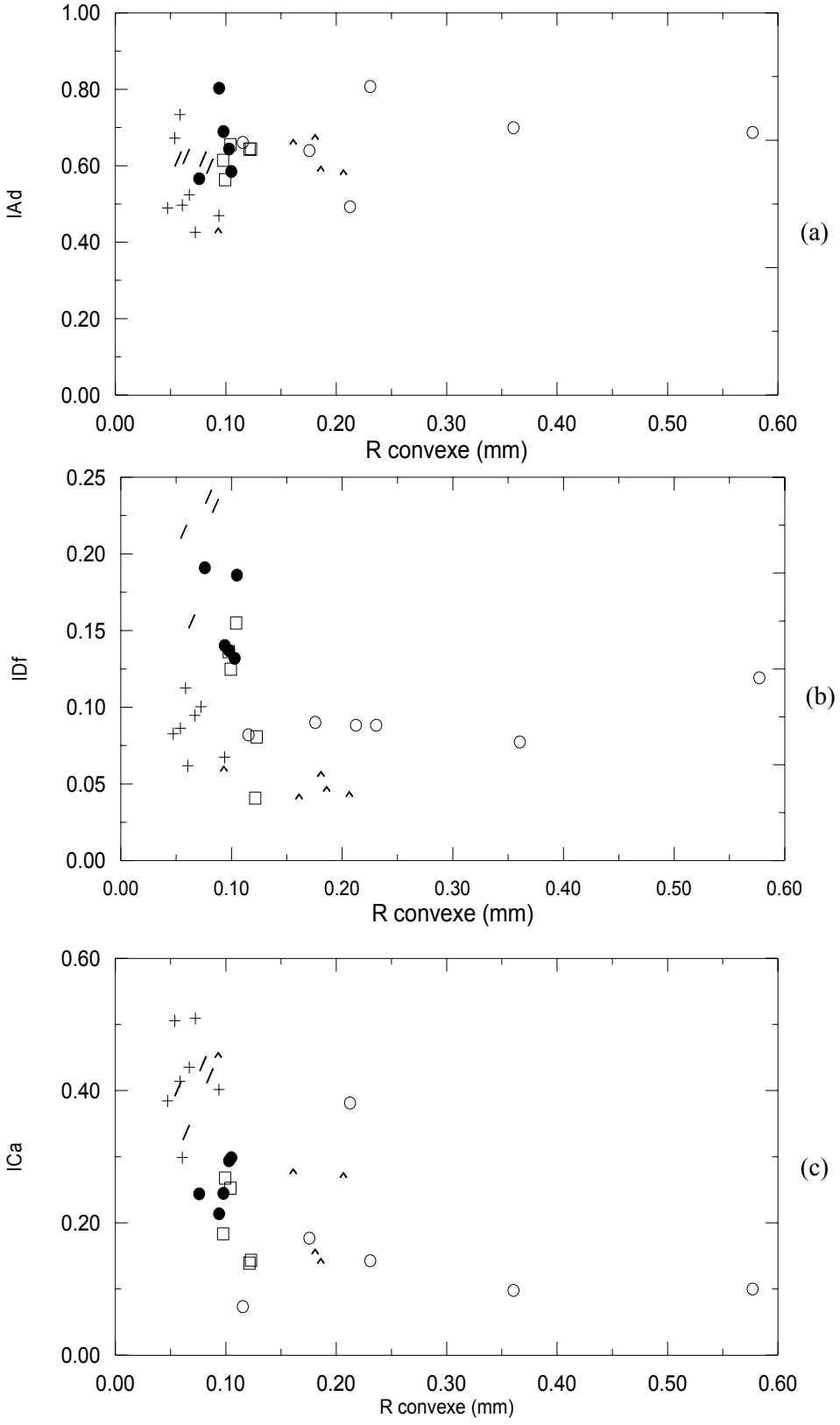


Figure 4.25 : Evolution des indices de formes calculés sur les images test de grains de neige du CEN (a) IAd : Indice d'Allongement , (b) Degré Fractal : IDf, (c) Indice de Concavité.

4.2 Indices gc, pc :

Il existe d'autres paramètres qui traduisent respectivement l'importance des grandes concavités noté gc et des petites concavités noté pc. Ils sont définis par les formules 3-20 et 3-21 définies au *Chapitre III.*

Si la forme ne présente que des concavités de grandes surfaces, le paramètre gc est élevé et le paramètre pc est faible alors que dans le cas d'une forme présentant de petites concavités (contour "dentelé") le paramètre gc est faible et le paramètre pc est élevé.

S(i), la surface de la concavité d'indice i peut être obtenue à partir soit de l'enveloppe convexe, soit de l'enveloppe xy-convexe de l'objet labélisé. Rappelons la définition de ces deux enveloppes convexes discrètes. Etant donné une composante connexe S obtenue après un algorithme d'étiquetage ou de suivi de contour, que l'on suppose apparaître de manière isolé dans l'image, le processus algorithmique permettant de déterminer son enveloppe convexe discrète procède en deux étapes :

- recherche de la forme x-x convexe associée à la forme initiale,
- calcul de la forme convexe discrète associée à la forme x-y convexe obtenue.

L'enveloppe x-y convexe associée à une composante connexe est définie comme étant la forme convexe selon les directions principales horizontale et verticale du maillage. Nous allons voir que dans notre cas ou les grains de neige sont parfois isolés ou regroupés en amas il est préférable de choisir l'enveloppe x-y convexe. Pour que ces paramètres soient indépendants de la taille des grains, nous les avons normalisés par la surface de l'enveloppe x-y convexe. Ce qui donne :

$$gc = \left(\sum_{i=1}^{nc} S(i)^2 \right) / \left(nc * rAreaconvex \right) \tag{4-25}$$

$$pc = \left(\sum_{i=1}^{nc} 1/S(i)^2 \right) / \left(nc * rAreaconvex \right) \tag{4-26}$$

ou nc représente le nombre de concavité de l'objet étudié, S(i) représente la surface de la concavité d'indice i et rAreaConvex représente la surface de l'enveloppe xy-convexe de l'objet étudié. Ces indices sont calculés et moyennés sur trente grains environ.

On montre sur la *figure 4.26*, l'évolution de ces deux paramètres gc et pc et du paramètre gc/pc en fonction du rayon convexe moyen.

Nous pouvons constater l'indice gc définie des zones ou l'on peut distinguer la neige fraîche, et le givre de profondeur. L'indice pc définis des zones ou l'on peut différencier les grains fins, les grains ronds, les grains à faces planes et le givre de profondeur. Par contre ces zones se recoupent pour deux types de grains pris deux à deux, comme par exemple les gobelets et les grains ronds.

Nous avons des indicateurs de la métamorphose de la neige sèche. Nous pouvons grâce au rapport gc/pc retrouver les trois phases de transformation de la neige à faible, moyen et fort gradient. Ces phases sont identifiées par une évolution à la fois des convexités et des concavités, c'est la raison pour laquelle il est judicieux de choisir un indice qui prend en compte les transformations de chacune de ces parties du grain.

La métamorphose de faible gradient est caractérisée par l'augmentation du rayon de courbure qui l'emporte sur l'effet de gradient et la tendance est à la disparition des angles vifs d'ou l'augmentation des petites concavités et la diminution des grandes concavités. Nous voyons dans ce cas que le rapport gc/pc diminue très rapidement, avec l'augmentation du rayon convexe. La tendance est vers un contour dentelé avant l'arrondissement complet des grains.

La métamorphose de gradient dit "moyen", l'influence du gradient l'emporte sur celle du rayon de courbure, la condensation se fait sur les points "froids" et les grains prennent un caractère anguleux. Nous avons dans ce cas une diminution plus lente des grandes concavités et une augmentation moins rapide des petites concavités. Le rapport gc/pc diminue plus lentement, avec l'augmentation du rayon convexe moyen.

La métamorphose de "fort gradient" : le processus "sublimation/condensation solide", déjà présent dans le cas d'un gradient "moyen" s'intensifie. L'alimentation en vapeur est assurée dans un premier temps par les plus petits grains qui disparaissent au profit des gros. Le rapport gc/pc diminue encore. Les fortes concavités diminuent et les grains grossissent, ce qui se traduit par une augmentation du rayon convexe moyen.

Trois indices IDf, ICa et pc nous permettent de différencier les types de neige. Nous pouvons alors proposer une traduction nivologique de ces paramètres étudiés, pour les utiliser dans le modèle physique d'évolution du manteau neigeux CROCUS (Brun, 1989,1992).
Dans le modèle CROCUS, la morphologie de la neige est caractériser par deux nombres réels variant de 0 à 1 : la dendricité et la sphéricité pour les neiges récentes ; la taille et la sphéricité pour les neiges granuleuses. La dendricité varie de 1 pour la neige fraîche à 0 vers les neiges granuleuses. La sphéricité varie de 1 pour les grains fins et grains ronds jusqu'à zéro pour les grains à faces planes et les gobelets.

Je propose les relations suivantes :

$$I_{dendricité} = = \alpha(5 * ID_f - 0.25) + \beta(3.33 * IC_a - 0.66) \tag{4-25}$$

avec : $\alpha = 1$ pour la neige fraîche ou les particules reconnaissables, 0 sinon
$\beta = 1$ pour les particules reconnaissables ou les grains fins, 0 sinon.

$$I_{sphéricité} = Std\ C \tag{4-26}$$

ou Std C est l'écart type des courbures convexes.

La taille est égale au rayon convexe moyenne des grains :

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} R_i\ convexe \tag{4-27}$$

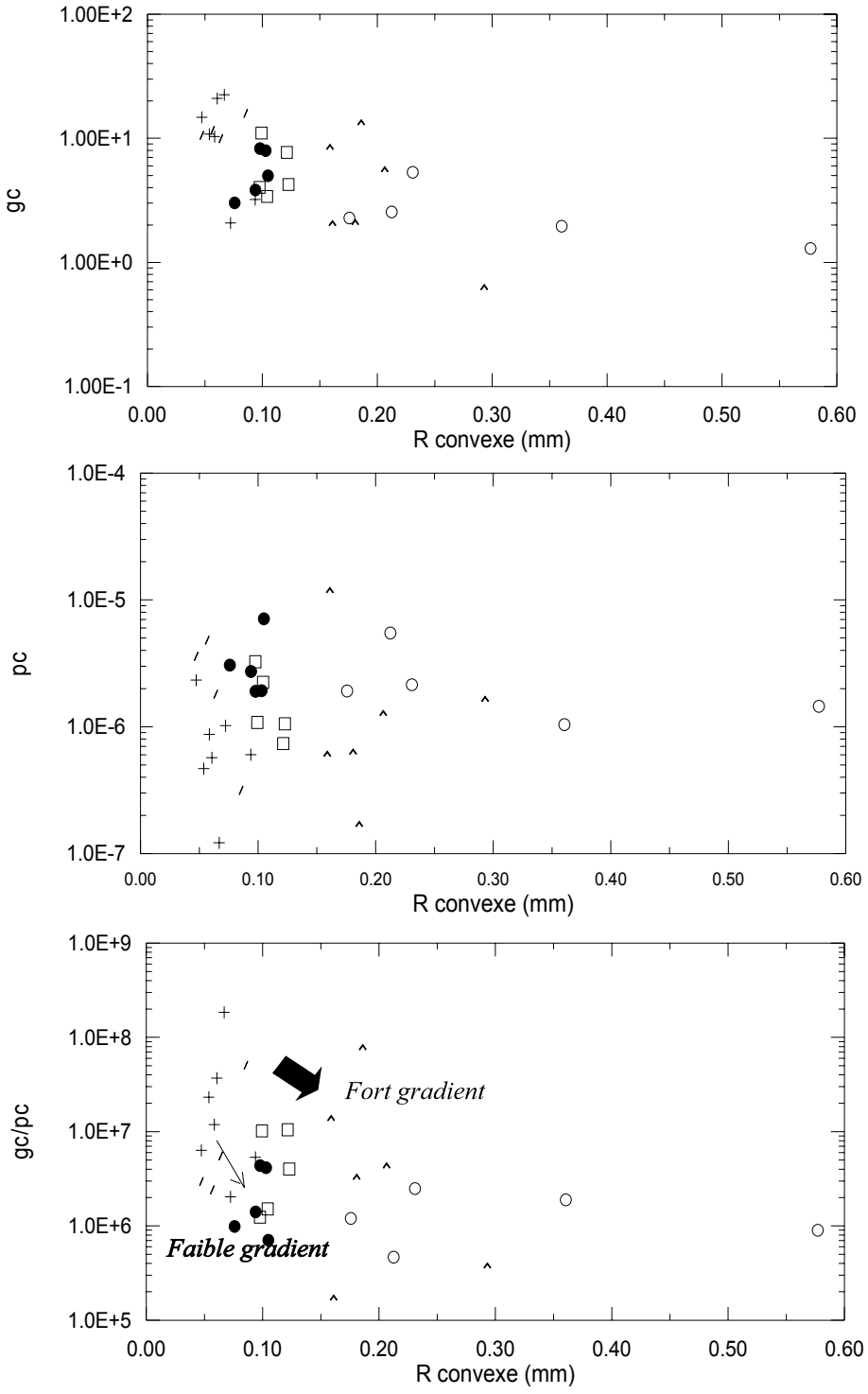


Figure 4.26 : Evolution des indices gc, pc et gc/pc calculés à partir des images de grains du CEN. gc : indice des grandes concavités, pc indice des petites concavités.

5 Mesures et interprétation des données de tailles de grains :

5.1 Application à la télédétection :

Une des applications de ces mesures de tailles de grains de neige est la comparaison du rayon convexe mesuré avec le rayon optique déduit de la réflectance de la neige. Nous allons rappeler quelques définitions sur la physique de la télédétection.

Définition des propriétés d'un rayonnement électromagnétique :

Dans le spectre solaire, le facteur important est la réflexion de l'énergie par la surface. Au contact d'une surface, un rayonnement incident peut être totalement ou partiellement réfléchi. La réflectance ou le coefficient de réflexion ρ est le rapport de l'énergie incidente et de la partie réfléchie. Dans tous les cas $0<\rho<1$. Quand l'énergie reçue est l'énergie solaire et que les surfaces irradiées sont des surfaces terrestres ou planétaires, la réflectance est appelée albédo. Pour toute surface recevant un rayonnement électromagnétique, selon le premier principe de thermodynamique, l'énergie incidente est toujours égale à la somme des énergies réfléchie, absorbée et transmise. L'égalité (4-24) est vérifiée :

$$\sigma + \rho + \tau = 1 \qquad (4\text{-}24)$$

L'albédo d'une vieille neige est de 0.4, l'albédo d'une neige fraîche est compris entre 0.8 et 0.9. Wiscombe et Warren ont montré que l'albédo de la neige dépend de la taille des grains (*Fig. 4.31)*.

La réflexion sur une surface peut être spéculaire, c'est à dire dirigée entièrement dans une seule direction comme dans le cas d'un miroir ou diffuse, c'est à dire diriger dans toutes les directions. Lorsque la diffusion est isotrope, on parle de surface lambertienne. La neige n'est pas lambertienne, il faut donc connaître la Fonction de Distribution des Réflectances Bidirectionnelles que nous allons définir (FDRB) pour pouvoir la caractériser.

Grandeurs physiques mesurées :

On montre sur la *figure 4.32* la configuration type d'une mesure par satellite. On peut définir les différents angles intervenant dans la plupart des cas en télédétection. L'angle zénithal solaire θ_s est l'angle que fait la direction du soleil avec la normal au sol. L'angle zénithal θ_v de visée est celui que fait la direction de visée de l'instrument (satellite) de mesure avec cette normale.

On définit l'azimut du satellite φ_v comme l'angle que fait la direction du satellite projetée au niveau du sol (intersection du plan contenant la normale à la surface et la direction du satellite avec le sol) avec la direction Nord. De la même manière, on définit l'angle azimutal solaire φ_s. L'azimut relatif $\Delta\varphi$ correspond à l'écart (φ_s - φ_v).

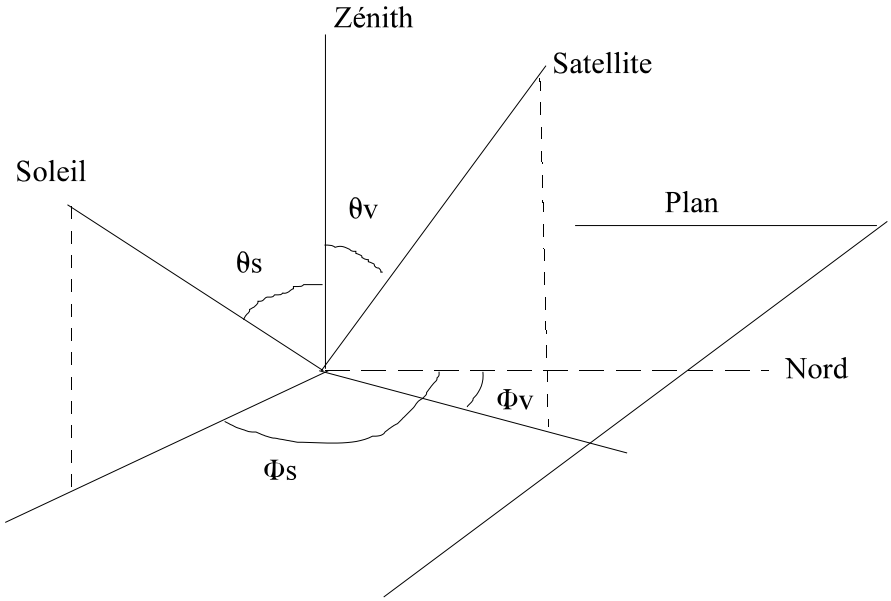


Figure 4.32 : Géométrie d'une mesure de télédétection.

Quantité énergétique. Les ondes électromagnétiques se caractérisent par différentes grandeurs, dont la luminance énergétique L. La luminance $L(\theta,\varphi)$ d'une source non ponctuelle est la puissance par unité

d'angle solide dΩ et de surface apparente dS, émise dans la direction repérée par les angles zénithal θ et azimutal φ :

$$L(\theta,\varphi) = \frac{d^2F}{d\Omega.dS.\cos\theta} \tag{4-25}$$

ou F est la quantité d'énergie émise par une source ponctuelle par unité de temps dans toutes les directions.

On peut définir plusieurs réflectances :

La *réflectance bidirectionnelle* est le rapport entre la luminance réfléchie dans la direction repérée par les angles zénithal et azimutal (θ_v, φ_v) et le flux incident reçu dans la direction (θ_s, φ_s). Lorsque l'on considère le rayonnement solaire, on adopte la notation suivante :

$$\rho_b(\theta_s,\varphi_s,\theta_v,\varphi_v) = \frac{\pi L(\theta_v,\varphi_v)}{E(\theta_s,\varphi_s)\cos(\theta_s)} \tag{4-26}$$

ou $E(\theta_s,\varphi_s)\cos(\theta_s)$ est l'éclairement reçu par une surface horizontale lorsque l'angle zénithal solaire est θ_s.

La *réflectance directionnelle - hémisphérique* notée a_s, est le rapport entre le flux réfléchi dans toutes les directions de l'hémisphère supérieur et le flux incident dans la direction (θ_s,φ_s) :

$$a_s(\theta_s) = \frac{\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2} L(\theta_v,\varphi_v)\cos(\theta_v)\sin(\theta_v)d\theta_v d\varphi_v}{E(\theta_s,\varphi_s)\cos(\theta_v)} \tag{4-27}$$

La *Fonction de Distribution des Réflectances Bidirectionnelles* (FDRB) est déterminée pour un angle zénithal solaire θ_s donné, elle représente l'ensemble des valeurs des réflectances bidirectionnelles pour une surface donnée en fonction de l'angle zénithal de visée θ_v et de l'angle azimutal relatif Δφ.

L'albédo est intégrée sur le spectre solaire et dépend de θ_s. La taille des grains est un des facteurs qui modifient la réflectance de la neige dans le spectre solaire. Il est donc intéressant de comparer la taille mesurée par analyse d'image et la taille optique qui explique les variations mesurées ou modélisées de la réflectance de la neige.

La réflectance bidirectionnelle a été mesurée dans les Alpes par J. Mondet (Mondet 1999) nous l'avons utilisé pour comparer les valeurs mesurées et les valeurs modélisées en fonction du rayon des grains.

On montre sur la *figure 4.33* les valeurs de réflectances bidirectionnelles mesurées au nadir au cours de missions effectuées dans les Alpes par J. Mondet, J.P. Dedieu, et C. Leroux. On peut voir l'influence de la taille des grains sur la réflectance. On montre les résultats du modèle de réflectance utilisé (Thèse C. Leroux, 1996) pour les angles solaires zénithaux θ_s=47° et θ_s=73°.
Les mesures et le modèle sont en accord.

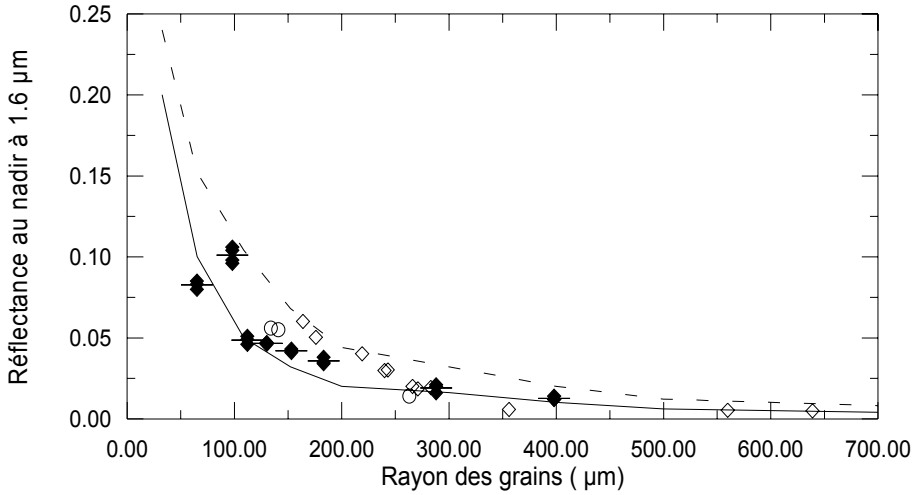


Figure 4.33 : Réflectance de la neige mesurée au nadir en fonction de la taille des grains.
Mesures : ♢ C. Leroux, ❍ J.P Dedieux,
◆ J.Mondet (rayon convexe moyen déterminé par traitement d'images).
Modèle de réflectance : ---- θs = 47°, - - - θs = 73°.

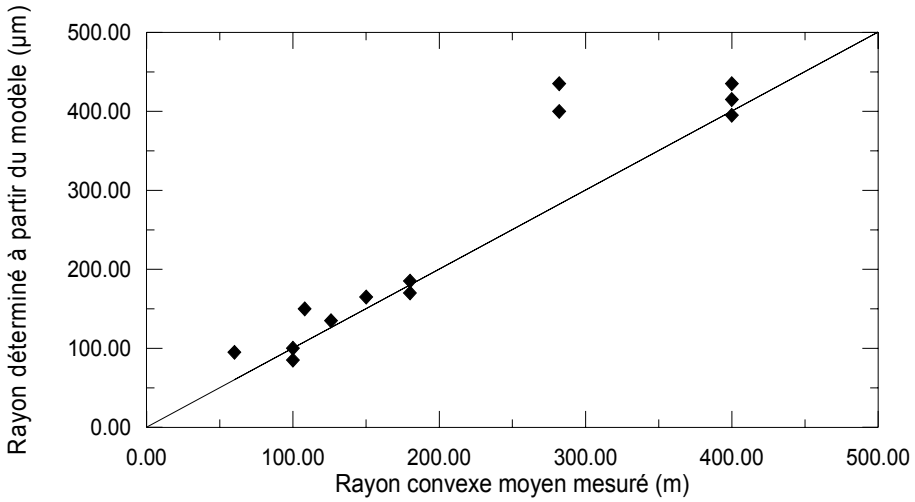


Figure 4.34 : Rayons convexes mesurés en fonction des rayons des particules hexagonales du modèle de réflectance qui produiraient la même valeur de réflectance au nadir pour le même angle d'incidence.

Le *figure 4.34* montre les rayons convexes des grains déterminé par traitement d'images avec le critère p-q+d<=T et T=8, par rapport au rayon déterminé, par interpolation des résultats du modèle, pour les angles solaires supérieurs à θ_s=47°, à partir de la réflectance bidirectionnelles mesurée au nadir et de θ_s.

Il existe une relation d'équivalence entre le rayon convexe des points terminaux du squelette déterminé par traitement d'images 2D des grains de neige et le rayon correspondant dans le modèle de réflectance. Ceci pour la longueur d'onde 1.6 µm, et pour des mesures de la réflectance bidirectionnelles effectuées au nadir. Les rayons des grains estimés par le modèle, à partir des mesures, différent de moins de 50 microns des rayons convexes mesurés exceptés pour une série de mesures de neige fraîche Cela montre que les rayons convexes des points terminaux des grains, à 1.6 µm, est un très bon paramètre, physiquement représentatif du grain, pour justifier les valeurs de réflectance mesurées.

D'une façon plus générale, nous pouvons utiliser les valeurs mesurées des rayons convexes moyen des points terminaux des grains de neige pour déterminer les valeurs de la réflectance bidirectionnelles à l'aide du modèle de réflectance à la longueur d'onde 1.6 µm. Inversement, il est possible d'utiliser le modèle de réflectance pour déterminer, de manière fiable, les tailles de grains de neige à partir des mesures de réflectances bidirectionnelle.

Ceci est un résultat important et justifie une étude systématique des échantillons de grains de neige en différents points de l'Antarctique.

5.2 Analyse des tailles de grain de neige en Antarctique :

Nous présentons dans les pages suivantes les résultats des analyses effectués sur 200 échantillons de grains de neige prélevés au cours de plusieurs campagnes en Antarctique et représentant environ 10000 images. Ceci constitue la première base de données sur les tailles de grains de neige en Antartique.

Nous pouvons grace à ces analyses voir l'évolution des tailles de grains en fonction de la profondeur. Nous constatons que la variation de la taille en fonction des sites est très faible. Ceci est un premier résultat qu'il sera intéressant de comparer ultérieurement avec les résultats du modèle d'évolution du manteau neigeux CROCUS.

6. Conclusion :

Nous avons développé et mis au point une méthode de segmentation des grains de neige basée sur les filtres dérivatifs du premier ordre.

Nous avons ensuite défini et étudié un paramètre représentatif de la taille des grains dans le domaine discret basé sur le contour des grains. Nous avons testé la sensibilité de ce paramètre ou rayon convexe moyen en fonction du nombre de pixels utilisés pour approximer la courbure locale.

Nous avons constaté que ce calcul de rayon convexe moyen est sensible à ce nombre de pixel et que l'erreur sur la valeur de la convexité peut atteindre 50%.

Nous avons proposé et testé une autre approche basée sur le squelette pondéré et la distance de chanfrein. Les tests de sensibilité de cette méthode ont montré que la distance de chanfrein la mieux adpatée au calcul des rayons convexes moyens est la distance $d_{5,7,11}$.

Il est ensuite possible de choisir plusieurs critères d'ébarbulage et plusieurs valeurs du seuil d'ébarbulage. Le choix de ce critère et le choix de ce seuil sont arbitraires. Par contre les tests sur les amas de cercles ont montré que pour des valeurs de seuil variant de 1.8 à 5, l'erreur relative sur le rayon moyen des cercles varie de 1.36% à 5%. Nous avons donc fait le choix de cette méthode par la suite.

Nous avons ensuite étudié plusieurs paramètres représentatifs de la forme des grains et nous avons proposé une traduction nivologique des paramètres étudiés.

Une autre partie concerne la comparaison du rayon convexe moyen mesuré et la taille des particules hexagonales du modèle de réflectance qui produirait la même valeur de réflectance au nadir pour le même angle d'incidence. On constate que les mesures et le modèle sont en accord. Nous concluons que le rayon convexe moyen des points terminaux des grains de neige permet de déterminer la valeur de la réflectance au nadir à 1.6 µm. Inversement si nous connaissons la valeur de la réflectance bidirectionnelle à partir de mesures satellitaires, nous sommes capables de retrouver la taille des grains correspondant et par la suite, l'albédo de la neige qui est un paramètre climatique important.

Dans une dernière partie, nous établissons des cartes de taille de grains de neige en différents points de l'Antarctique ou des prélèvements ont été effectués durant plusieurs campagnes. Il apparait qu'en surface, la taille varie peu. Les profils deviennent différents en profondeur.

1. Introduction :

Nous avons vu au *chapitre II*, la technique (l'épiscopie coaxiale) permettant par une seule prise d'images ou de photographies de visualiser les pores, les monocristaux de glace et les joints de grains dans le névé poreux ou la glace. L'avantage de cette technique par rapport à l'observation par transparence des lames minces de glace est de pouvoir visualiser les bulles. Nous avons vu également que le champ d'acquisition de l'épiscopie coaxiale est limité et qu'il est nécessaire de faire plusieurs acquisitions pour avoir un champ de mesure suffisamment grand.

A partir de plusieurs négatifs photographiques (9 à 25 photographies par niveau), nous avons reconstruit un champ de taille suffisante pour chacun des niveaux de densité (*Fig. 5.1*). Les traits parallèles sur les photographies sont des traces laissées par la lame du microtome lors de l'étape de surfaçage. Nous allons voir comment par différentes étapes de filtrage, il est possible d'obtenir une image binaire nécessaire à l'extraction des paramètres.

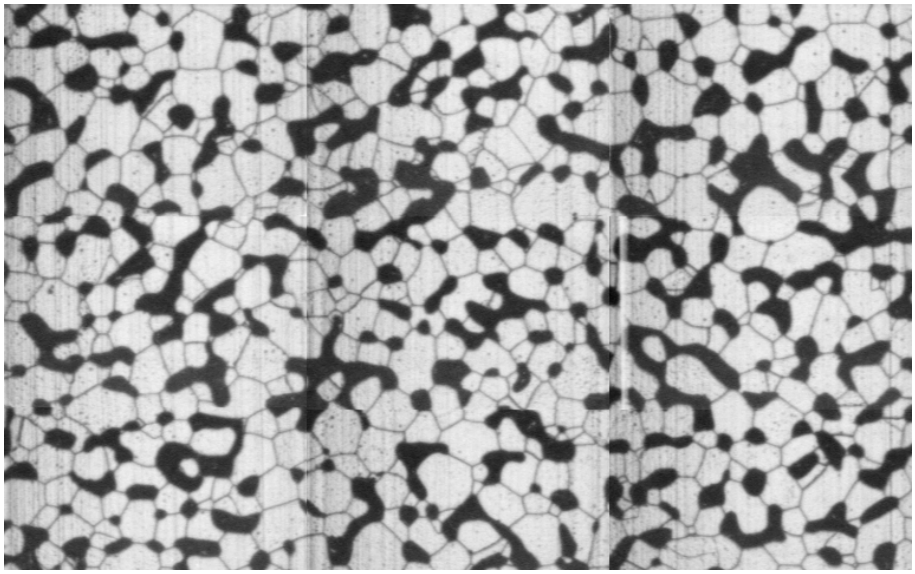


Figure 5.1 : Champ reconstitué composé de 9 photographies contiguës (Km 200).

Les champs sont reconstitués semi-automatiquement. En effet, les documents de base sont des négatifs photographiques pris sur site en Antarctique qu'il a été nécessaire de numériser avec une table lumineuse et une caméra CCD. A partir de là, le plus simple pour reconstituer les champs puisque l'étape manuelle est incontournable, a été de recaler chaque négatif les uns par rapport aux autres grâce à un algorithme semi-automatique.

On peut remarquer que si nous avions eu à notre disposition un système de numérisation automatique des négatifs (exemple : scanner de diapositives), il aurait été plus judicieux d'automatiser complètement la reconstitution des champs, par ajustement de la fonction d'autocorrélation (*Chapitre III*, éq. 3-33).

Ces champs statistiquement représentatifs d'une section 2D de notre milieu constituent les images de micro-structure nécessaires à la paramétrisation et à l'étude systématique de l'évolution du névé.

L'extraction des paramètres à partir des mosaïques d'images nécessite une binarisation des images. Nous allons aborder les étapes de filtrage et de segmentation qui vont permettre le passage d'une image en niveau de gris à une image binaire.

2. Filtrage, et binarisation des images :

Le but du prétraitement de ces images est d'obtenir des image binaires du milieu poreux et des monocristaux de glace. Les images que nous avons numérisées ont des imperfections liées à l'étape de surfaçage et de sublimation. Nous allons d'abord appliquer un filtre linéaire puis un filtre morphologique appelé "transformation chapeau haut de forme".

Le premier filtre linéaire utilisé est la transformée de Fourier discrète qui permet de passer d'une représentation de l'image dans le domaine spatial (coordonnées m,n) à une représentation dans le domaine fréquentiel (coordonnées u,v). La transformé de Fourier rapide (FFT) d'une séquence 2D correspondant au signal discret A[m,n] défini sur Z^2 s'exprime sous la forme :

$$F(u,v) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A[m,n] e^{-2j\pi(mu+nv)} \qquad (5\text{-}1)$$

avec j : variable complexe.

L'utilisation d'un filtre par transformée de Fourier rapide semble naturel pour éliminer les traits de microtome. Ces traits sont des transitions rapides de niveaux de gris dans les directions verticale et horizontale (*figure 5.2 a)*. Ces variations rapides de niveaux de gris dans le domaine spatial se retrouvent sous forme de hautes fréquences dans le domaine fréquentiel dans les directions verticale et horizontale (*figure 5.2 b*). On élimine grâce à un masque (ou filtre) directionnel (*figure 5.2 c)* ces hautes fréquences et par transformée de Fourier inverse, on repasse à une image en niveaux de gris (*figure 5.2d)*. L'avantage de ce type de filtre est d'enlever également les lignes de jonction entre les négatifs d'une même mosaïque.

Il existe deux inconvénients à cette méthode. Le premier est de supprimer les joints de grain qui ont la même direction que les traits de microtome, le second est de ne pouvoir traiter qu'une partie de l'image numérisée. Une étape de vérification et de reprise manuelle de chaque image va permettre de retracer les joints de grains manquant et donc de pallier au premier inconvénient

Le second inconvénient vient de la FFT qui ne peut s'appliquer que sur des images de dimension multiple de 2^n x 2^n avec n entier naturel. Or nous avons des images de dimension 512*768 pixels. Nous avons donc traité des images de 512*512 pixels. Cette dimension d'image comprend un nombre d'objets ou de monocristaux de glace supérieur ou égal à 400, ce qui est suffisant pour avoir une bonne représentativité statistique (cf. *Chapitre III p.51)*.

Les fortes transitions de niveaux de gris de l'image résultat (*figure 5.2d)* ne représentent maintenant que des joints de grains que nous allons pouvoir seuiller grâce à un filtre morphologique.

Nous appliquons un filtre qui s'appelle "transformation chapeau haut de forme" (F. Meyer, 78, J.Serra 82).

$$A(i,j) = \{ x : A(m,n) - O^{\lambda B} A(m,n) \geq t \} \qquad (5\text{-}2)$$

ou A(m,n) représente l'image initiale, $O^{\lambda B}$ représente l'ouverture de l'image initiale par l'élément structurant λB, t le seuil et A(i,j) l'image résultat.

Cette transformation effectue la différence entre l'image initiale et son ouvert par λB, puis sélectionne les sommets en fonction de leur hauteur. Elle est appelée ainsi parce que l'on ne conserve de l'image que les portions entrant dans le chapeau et dépassant son sommet.

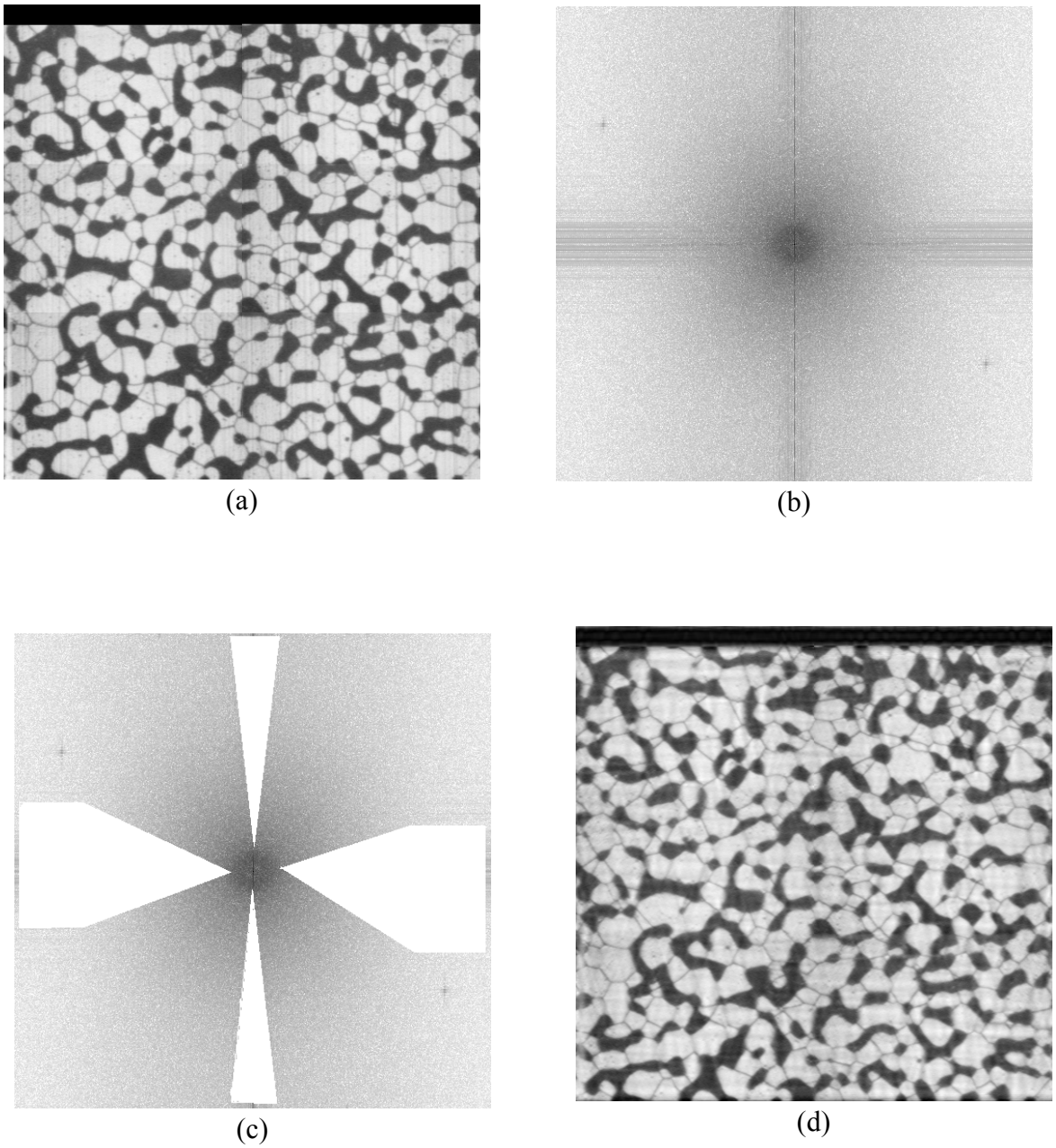


Figure 5.2 Image de névé du site Km200 à 31 mètres de profondeur.

(a) image initiale en niveaux de gris, (b) transformée de Fourier de l'image initiale
(c) transformée de Fourier et masque de filtrage, (d) transformée de Fourier inverse de l'image (c).

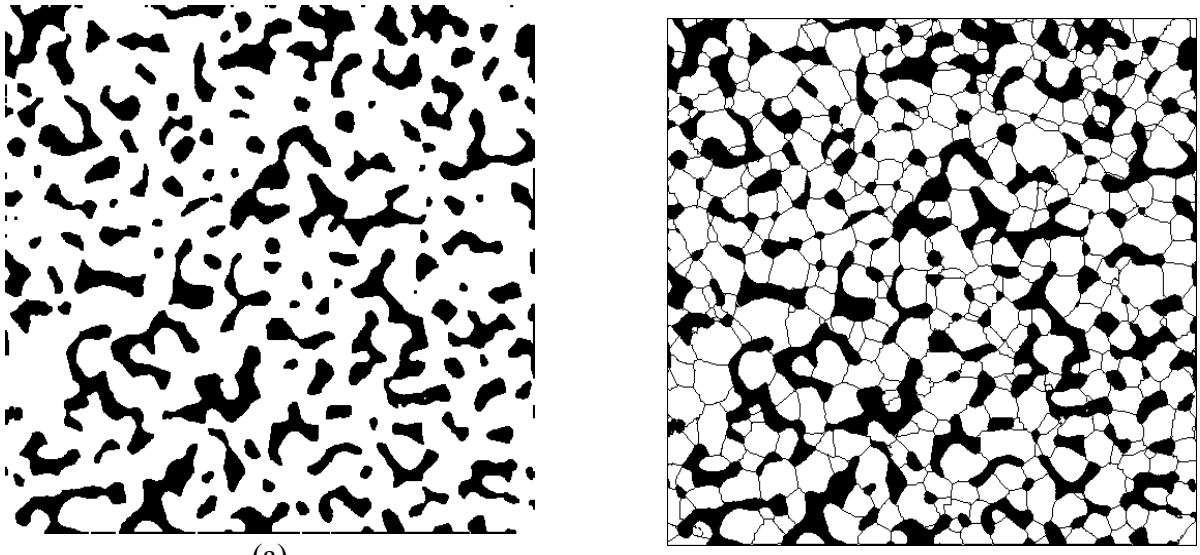
Sur nos images nous ne gardons que les transitions fortes entre les niveaux de gris situées entre deux domaines ayant les mêmes caractéristiques (deux zones de glace par exemple). Ceci va nous

permettre d'obtenir une image binaire représentant les joints de grains. Il suffit alors de squelettisé cette image pour obtenir une matrice de joints de grains d'épaisseur un pixel.

Une étape de seuillage de l'image en niveau de gris permet d'obtenir une image contenant uniquement les pores en noir et la glace en blanc (*figure 5.3 a)*. Ce seuillage est effectué en interactif avec l'utilisateur par superposition de l'image érodée avec l'image initiale de façon à ne pas augmenter artificiellement la zone poreuse ou la zone glace.

L'étape suivante consiste à additionner l'image représentant les pores (en noir) et la glace (en blanc) avec l'image "matrice de joints" que nous avons obtenues précédemment représentant uniquement les joints des cristaux de glace.

La sommation des deux images avec et sans joints de grains permet d'obtenir une image binaire finale représentant les pores (en noir), la glace (en blanc) et les joints séparant chaque cristal (en noir). On montre sur la *figure 5.3 b* l'image binaire obtenue après une vérification visuelle et une éventuelle reprise manuelle de certains joints manquant.



(a) (b)

Figure
5.3 : Image de névé du site Km200 à 31 mètres de profondeur.
(a) image du milieu poreux,
(b) image binaire finale.

3 Etude des paramètres métriques :

La neige qui se dépose à la surface des calottes polaires se transforme en glace. On décrit communément la densification par trois étapes successives, correspondant dans les calottes polaires à trois couches qu'il est convenu d'appeler le neige, le névé et la glace.

Le névé est considéré comme un milieu isotherme. La densification se fait par déformation plastique des zones de contact entre les grains sous l'effet de la charge de la colonne de neige et de névé situé au-dessus. La pression effective locale au niveau des contacts augmente avec la charge moyenne , mais diminue avec l'augmentation du nombre et de la taille des zones de contact. Pour la densification du névé, le transport de matière s'effectue principalement par glissement des dislocations dans le matériau.

La transition névé-glace, dont la densité varie entre 0.8 et 0.84 suivant la température du site, correspond au passage d'un milieu à pores ouverts à un milieu à pores fermés. La profondeur de cette transition varie entre 60 et 120 mètres suivant la température du site, correspondant à des ages de glace variant entre 100 et 2500 ans.

Le dernier stade du processus de densification correspond à la compression des bulles de la glace sous l'effet de la différence de pression entre la matrice glace et l'air des bulles.

Simultanément à ces processus de densification, la taille moyenne des cristaux dans la neige, le névé et la glace augmente avec l'age de la glace. L'augmentation de la taille moyenne est liée au grossissement des grains gouverné par la diminution de la surface totale des joints de grain.

Ce sont ces différents mécanismes de densification et de grossissement de grains que nous allons étudiés à partir de l'évolution des paramètres de structure du névé poreux. Nous essaierons également de déterminer les transitions neige-névé et névé-glace à partir de ces données expérimentales.

.

3.1 Mesure de la porosité :

La mesure de porosité détermine la quantité de la phase poreuse. Dans le cas d'un matériau homogène et isotrope, et si l'on considère une coupe aléatoire dans le matériau alors la valeur de la porosité en 2D, est le rapport : surface des vides/surface totale. Ce rapport est directement représentative de la valeur en 3D.

La valeur en 3D est déduite des mesures de densités par la relation suivante :

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{mes}}{\rho_{gp}} \qquad (5\text{-}3)$$

avec ρ_{gp} densité de la glace pure.

L'analyse d'image permet d'obtenir directement cette valeur à partir des images bidimensionnelles. Une première transformation va permettre d'enlever les joints de grains et ainsi de déterminer l'aire de la fraction surfacique de la phase glace (ou pore). Cette valeur est directement transposable en 3D (Underwood 1970) et représente la fraction volumique de la phase glace (ou pore) $V_v(G)$. La relation suivante permet d'obtenir facilement la fraction volumique de la phase poreuse :

$$A_A(P) = V_v(P) = 1\text{-}V_v(G) = \varepsilon \qquad (5\text{-}4)$$

La porosité est le paramètre qui va permettre de caler les différents seuils du passage de l'image en niveaux de gris à une image binaire. Les mesures systématiques effectuées sur les sites seront la référence de détermination de ces seuils.

On montre sur la *figure 5.4* que la porosité calculée par traitement d'images est supérieure à la

porosité calculée à partir de la mesure de densité. Cette différence est due à l'élargissement de la phase poreuse lors de l'étape de sublimation. On effectue une correction de cette phase poreuse par érosion avec une distance de chanfrein $d_{5\text{-}7\text{-}11}$ (cf *Chapitre II*) pour les images verticales et pour les images horizontales.

On montre sur la *figure 5.4* qu'au-dessus de la valeur de porosité 0.5, même avec une correction de la phase poreuse, la mesure par traitement d'images ne permet de retrouver la valeur de la porosité mesurée. Ceci vient du fait que le champ de mesure est trop réduit, et que la surface des porosités n'est plus représentative. Ceci signifie également que si l'on veut étudier les pores pour des valeurs de la porosité allant de 0.5 à 0.7, il est nécessaire d'agrandir le champ de mesure.

Une étude de sensibilité à l'érosion de la surface des monocristaux et des pores montre qu'entre les deux images, la différence de la taille moyenne est inférieure à 5% pour les grains et pour des porosités supérieures à 0.1.

Nous avons donc un biais systématique que nous pouvons corriger mais qui n'affectent que très peu les paramètres que l'on va déterminer sur les monocristaux de glace. Pour la suite de cette étude et pour les monocristaux de glace, les paramètres seront déterminés à partir des images binaires non modifiées, et la valeur de la porosité sera prise égale à celle obtenue à partir de la mesure de la densité.

L'étude des pores sera par contre réalisée après érosion de cette phase poreuse avec la distance de chanfrein 5-7-11.

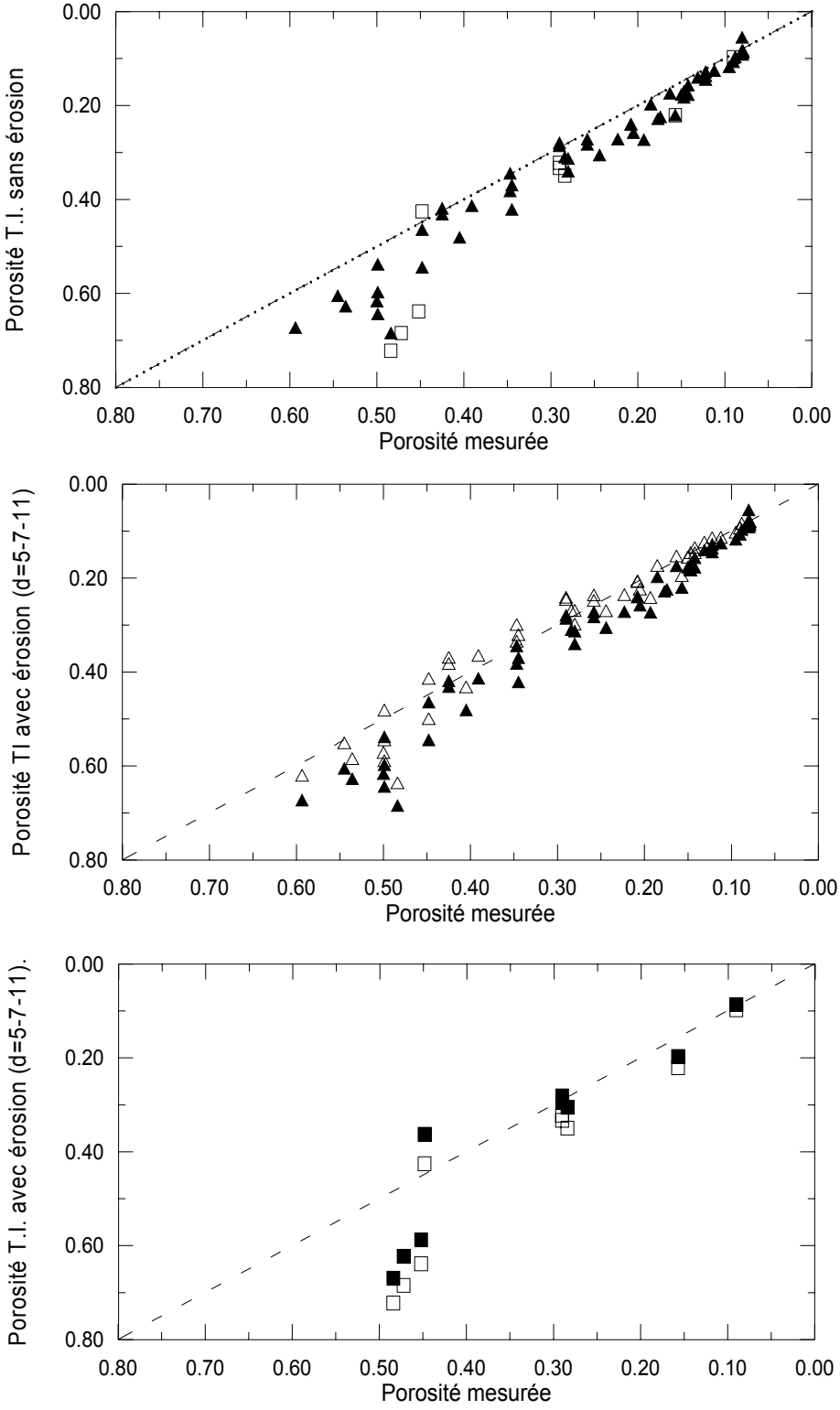


Figure 5.4 : Profils de la porosité obtenue par traitement d'images en fonction de la porosité calculée à partir de la mesure de densité. Site Vostok (Bh7).

▲ images verticales initiales, ❑ images horizontales initiales.
⌂ images verticales corrigées, ■ images horizontales corrigées.

3.2 Evolution des paramètres spécifiques à la modélisation

La modélisation de la densification, de la fermeture des pores, et de la diffusion des gaz dans le névé nécessitent une description spécifique du névé. Au cours d'un premier travail, toutes les images n'ont pas pu être analysées faute de temps, on propose ici de compléter et d'affiner cette étude. Nous allons expliciter le calcul et les évolutions en fonction de la densité relative de différents paramètres déterminés à partir des images 2D.

Surfaces spécifiques : Sv(g-p) ; Sv(g-g) ; β

Les surfaces spécifiques sont des paramètres ayant une signification physique en 3D. Elles se calculent à partir des images 2D, représentent la surface d'une phase par unité de volume du matériau. On peut les obtenir à partir du nombre d'intersection linéique P_L (Underwood 1970) avec les interfaces concernées (grain-grain ou glace-pore) :

$$S_v = 2\ P_L \tag{5-5}$$

La surface spécifique S_v (g-p) représente l'aire de la surface de séparation entre la phase solide (glace) et la phase poreuse par unité de volume du matériau. A une porosité donnée, S_v(g-p) est directement proportionnel à la dispersion de la phase poreuse dans la matrice glace. S_v (g-p) est directement impliqué dans l'évolution des contacts grain-pore. S_v (g-p) est un indicateur de la forme des porosités dans la matrice glace. S_v (g-p) permet de suivre l'évolution morphologique de la phase poreuse du matériau lors de la densification et la fermeture des pores (Fischmeister 1975 ; Chermant et al. 1981).

$$S_v\ (g\text{-}p) = 2\ P_L\ (g\text{-}p) \tag{5-6}$$

L'analyse réalisée prend en compte deux directions, l'une horizontale P_{LX}(g-p) et l'autre verticale P_{LY}(g-p) *(Fig. 5.5)*.

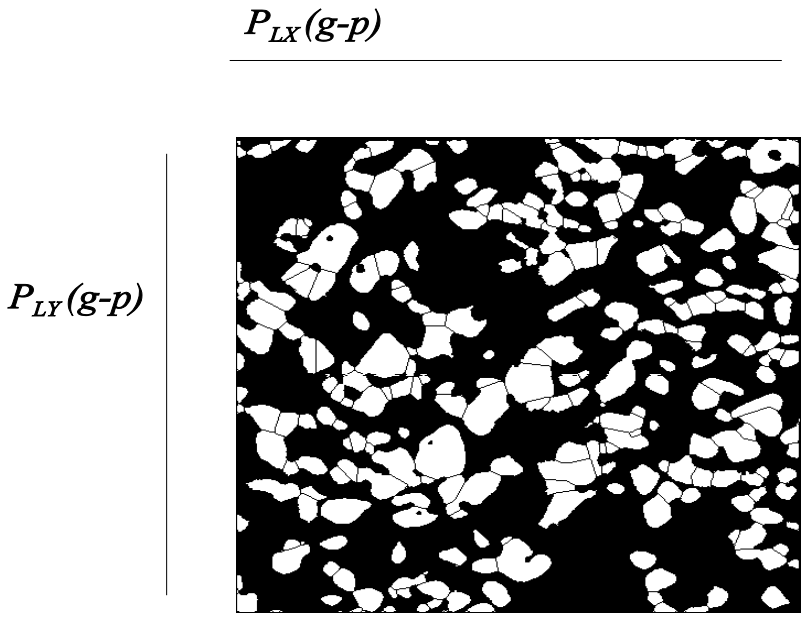


Figure 5.5 : Coupe verticale de Vostok (Bh7).

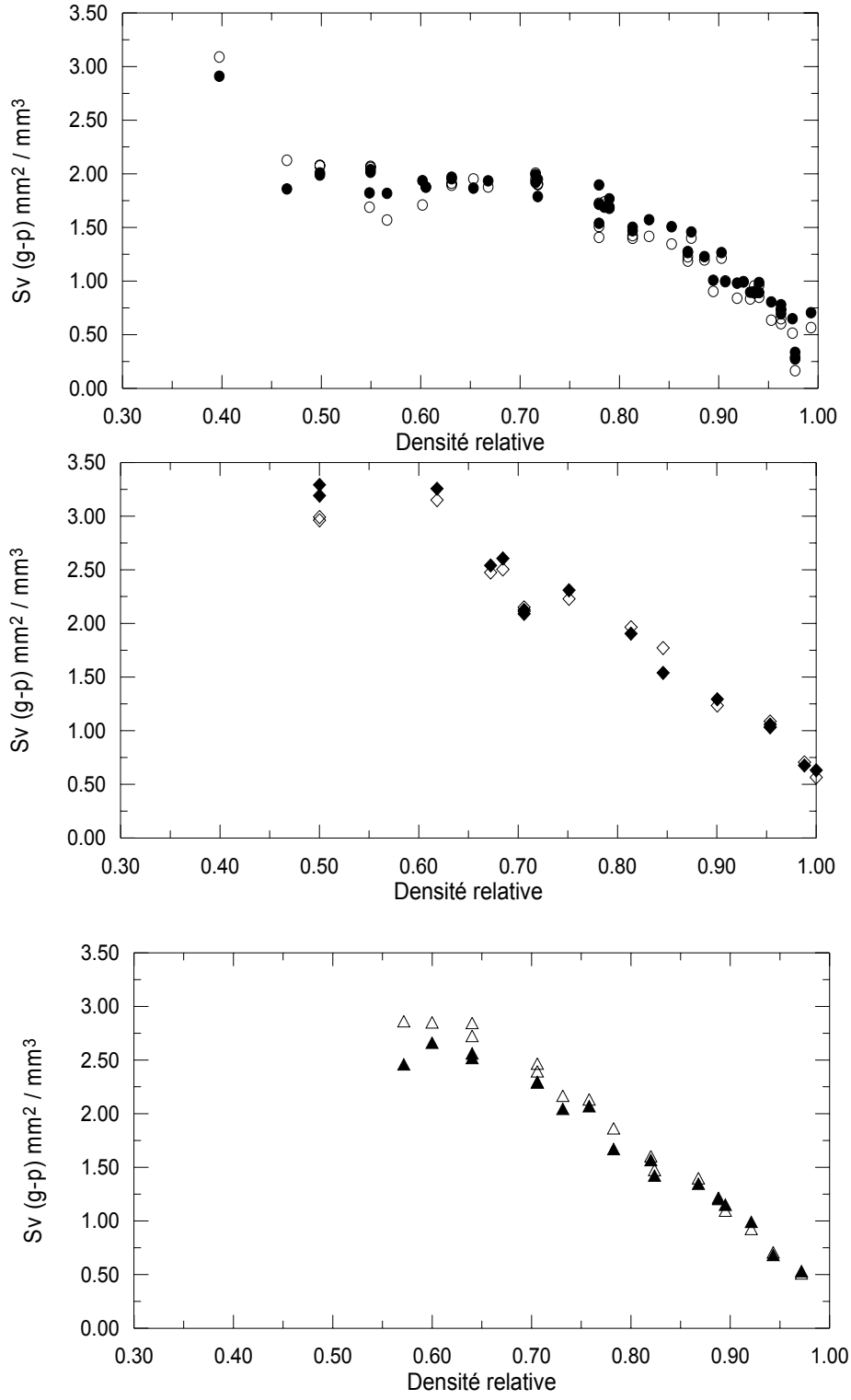


Figure 5.6 : Surface spécifique des interfaces glace-pore Sv(g-p) en fonction de la densité relative.
● Vostok (Bh7) analyse selon x, ❍Vostok (Bh7) analyse selon y.
♢ Km 105 analyse selon x ♢ Km 105 analyse selon y.
▲ Km 200 analyse selon x, ⌂ Km 200 analyse selon y.

La surface spécifique S_v (g-g) représente l'aire de la surface des grains en contact avec d'autres grains par unité de volume du matériau (*Fig. 5.7)*. Comparée à la surface spécifique glace-pore, il existe un facteur 2 lié au fait que la surface de séparation appartient systématiquement à deux grains. Une première comparaison des résultats bruts permet de montrer que quelque soit la direction d'analyse il n'existe pas de différence significative, ce qui permet de conclure que nous n'avons pas d'anisotropie de la structure.
S_v (g-g) peut être modifié par le grossissement des grains et par la densification dans le névé et uniquement par le grossissement des grains dans la glace.

$$S_v\,(g\text{-}g) = 4\,P_L\,(g\text{-}g) \tag{5-7}$$

β est un paramètre sans dimension, qui caractérise le degré de contact entre les grains et présente un intérêt pour l'étude de la densification. Dans le cas du névé, la densification se produit par déformation plastique des zones de contact entre les grains, β sera donc un bon indicateur des modifications de la structure engendré par la densification (*Fig.* 5.8). Il est directement liée à la charge effective c'est à dire au rapport de la charge totale/ % de surface de contact.

$$\beta = \frac{S_v(g-g)}{S_v(g-g)+S_v(g-p)} \tag{5-8}$$

La formule qui permet de passer de la densité mesurée sur site à la densité relative est :

densité relative = ρ/ρ_{glace}

$$\rho_{glace} = \rho_0(1-\alpha T) \tag{5-9}$$

avec α = 1.54 E-4, ρ_0 = 0.9165, et T en degré Celsius.

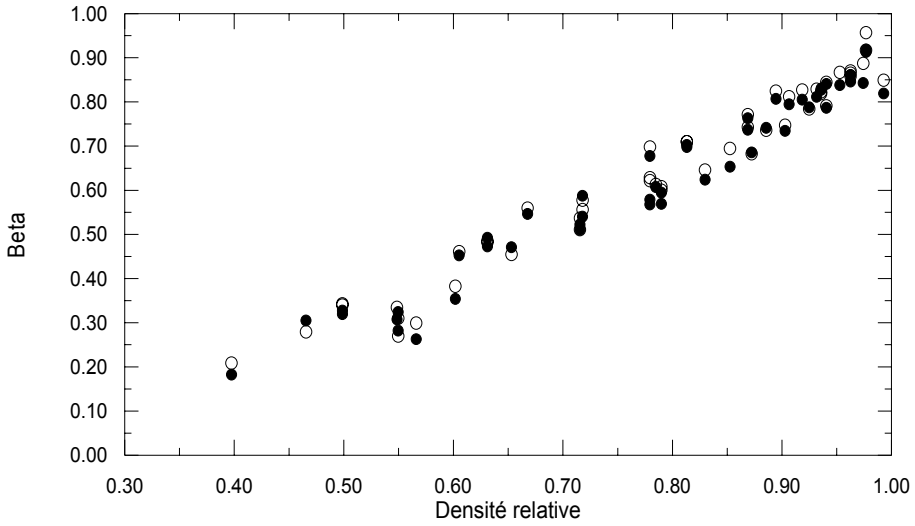


Figure 5.8 : β en fonction de la densité relative.
● Vostok (Bh7) analyse selon x, ❍ analyse selon y.

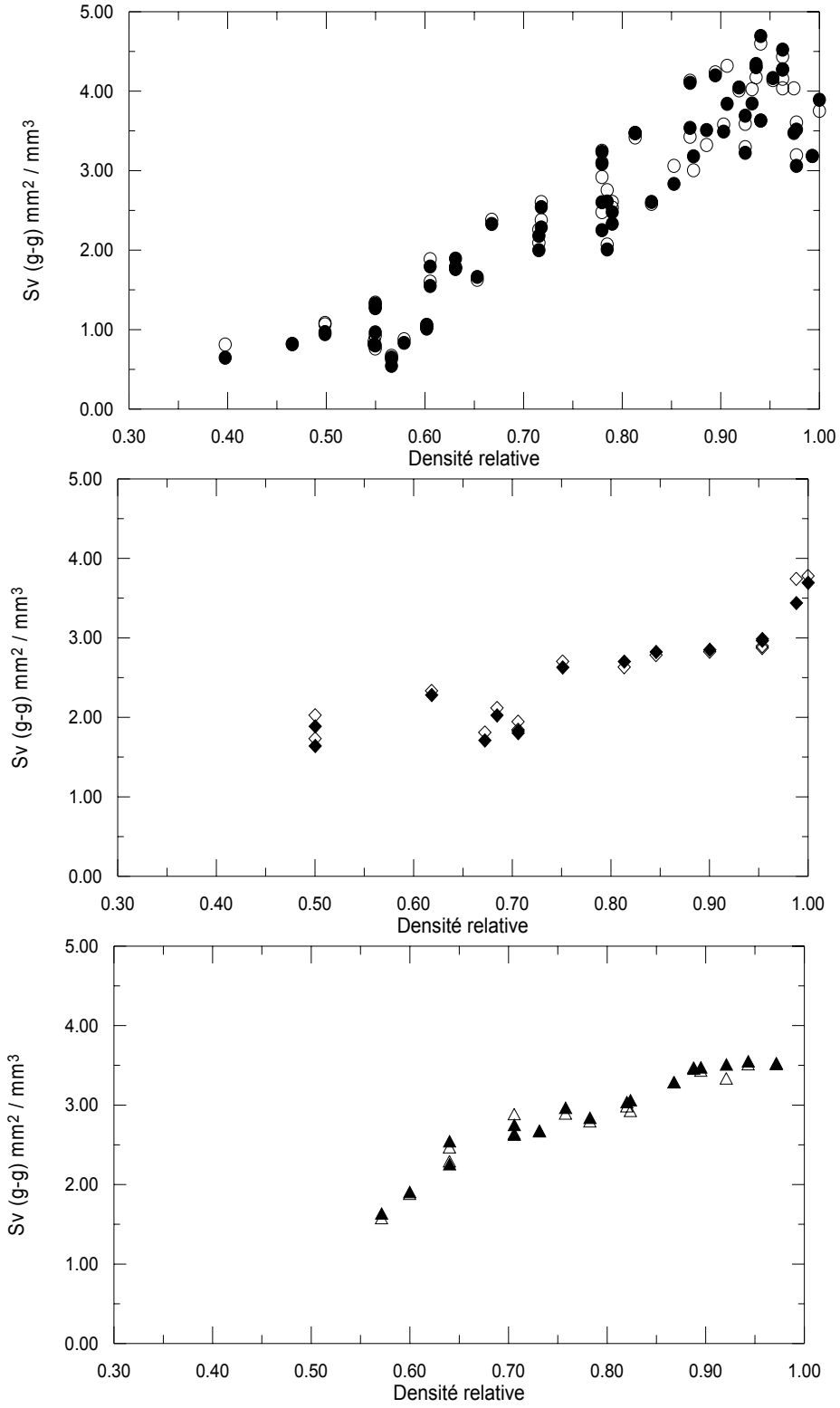


Figure 5.7 : Surface spécifique des interfaces glace-glace Sv(g-g) en fonction de la densité relative.

● Vostok (Bh7) analyse selon x, ❍Vostok (Bh7) analyse selon y.
♢ Km 105 analyse selon x ♢ Km 105 analyse selon y.
▲ Km 200 analyse selon x, ⌂ Km 200 analyse selon y.

Nombre de coordination 3D : Z_{3D} correspond au nombre moyen de voisins par grain. Le nombre de coordination 3D n'est pas un paramètre directement issu des mesures brutes sur les sections ; il nécessite l'utilisation d'un modèle basé le plus souvent sur une géométrie donnée du grain (Underwood 1970, Kry 1975). Le nombre de coordination calculé dans cette étude est évalué à partir du modèle de Alley (Alley 1986).

Nombre de pores par grain : $N_{p/g}$ est le rapport en 3D du nombre de pores (ou de bulles dans la glace) $N_v(p)$ sur le nombre de grains $N_v(g)$. Ce calcul nécessite l'estimation de $N_v(p)$ et $N_v(g)$ à partir des relations stéréologiques. Ces relations (Underwood 1970) s'appuient sur des hypothèses très fortes : une seule taille et une seule géométrie des objets. Nous supposons dans notre cas, que les monocristaux ont la taille et la géométrie du monocristal moyen : l'octaèdre tronqué. Dans ce cas, $N_v(g)$ s'écrit :

$$N_v(g) = 0.744 \ \frac{N_A(g)^2}{N_L(g)} \tag{5-13}$$

avec $N_A(g)$: nombre de grains dans la section en mm², et $N_L(g)$: nombre d'intersections linéiques avec un grain soit :

$$N_L(g) \ = \frac{2P_L(g-g)+P_L(g-p)}{2} \tag{5-14}$$

La géométrie des pores varie du cylindre pour les porosités dans la zone de fermeture jusqu'à la sphère pour les bulles dans la glace. Le facteur de forme permettra de définir les limites d'utilisation de chacune des géométries. Les relations stéréologiques s'écrivent respectivement pour le cylindre et pour la sphère :

$$N_v(p) = 0.732 \frac{N_A(p)^2}{N_L(p)} \tag{5-15}$$

$$N_V(p) = \frac{\pi}{4} \frac{N_A(p)^2}{N_L(p)} \tag{5-16}$$

Ce paramètre $N_{p/g}$ est utilisé dans le modèle de fermeture des pores (Thèse L. ARNAUD) pour contraindre le paramètre libre du modèle. $N_{p/g}$ est intéressant que s'il est mesuré dans la zone de fermeture des pores, et dans ce cas, on peut l'utiliser pour faire des comparaisons entre les sites.

La *figure 5.9* montre la variation de ce paramètre avec l'équation du cylindre (5-14) en fonction de la densité relative pour le site de Vostok (Bh7). On constate pour ce site et pour l'ensemble des données à notre disposition, qu'on ne peut rien dire sur l'évolution du nombre de pores par grain dans la zone de fermeture des pores. De plus, la variabilité de ce paramètre est très importante et il est difficile de dégager une valeur moyenne.

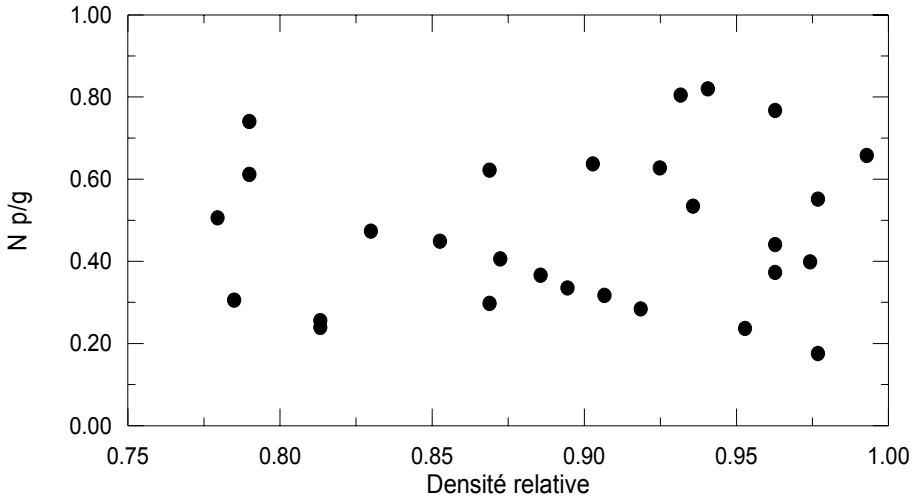


Figure 5.9 : $N_{p/g}$ en fonction de la densité relative, site Vostok (Bh7).

Proportion du nombre de cotés des grains en contact avec un pore : k_{2d}

k_{2d} représente en 2D la traduction la plus proche du paramètre libre du modèle de la fermeture des pores, il correspond au rapport du nombre de cotés partagé avec un pore sur le nombre total de cotés.

k_{2d} se calcule à partir de Z_{2d} et f_{2d}.

Z_{2d} est égal au nombre de voisins pour chacun des grains dans une section 2D, ce qui est équivalent au nombre de contacts grain-grain par grain.
f_{2d} comptabilise toutes les faces de chacun des grains dans la coupe 2D, en considérant comme une face un contact avec un autre grain ou un pore. Lorsque la densité devient trop faible, f_{2d} n'a plus de signification, car l'équivalence un pore/ une face n'est plus valable. La valeur de la densité limite est prise empiriquement égale à 0.7.

$$k_{2d}=\frac{(f_{2d}-Z_{2d})}{f_{2d}} \tag{5-17}$$

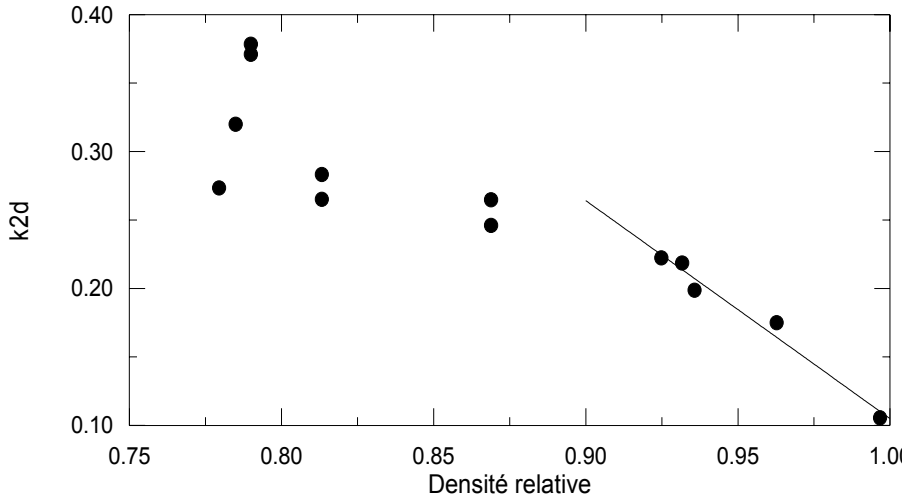


Figure 5.10 : k_{2d} en fonction de la densité relative à Vostok (Bh7).

Dans sa thèse (p.154), L. Arnaud

(1997) utilise dans le modèle de fermeture des pores dans le névé un paramètre libre qui représente la proportion des arêtes d'un grain occupé par une pore noté k.
Il optimise ce paramètre k pour chacun des sites étudiés, afin de retrouver la valeur de la densité moyenne à la fermeture des pores donnée par la mesure de teneur en gaz.

Il vérifie ensuite directement que sur la structure du névé dans la zone de fermeture varie suivant les sites de façon cohérente avec les variations de k. La première préoccupation étant de trouver un paramètre 2D le plus proche possible de la définition de k, afin de vérifier si éventuellement les variations de k étaient directement observables sur les images des structures 2D. Il en déduit les valeurs moyennes de k_{2D} sur la zone de fermeture de chacun des sites résumées dans le tableau suivant :

Site	ρ_f	k	k_{2D}
Vostok	0.840	0.380	0.219
Km200	0.830	0.450	0.259
Km105	0.822	0.465	0.272

Tableau 5.1 : Variations comparées des paramètres k (modèle) et k_{2D} (structure du névé).

L'analyse d'un complément d'images, permet de voir sur la *figure 5.10* une variation non linéaire de k_{2D} avec la densité relative. La rupture de pente entre les deux droites se situe à la valeur de la densité relative (0.91) de la fin de la fermeture des pores (close-off). La valeur de k_{2D} correspondant est de 0.238.

En reportant les valeurs moyennes de k_{2D} du tableau 5.1 en fonction de la densité et cette nouvelle valeur 0.238 pour Vostok, on constate sur la *figure 5.10bis* qu'avec $k_{2D} = 0.238$ on a une relation linéaire entre k_{2D} et la densité.

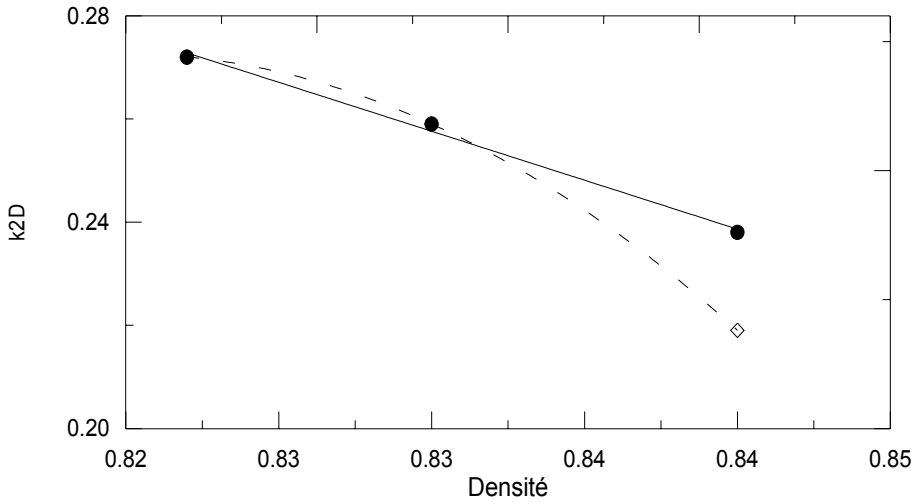


Figure 5.10bis : Variation du paramètre k_{2D} en fonction de la densité.
♢ valeurs k_{2D} du tableau 5.1.
● valeurs avec $k_{2D} = 0.238$ à Vostok.

Nous avons mis en évidence directement sur les mesures de structure, les différences de k_{2D} entre les sites. Il semble que l'on puisse directement obtenir la valeur de la densité à la fermeture des pores (close-off) à partir des données de structure. Ces résultats qui nécessitent d'autres analyses pour être parfaitement établie nous montrent directement la variation linéaire de k_{2D} en fonction de la densité.

3.3 Conclusion :

Nous avons exposé ici un ensemble de données et de paramètres dont l'objectif est de fournir l'information nécessaire pour l'étude du grossissement des grains, pour la modélisation de la densification du névé et pour la modélisation de la fermeture des pores. Ces données ont été utilisées dans la thèse de L. ARNAUD pour caler ces différents modèles. On donne en annexe 3, une publication relative au modèle de densification du névé polaire.

Cette étude de la structure du névé polaire est la première réalisée grâce à l'acquisition de ce nouvel outil de traitement d'images que j'ai acheté et développé au laboratoire. Cette méthode d'analyse a été également réalisée dans la glace profonde, notamment pour l'étude du grossissement des grains.

Les données analysées pour le grossissement des grains dans le névé (thèse L. ARNAUD) étaient insuffisantes d'après les premières analyses. Il est donc intéressant de compléter ces données pour pouvoir augmenter la définition des histogrammes de taille de grains et par conséquent d'effectuer une étude plus fine des variations de la distribution de la taille relative des grains en fonction de la densité relative.

4 Etude du grossissement des grains :

Cette étude a pour but d'étudier l'évolution de la taille moyenne des grains en fonction des données expérimentales et de déterminer la loi de croissance des grains dans le névé poreux. A partir de ces données et de la loi de croissance, on regardera l'influence du milieu poreux sur l'évolution de cette loi. Une étude exhaustive des distributions de la taille relative des grains sera l'occasion de comparer les résultats obtenus à partir de microstructures et les distributions théoriques.

Ces résultats seront comparés à un modèle théorique du grossissement des grains et à une simulation numérique.

L'ensemble de ces données et ces considérations serviront de base pour fournir des données 3D utilisées par L. ARNAUD dans le modèle de fermeture des pores du névé.

4.1 Définition de la taille moyenne et influence sur la loi de croissance :

De nombreuse études montrent que l'augmentation de la taille moyenne est due au grossissement normal des grains associé à une diminution de l'énergie liée aux joints de grains (Gow 1969; Duval et Lorius 1980; Alley et al. 1982; Duval A985; Alley et Bentley 1988). La loi de croissance de la taille moyenne des monocristaux (R) de glace en fonction du temps (t) s'exprime sous la forme :

$$R^2 = R_0^2 + Kt \tag{5-18}$$

avec K : vitesse du grossissement des grains (fonction d'Arrhénus de la température).
R_0 : taille moyenne des grains extrapolée à la surface.

La taille moyenne des monocristaux de glace est définie à partir du nombre de monocristaux présents sur une surface de glace donnée, et le paramètre le plus utilisé en glaciologie est l'aire moyenne (A). Cette aire moyenne peut être calculée de plusieurs façons. Cette aire moyenne est calculée à partir des 50 plus gros grains présents sur une lame (Gow 1969), cela représente au moins 25% des cristaux de la section analysée. Cette majoration de l'aire moyenne mesurée s'explique par le fait que statistiquement une section aléatoire ne coupe pratiquement jamais les cristaux suivant leur diamètre maximum.

Alley (1986) utilise les résultats de la stéréologie (Undewood 1970) pour calculer l'aire moyenne correspondant à l'aire moyenne projetée (πR^2 dans le cas des sphères) à partir de l'aire mesurée moyenne. En faisant l'hypothèse d'un matériau composé de grains sphérique de même rayon, il propose d'utiliser la formule suivante (Fullman 1953) :

$$\overline{A} = \frac{3}{2}\,\overline{A_{mes}} \qquad (5\text{-}19)$$

Si maintenant on suppose que les grains sont des octaèdres tronqués, cette relation s'écrit :

$$\overline{A} = \frac{6.696}{3.77}\,\overline{A_{mes}} = 1.776\,\overline{A_{mes}}$$

A_{mes} : aire moyenne calculée à partir de tous les grains présents sur la lame.

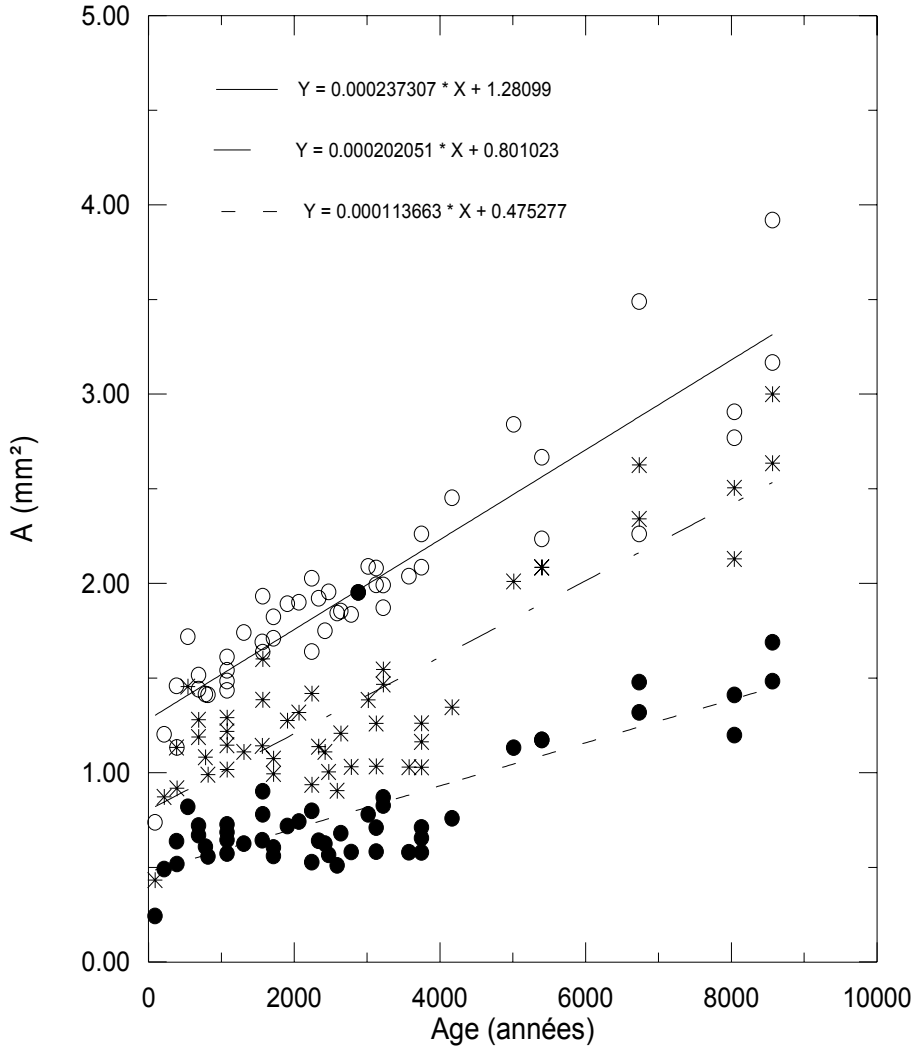


*Figure 5.11 :*Evolution de la taille des monocristaux de glace en fonction du temps à Bh7 dans le névé pour trois paramètres de taille différents.

Dans la gamme de profondeur étudiée, la

❍ 50 plus gros grains présents dans la section
✳ aire moyenne projetée calculée à partir de l'équation 5-19
● 100% des grains présents dans la section

croissance de la surface des grains (R^2 ou A) est linéaire en fonction du temps et on peut écrire :

$$\overline{A} = \overline{A_0} + Kt \qquad (5\text{-}20)$$

avec K vitesse de croissance des grains (en mm^2/an).

Les régressions linéaires de la *figure 5.11* sont effectuées sur toutes les données glace et névé. Ces régressions permettent de calculer les vitesses de croissance globale (pente des régressions linéaires) dans le névé et la glace. On montre l'influence du choix du paramètre caractérisant la taille moyenne sur la détermination de la vitesse de grossissement. Ainsi selon que l'on travaille avec l'aire moyenne projetée ou les 50 plus gros grains, la vitesse de grossissement des grains à Vostok (Bh7) varie de 1.1 10^{-4} mm²/an à 3.2 10^{-4} mm²/an. Ceci montre l'importance à accorder à la méthode de mesure lorsqu'on désire comparer des vitesses de croissance.

On montre sur la *figure 5.12* les données analysées pour les trois sites km105, Km200, et Vostok (Bh7). Nous pouvons déduire de ces graphes, les variations de la vitesse de grossissement des grains en fonction du paramètre utilisé (*tab. 5.2)*.

Site	Km105	Km200	Vostok (Bh7)
Vitesse de croissance 25% plus gros grains (10^{-4} mm² an^{-1})	105	71	3.2
Vitesse de croissance 50 plus gros grains (10^{-4} mm² an^{-1})	104	65	2.3
Vitesse de croissance 100% grains (10^{-4} mm² an^{-1})	39	28	1.1
Vitesse de croissance 100% grains x 1.776 (10^{-4} mm² an^{-1})	**69**	**49**	**1.9**
Température moyenne annuelle (°C)	-24	-30	-57
Surface initiale (mm²)	0.59	0.52	1.03

Tableau 5.2 : Vitesse de croissance et surfaces initiales des grains déterminées à partir de l'évolution de la taille des grains en fonction du temps.

Ces vitesses sont visiblement fonction de la température moyenne annuelle à la surface du site. La variation de cette vitesse en fonction du paramètre choisi va dans le même sens quel que soit le site choisi.

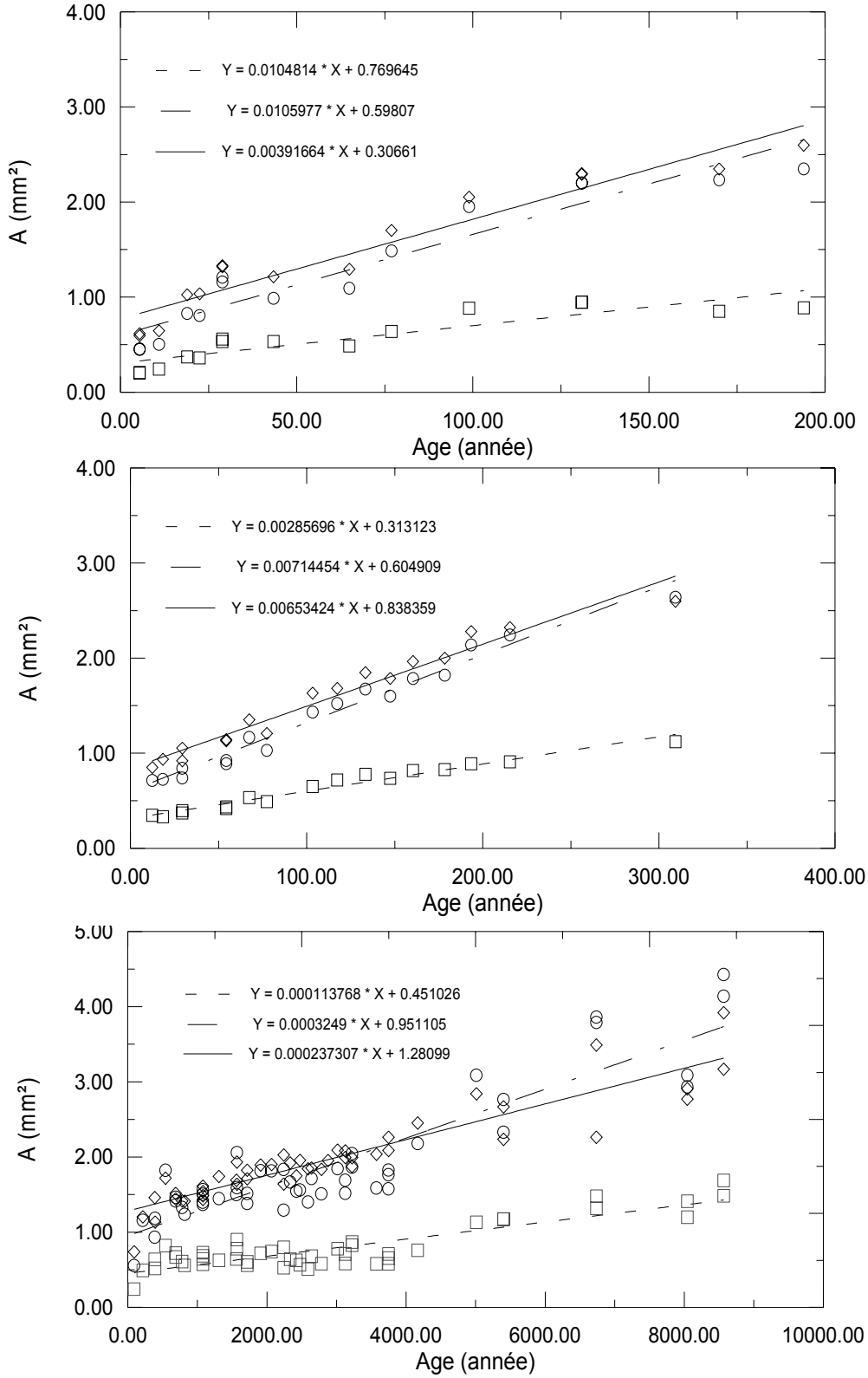


Figure 5.12 : Evolution de la taille des grains de neige en fonction de l'age pour trois sites km105, Km200, et Vostok (Bh7).
♢ 50 des plus gros grains présents sur la section.
❍ 25% des plus gros grains présents sur la section.
❑ 100% des grains présents sur la section.

4.2 Lois de croissance

parabolique :

La relation générale décrivant le grossissement des grains est de la forme :

$$v = M P \tag{5-21}$$

ou M : est la mobilité intrinsèque du joint de grain.
P : est la force motrice de migration du joint de grain (Higgins 1974).

Il existe de nombreuse théories pour déterminer l'expression de la force motrice pour un matériau pur. La forme utilisée par Alley (1986) suppose que l'énergie de surface du joint est liée à son rayon de courbure et que le joint migre vers son centre courbure pour réduire son aire et donc son énergie. Ceci suppose qu'il n'y a pas de force de résistance (pas de micro-particules, de bulles, ou d'impuretés dissoutes dans le matériau) alors P est proportionnel à la courbure du joint :

$$P = \frac{2\gamma}{R} \tag{5-22}$$

avec γ : énergie du joint de grain.
R : rayon de courbure en faisant l'hypothèse que la courbure est assimilable à une portion de sphère.

Hillert suppose que l'équation peut s'appliquer en volume dans le matériau et la vitesse s'écrit alors :

$$v = \frac{dR}{dt} \tag{5-23}$$

et il arrive à la relation :

$$\frac{dR}{dt} = \frac{K}{2R} \tag{5-24}$$

et après intégration :

$$R^2 = R_0^2 + Kt \tag{5-25}$$

On retrouve bien la loi de croissance expérimentale observée dans le névé et la glace en R^2, linéaire avec le temps.

4.3 Loi de croissance dans le névé poreux :

Le névé est un réseau poreux interconnecté dont le volume diminue et la structure évolue avec le temps (densification). Il est donc intéressant de regarder l'influence de ce réseau sur la loi de croissance des grains. On montre sur la *figure 5.12* la loi de croissance dans le névé et dans la glace (Duval 1980).

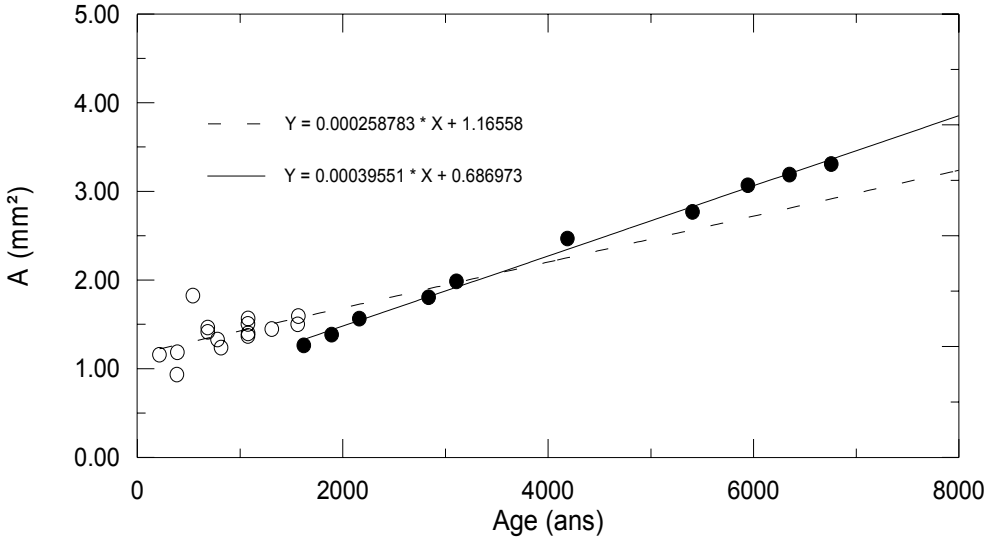


Figure 5.12 : Evolution de la surface moyenne des grains (25% des plus gros grains) en fonction du temps. Comparaison entre le névé poreux et la glace.
! glace (Duval 1980).
" névé poreux.

La valeur de la vitesse de grossissement obtenue dans le névé très poreux : $2.58*10^{-4}$ mm² an^{-1} à Vostok (Bh7) est du même ordre de grandeur que celle obtenue dans la glace (Duval et Lorius 1980) : $3.95\ 10^{-4}$ mm² an^{-1}. Nous avons la même forme de loi de croissance en $A = A_0+Kt$. Ces résultats sont en encore avec les travaux de Gow sur le grossissement des grains dans le névé (Gow 1969 et 1971) et ceux de Duval et Lorius (1980) dans la glace qui proposent la même loi expérimentale ($R^2=R_0^2+Kt$) et des vitesses de croissance en fonction de la température similaires dans les deux domaines.

4.4 Distribution de la taille des monocristaux dans le névé et la glace :

L'objectif de ce paragraphe est de présenter tous les résultats expérimentaux 2D concernant la distribution relative de la taille des grains, ainsi que leur évolution en fonction de la densité relative et du site étudié. A partir de ces résultats sur le névé, nous essayerons d'établir les liens avec les théories classiques du grossissement des grains faisant intervenir les notions de distribution de taille. L. ARNAUD a établie dans sa thèse que la fonction de distribution des histogrammes de taille relative des grains pouvait être soit une distribution de Weibull, soit une distribution log-normal. Grâce à une meilleure définition des histogrammes, nous allons essayer de mieux ajuster cette fonction de distribution. Ces résultats théoriques permettent de représenter synthétiquement la distribution de la taille des grains dans le névé polaire et son évolution avec la densité, ce qui rend son incorporation plus facile dans le modèle de fermeture des pores du névé.

Distributions expérimentales en fonction de la densité :

Les comparaisons et les modélisations théoriques (Anderson 1989) utilisent comme paramètre le rayon issu de l'aire du monocristal supposé circulaire dans la section :

$$R(g_i) = \sqrt{\frac{A(g_i)}{\pi}} \tag{5.26}$$

Le traitement d'images permet de déterminer l'aire de chaque grain A(gi) présent dans la section. On assimile cette aire à un disque, on peut alors calculer le rayon moyen noté R_{moy}. La taille relative correspond à Ri normée par Rmoy.

Nous avons déterminé pour l'ensemble des photographies prises sur les trois sites Bh7, Km105,et Km200, et pour l'ensemble des champs disponibles les histogrammes représentant la distributions des tailles relatives aux différentes profondeurs.

On montre sur les *figures 5.13 a, b, c, d, e* les histogrammes de la taille des grains du site de Vostok (Bh7). Les distributions analysées présentent une position du maximum inférieure à la taille moyenne ($R/R_{moy} = 1$). Les fréquences augmentent rapidement pour les classes des petits grains jusqu'à une profondeur de 85 mètres et une densité relative de 0.885. Au delà de 85 mètres les fréquences des classes des plus petits grains deviennent plus importantes, et décroissent plus lentement pour les grains de tailles supérieures.

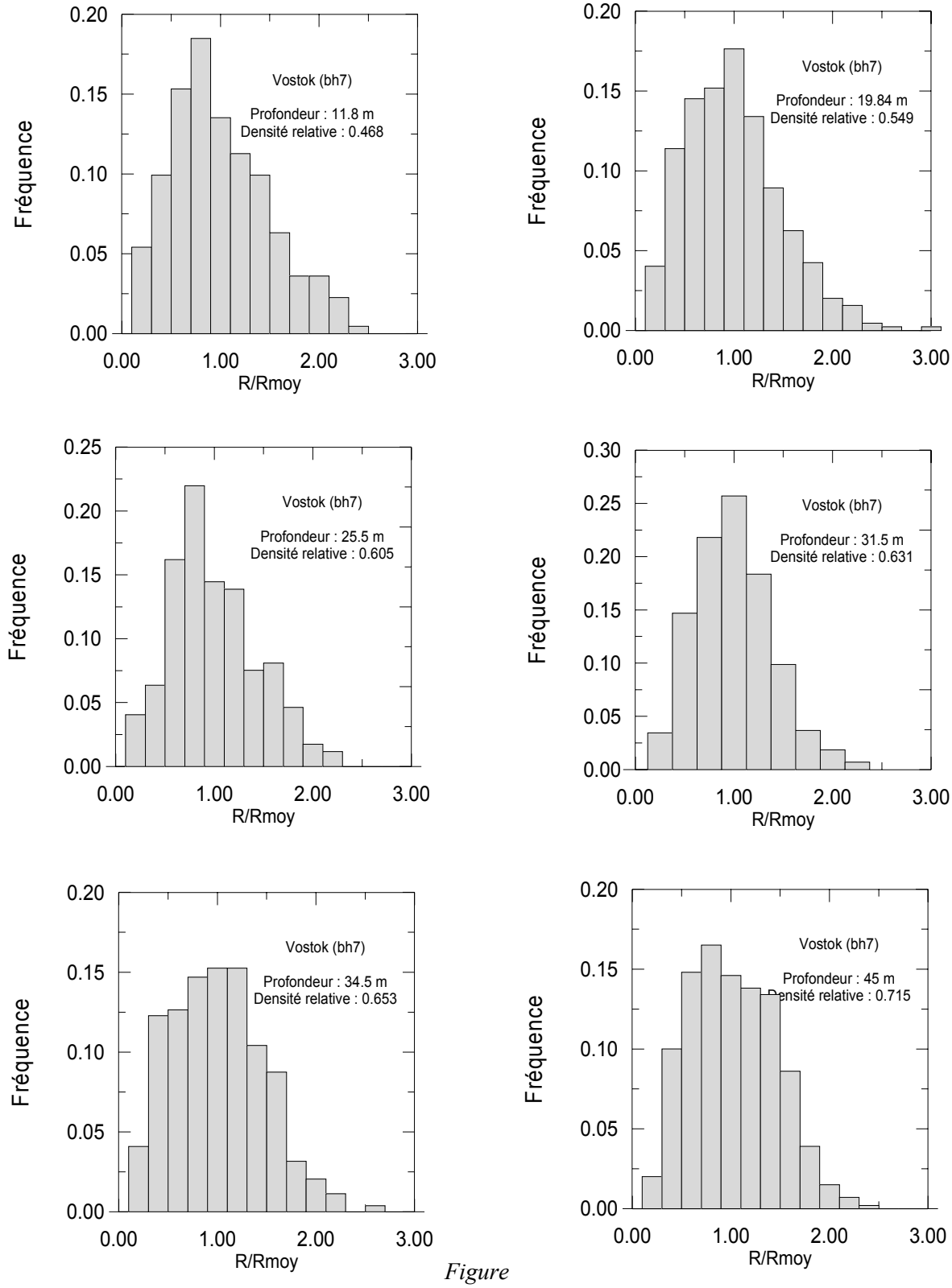


Figure 5.13 a : Distributions des tailles relatives des grains dans le névé de Vostok (Bh7) pour les densités relatives entre 0.468 et 0.715.

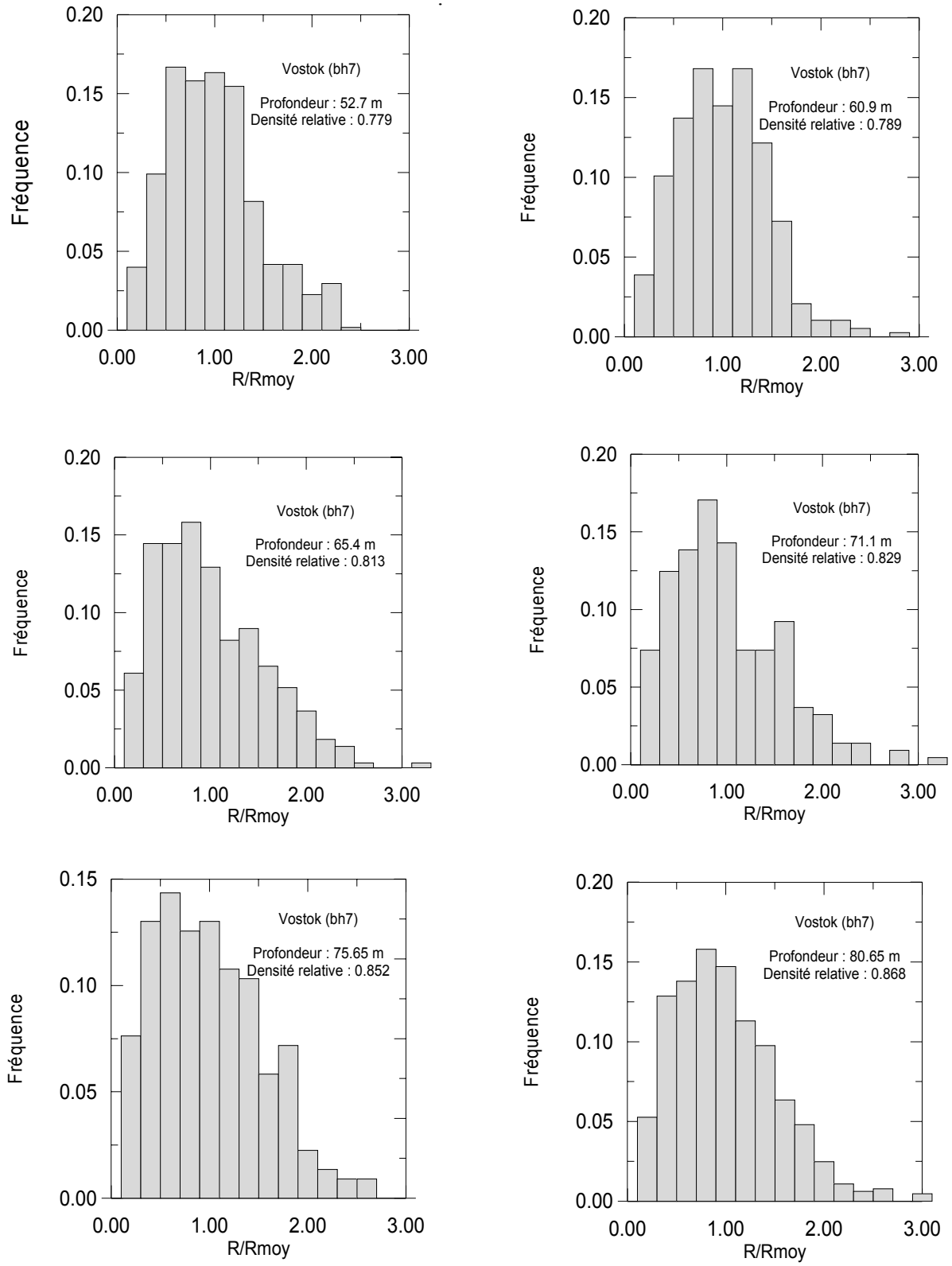


Figure 5.13 b : Distributions des tailles relatives des grains dans le névé de Vostok (Bh7) pour les densités relatives entre 0.779 et 0.868.

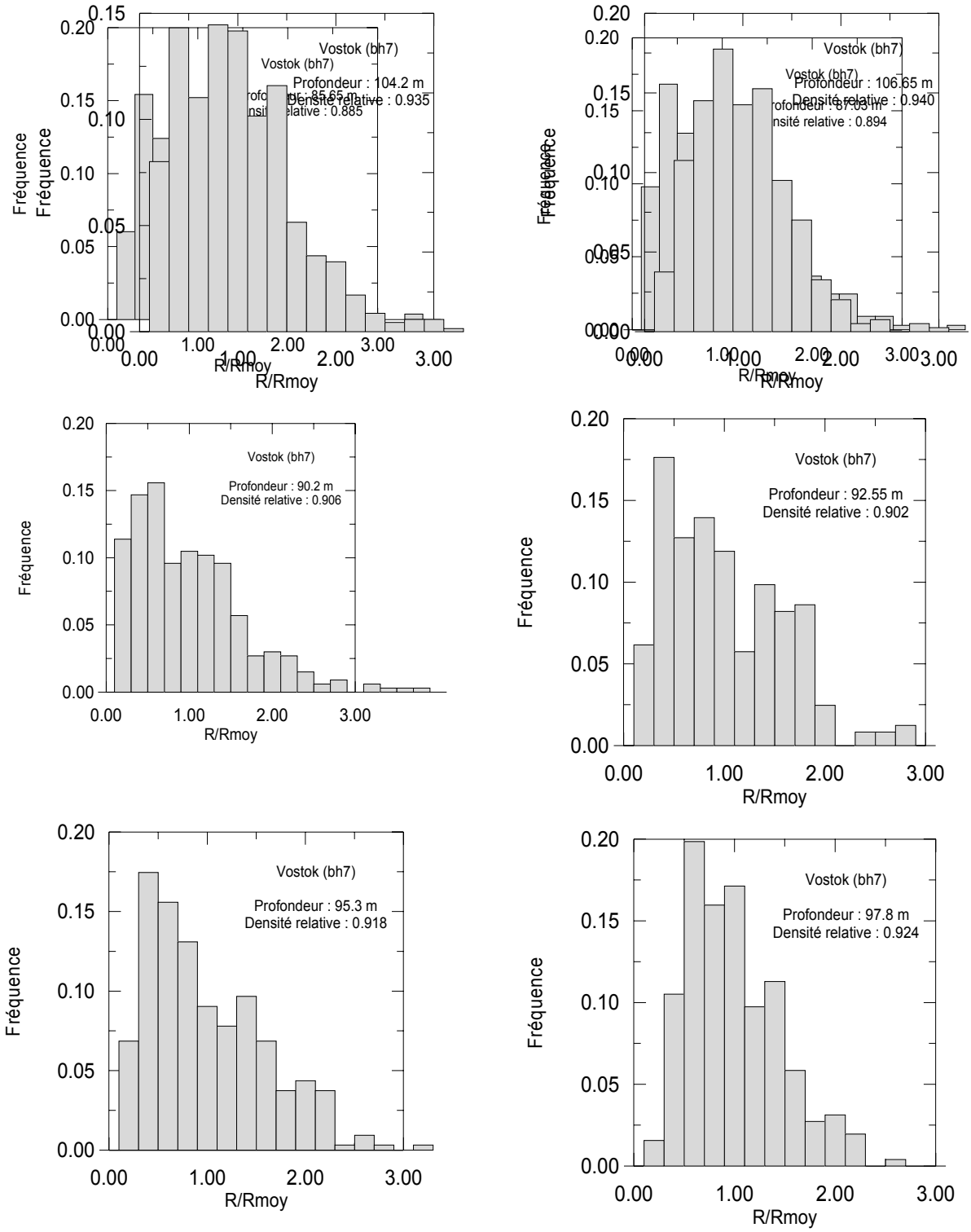


Figure 5.13 c : Distributions des tailles relatives des grains dans le névé de Vostok (Bh7) pour les densités relatives entre 0.885 et 0.924.

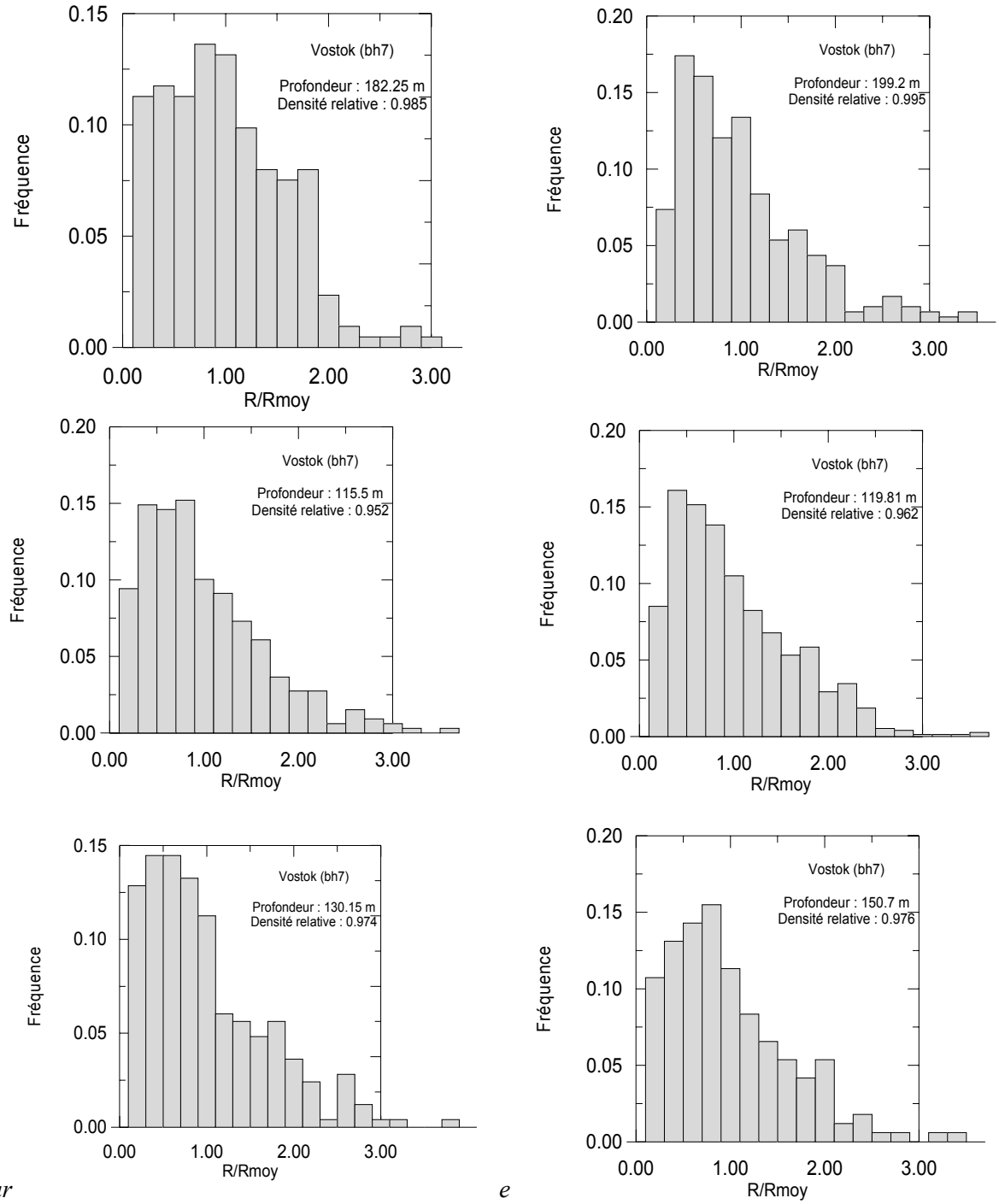


Figure 5.13 d : Distributions des tailles relatives des grains dans le névé de Vostok (Bh7) pour les densités relatives entre 0.935 et 0.976.

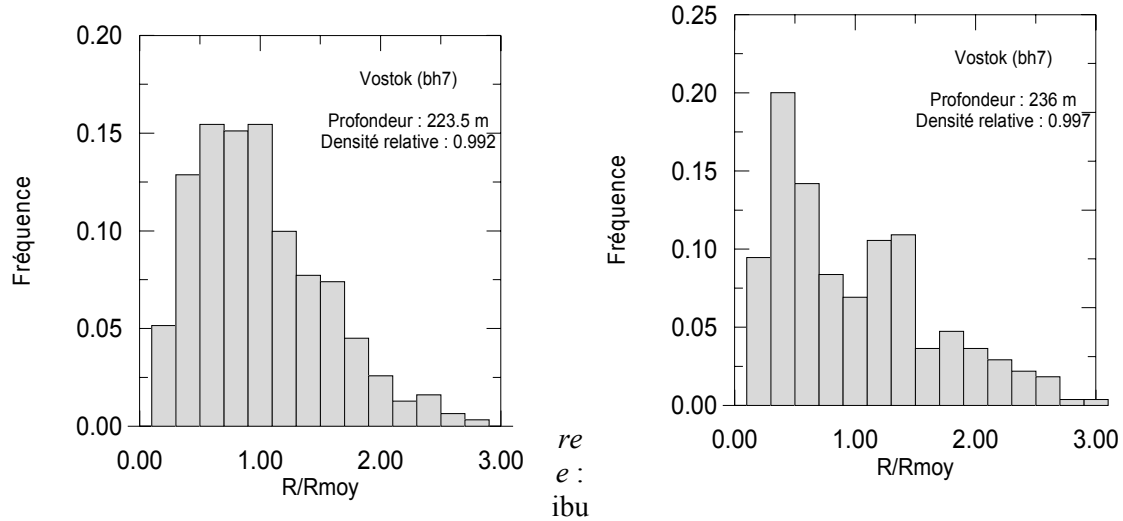


Figure 5.13 : Distributions des tailles relatives des grains dans le névé de Vostok (Bh7) pour les densités relatives entre 0.985 et 0.997.

L'approche statistique du champ moyen traite du changement de taille d'un grain donné, noyé dans un milieu qui représente le comportement moyen de l'ensemble des grains. Comme au cours de la croissance normale il y a augmentation de la taille moyenne des grains et diminution du nombre de grains, ces théories considèrent l'évolution temporelle de la fonction de distribution en taille F(R,t). Le premier travaille fut celui de Felthman (1957) qui observa que les distributions expérimentales de tailles des grains étaient approximativement "log-normale" et dR/dt dépendait linéairement de la courbure. La forme de la fonction de distribution fixée à partir des résultats expérimentaux s'écrit :

$$F(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma^2}}\exp\left(\frac{-(\ln x - x_0)^2}{2\sigma^2}\right) \qquad (5\text{-}26)$$

avec $x = R / R_{moy}$

Suivirent alors les théories de Hillert, Louat, Hunderi et Ryum (Penelle 1995). Hillert suppose que la vitesse de croissance ou de décroissance d'un grain dépend de sa taille R par rapport à un rayon critique R_c : ainsi la vitesse de croissance à un instant donné s'écrit :

$$\frac{dR}{dt} = \alpha m \gamma\left(\frac{1}{R_c} - \frac{1}{R}\right) \qquad (5\text{-}27)$$

ou α est un facteur géométrique, m la mobilité du joint de grain, γ son énergie.
Hillert introduisit sa loi de croissance dans l'équation de continuité et trouve une fonction de distribution de la forme :

$$H(x) = 4e^2\frac{2x}{(2-x)^4}\exp\left(-\frac{4}{(2-x)}\right) \qquad (5\text{-}28)$$

Louat (1974) suit une démarche inverse aux deux auteurs précédents, en supposant que le mouvement du joint est un processus aléatoire, il privilégie le terme de diffusion dans l'équation globale de l'évolution de F(R,t). La fonction de distribution identique pour les domaines 2D et 3D s'écrit alors sous la forme :

$$F(x) = 2\alpha x \exp(-\alpha x^2) \qquad (5\text{-}29)$$

Grâce au traitement d'image que j'ai développé au laboratoire et aux données, que j'ai déterminées sur les microstructures du névé poreux, L. Arnaud a montré dans sa thèse que la distribution 2D d'Hillert ne s'accorde pas du tout avec les résultats expérimentaux que ce soit dans le névé poreux ou dans la glace. A partir ce ces remarques concernant les tendances générales, j'ai regardé l'ajustement des différentes lois théoriques sur l'ensemble des champs disponibles.

J'ai déterminé les paramètres optimisés des lois log-normal et Weibull en fonction de la densité relative.

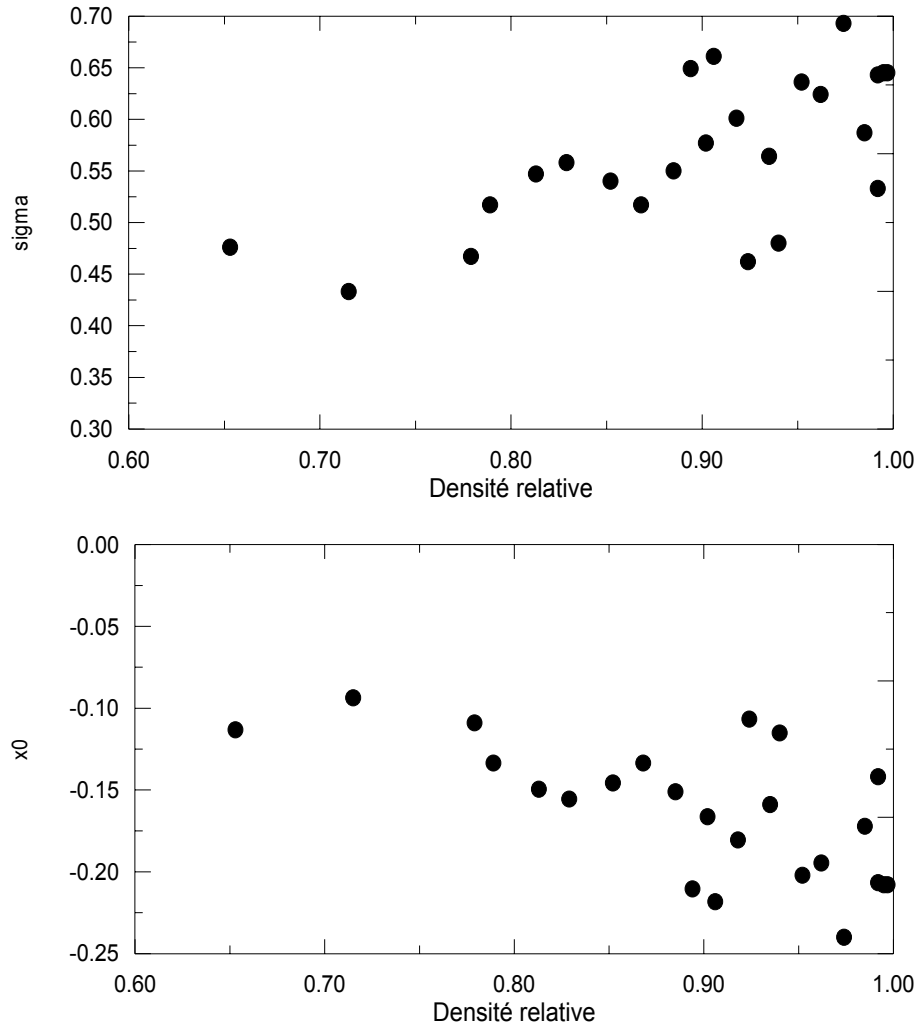


Figure 5.14 : Evolution des paramètres σ et x_0 de la loi log-normale ajustée à toutes les données du site : ! Vostok (Bh7).

La distribution log-normale représente de façon satisfaisante les histogrammes des données brutes de la microstructure du névé. On voit une évolution des deux paramètres de cette loi avec la densification. La valeur moyenne diminue avec la profondeur, et l'écart type augmente traduisant une augmentation de la largeur de la distribution avec la densité relative.

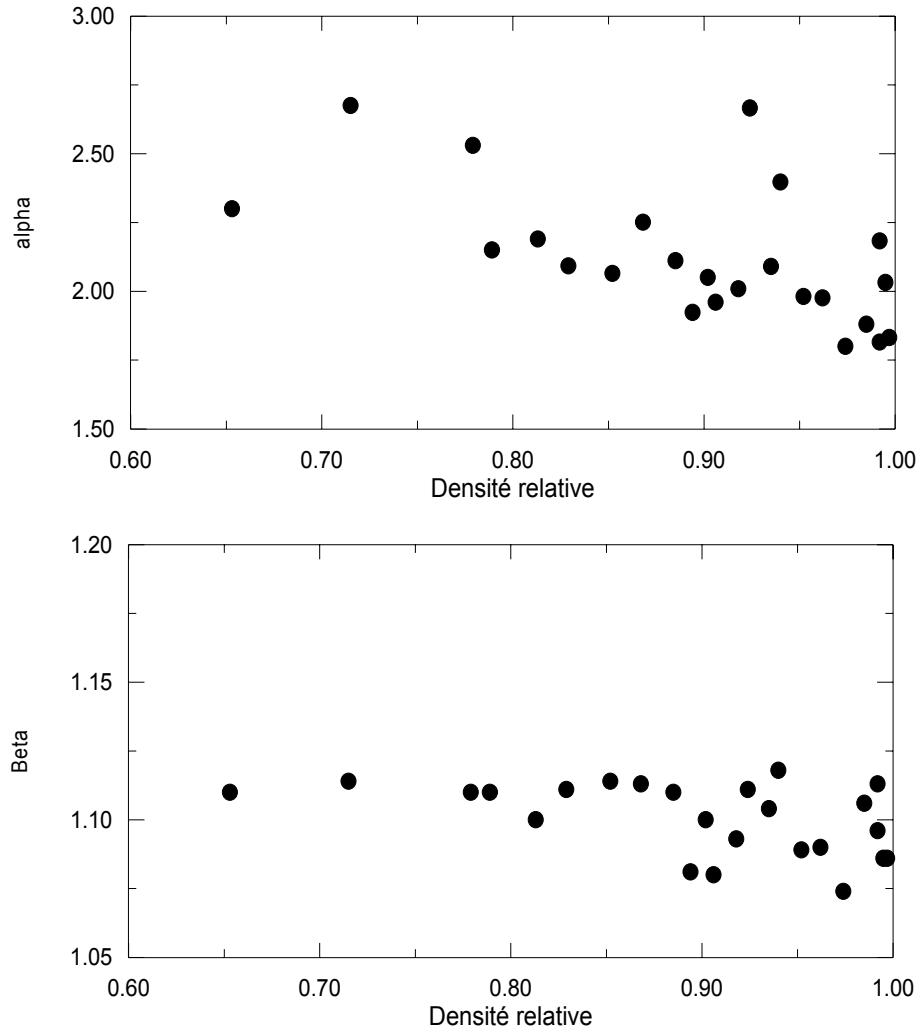


Figure 5.15 : Evolution des paramètres α et β de la loi de Weibull ajustées à l'ensemble des données du site : ! Vostok (Bh7).

La distribution de Weibull est également bien représentative des histogrammes des données brutes de la microstructure du névé poreux. Le paramètre α diminue en fonction de la densité passant d'une valeur de 2.5 à 1.75 à partir de la fermeture des pores. Cette valeur de 2 confirme bien les résultats de Louat qui propose une distribution théorique de la même forme que la loi de Weibull avec α=2. Le second paramètre de cette loi est la valeur de β qui n'évolue pas de façon significative avec la densité relative (*Fig. 5.15)*. On peut calculer la valeur moyenne de ce paramètre β=1.10 +-0.03.

Nous ne pouvons pas conclure sur la préférence d'une distribution de Weibull ou log-normal pour la représentativité des histogrammes dans le névé polaire. L'étape suivante consiste à effectuer le test d'ajustement de Kolmogorov (Saporta 1990).

Il s'agit d'un test non paramétrique d'ajustement à une distribution entièrement spécifiée de fonction de répartition F(x). Ce test repose sur les résultats de Glivenko, Kolmogorov cités en théorie de l'échantillonnage.

Si F_n représente la fonction de répartition empirique d'un n-échantillon d'une variable aléatoire de distribution F(x), on sait que $D_n = \sup |F_n(x)-F(x)|$ est asymptotiquement distribué comme suit :

$$P(D_n < \frac{y}{\sqrt{n}}) \rightarrow \sum_{-\infty}^{+\infty} (-1)^k \exp(-2k^2y^2) = K(y) \qquad (5\text{-}30)$$

La fonction K(y) a été tabulée et fournit donc un test de :

$H^0 : F(x) = F_0(x)$
$H^1 : F(x) \# F_0(x)$

avec les hypothèses suivantes :

H^0 : l'échantillon est extrait d'une population suivant une loi normale de moyenne μ et d'écart type σ,

H^1 : l'échantillon n'est pas extrait d'une telle population.

L'ensemble d'événements :

$$D_n > \frac{y}{\sqrt{n}}$$

s'appelle la région critique ou région de rejet de H^0. Ce test permet de trancher entre les deux hypothèses au vu des résultats d'un échantillon. La décision aboutira à choisir H^0 ou H^1. Si on rejette H^1 alors que H^1 est vraie, on commet une erreur de première espèce. La probabilité de commettre cette erreur est appelé le risque de première espèce, que l'on note α. α est donc la probabilité de choisir H^1 alors que H^0 est vraie.

Le *tableau 5.3* (page suivante) résume les tests effectués sur la variable R/R_{moy} des données de Vostok (Bh7) et la décision prise pour une région critique définie à 5 %. La valeur 1 signifie que l'on suit une loi log-normal, la valeur 0 signifie l'inverse.

Nous constatons en fonction de la densité relative, qu'aucune tendance ne se dessine. Nous avons la moitié des échantillons dont l'histogramme de la taille relative (R/R_{moy}) suit une loi log-normale, l'autre moitié ne suit pas cette loi.

Nous avons effectués les mêmes tests sur les données de Km105 et Km200. Les résultats pour ces deux sites et pour toutes les profondeurs prévoient de conserver l'hypothèse H^0; c'est à dire que les histogrammes de la taille relative des grains (R/Rmoy) suivent des lois log-normales.

On montre sur la *figure 5.16*, l'évolution du paramètre α ou la probabilité de choisir une autre loi qu'une loi log-normale alors que l'on choisit une loi log-normale pour les trois sites Vostok (Bh7), Km105, Km200. On constate que cette probabilité diminue en fonction de la densité relative pour les sites de Vostok (Bh7) et Km200, elle est quasi-constante pour Km105 .

Conclusion :

Les histogrammes de Km105, et Km200, ont un nombre d'objets parfois restreints. Nous pouvons quand même conclure compte tenue des résultats des tests de Kolmogorov et de l'évolution du paramètre α (risque de première espèce) en fonction de la densité relative que les distributions de taille relative des grains suivent des lois log-normales. Pande (1987) a montré que ce type de distributions peut être ajusté de façon satisfaisante sur les histogrammes des tailles relatives des grains, ces résultats confirment ces hypothèses.

Densité relative	Nbr de grains	α	Log-normal 1 : oui 0 : non
0.653	300	0.1535	1
0.715	672	3.19E-6	0
0.779	576	0.10651	1
0.789	387	0.1982	1
0.813	658	0.01452	0
0.829	217	0.07969	1
0.852	223	0.15105	1
0.868	646	0.04904	0
0.885	266	0.14396	1
0.894	327	0.02329	0
0.906	334	0.01799	0
0.902	244	0.0599	1
0.918	321	0.03428	0
0.924	257	0.07272	1
0.935	699	0.02128	0
0.94	400	0.11629	1
0.952	329	0.02621	0
0.962	753	0.00271	0
0.974	249	0.003543	0
0.992	168	0.0804	1
0.985	213	0.1266	1
0.995	299	0.03061	0
0.992	311	0.10172	1
0.997	275	0.02291	0

Tableau 5.3 : Résultats des tests d'ajustements de Kolmogorov à une loi log-normale sur la taille relative des grains de Vostok (Bh7) : R/R_{moy}.

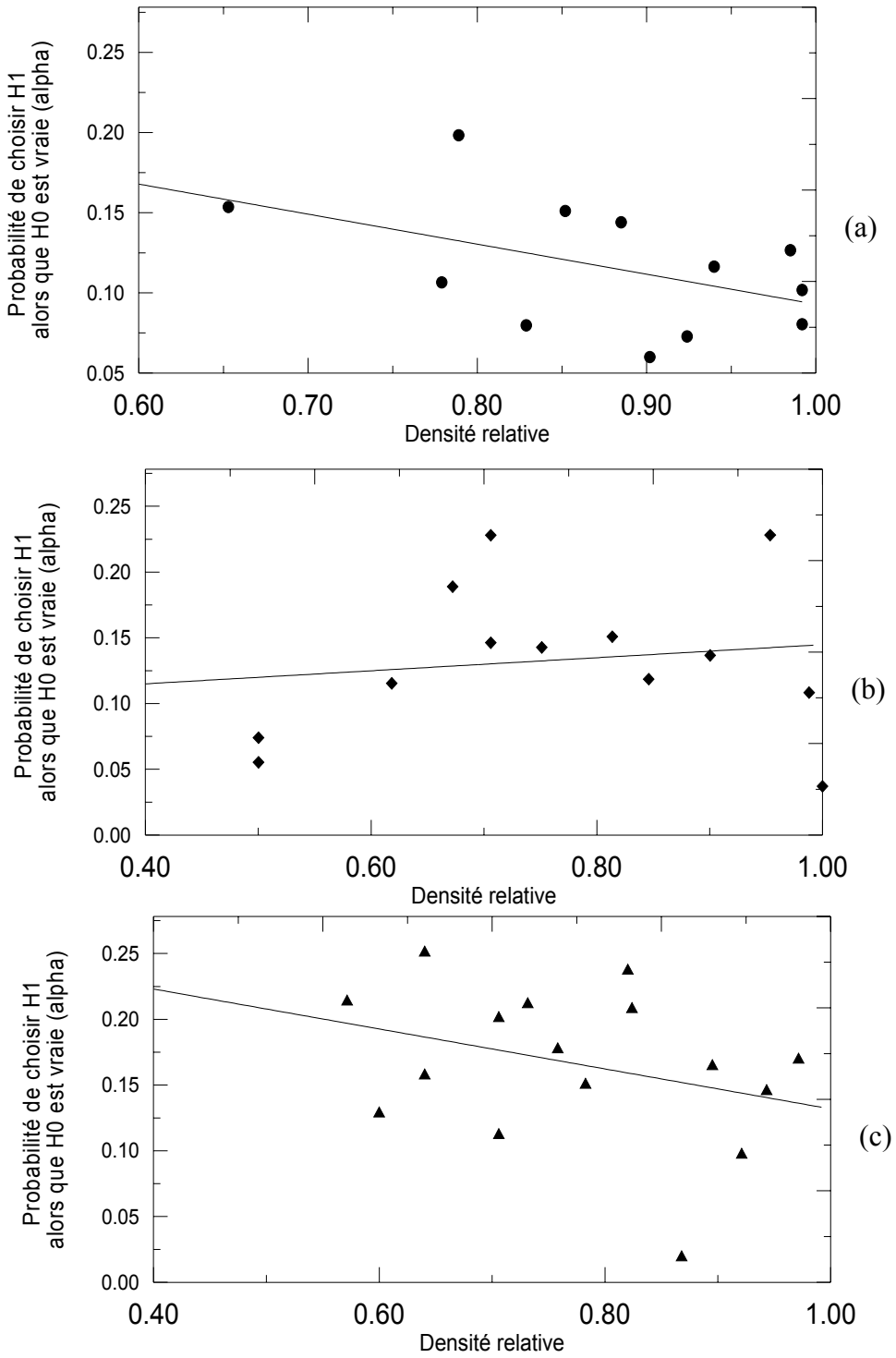


Figure 5.16 : Evolution du paramètre α : risque de première espèce calculé sur les tailles relatives des grains (R/R_{moy}) d'après les tests d'ajustements de Kolmogorov à une loi log-normale sur les trois sites : ● Vostok (Bh7), ◆ Km105, ▲ Km200.

5 Etude et caractérisation de la phase poreuse :

5.1 Etude du squelette des pores :

Une première étude consiste à regarder l'évolution de la longueur du squelette des pores en fonction de la densité. Nous montrons sur la *figure 5.17* la longueur moyenne du squelette des pores.

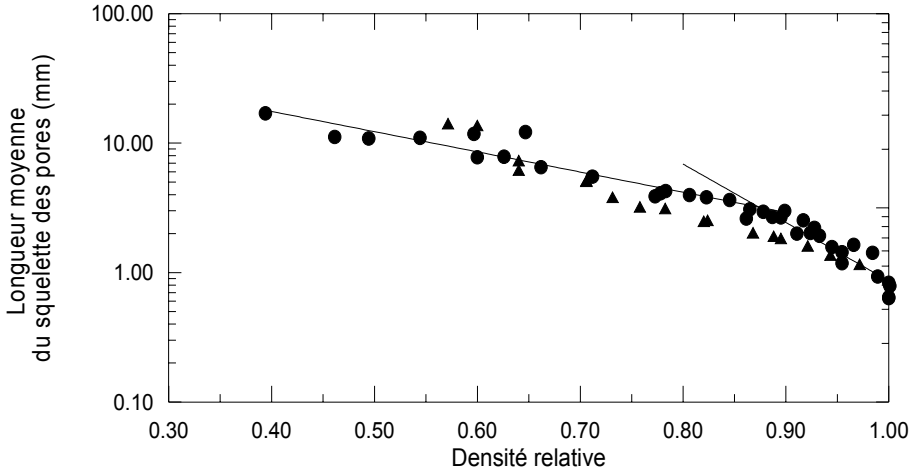


Figure 5.17 : Longueur moyenne du squelette des pores en fonction de la densité relative.
● Vostok (Bh7).
▲ Km200.

On constate que les données de Vostok (Bh7) présentent une rupture de pente. L'abscisse du point de rupture de pente a pour valeur 0.88 en densité relative, soit 0.81 en densité réelle. La valeur de cette densité (0.81) est le début de la zone de fermeture des pores. Nous ne retrouvons pas cette rupture de pente sur l'analyse de la longueur moyenne du squelette des pores de Km200, mais le nombre de données moins important qu'à Vostok est insuffisant pour faire une analyse fine de ces données.

Un autre paramètre que nous avons regardé est l'évolution de la surface moyenne du squelette des pores en excluant la valeur de son maximum (*Fig. 5.18*). L'augmentation puis la décroissance de cette valeur avant et après la densité de 0.55-0.58 indiquerait deux régimes différents.

Le premier régime correspondrait à une augmentation de la complexité des pores due à une augmentation de la glace par diffusion de vapeur saturante et un réarrangement des grains par glissement au niveau des joints de grains (Bader 1960 et 1962).

La fin de ce premier régime serait la fin de l'étape de tassement.

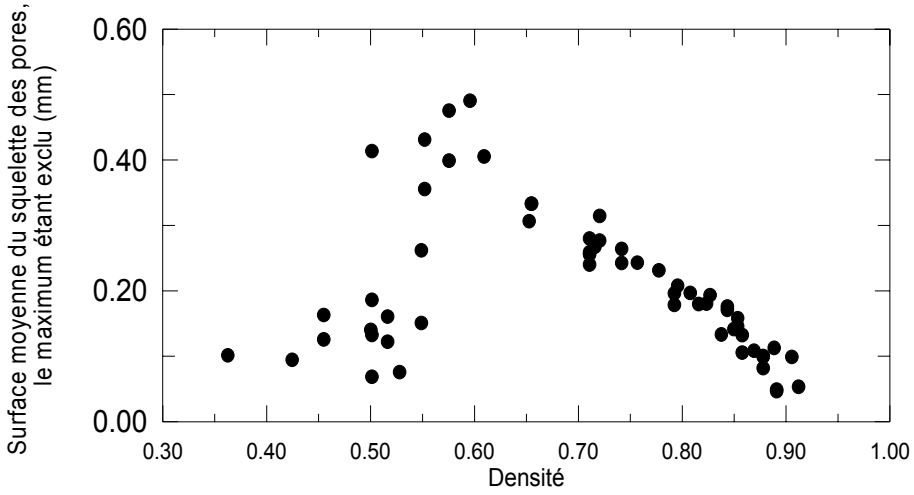


Figure 5.18 : Evolution de la surface moyenne du squelette des pores (le maximum étant exclu) en fonction de la densité.
● Vostok (Bh7).

Nous avons regardé un autre paramètre qui est l'évolution du nombre de points triples des pores en fonction de la profondeur. On constate sur la *figure 5.19* que ce paramètre devient constant à partir de 160 mètres de profondeur. A partir de cette profondeur (160 m), les pores ont fini de se diviser, on peut considérer alors que ce sont des bulles.

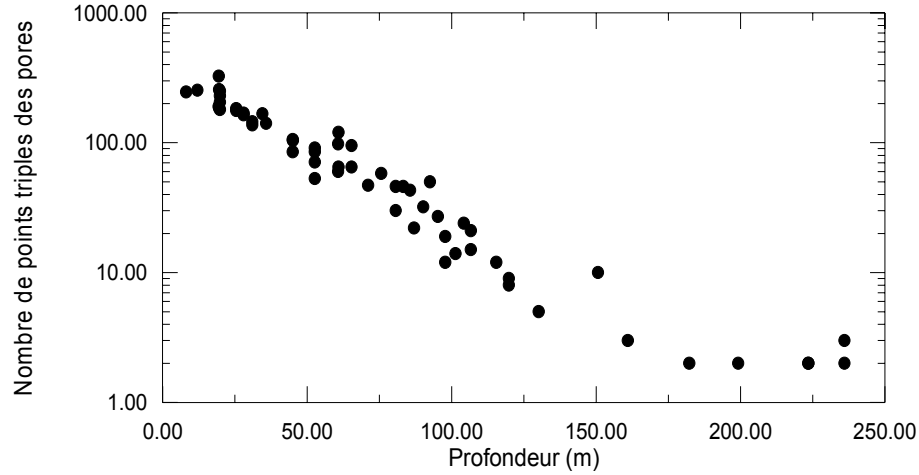


Figure 5.19 : Evolution du nombre de points triples en fonction de la profondeur.
● Vostok (Bh7).

5.2 Etude de la représentation de Voronoi :

Cette seconde partie traite de l'évolution des représentations de voronoi. On montre sur le *Figure 5.20* une image de la représentation de voronoi déterminée à partir du centre de gravité des cristaux de glace, les pores ne sont pas pris en compte.

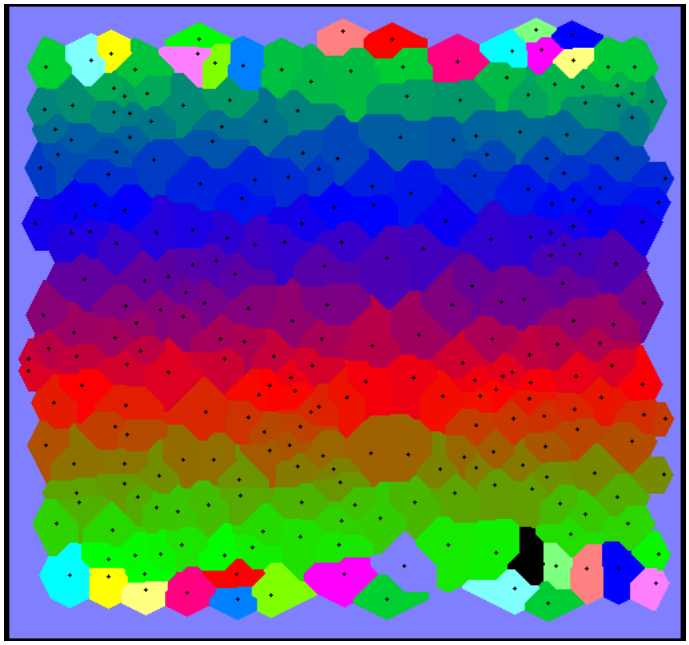


Figure 5.20 : Représentation des polygones de voronoi du centre de gravité des cristaux de glace à Vostok (Bh7), profondeur : 23 mètres.

La *figure 5.21* montre l'évolution de la surface moyenne des cellules de voronoi du centre de gravité des cristaux de glace. On distingue les trois stades de l'évolution des cristaux de glace.

Lors du premier stade (d=0.35 à d=0.55), correspondant au réarrangement des grains de neige par tassement et transport de matière par évaporation-condensation liée au gradient thermique, les cristaux grossissent.

Le deuxième stade à partir de la densité 0.55 le réarrangement par glissement est bloqué et le mécanisme de densification par déformation plastique au niveau des points de contact devient prépondérant. Il n'y a plus de transport de matière. La densification sans apport de matière engendre un rapprochement des centres de gravité des cellules de voronoi. Ce rapprochement induit une diminution de la surface moyenne des cellules. Simultanément les cristaux de glace grossissent. La décroissance de la surface moyenne des cellules de voronoi nous montre que cette déformation plastique est prépondérante par rapport au grossissement des cristaux.

L'augmentation des cellules à partir de la densité 0.84, correspond au grossissement des cristaux.

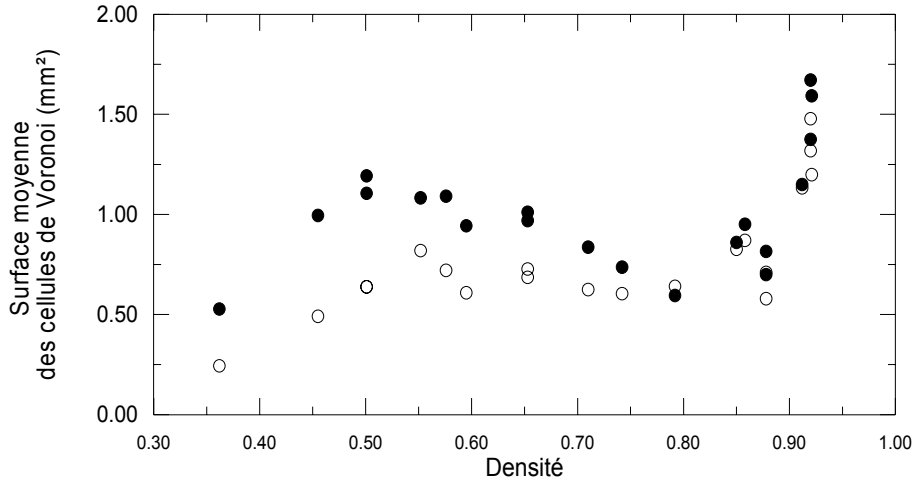


Figure 5.21 : Evolution de la surface moyenne des cellules de voronoi des cristaux de glace en fonction de la densité.
● Vostok (Bh7)
❍ Taille moyenne des cristaux (Bh7).

Nous avons de la même façon étudié la surface moyenne des cellules de voronoi des pores en fonction de la densité à Vostok (Bh7). Avant la densité 0.65, le réseau poreux est presque complètement connecté, et il est de ce fait impossible de déterminer les cellules de voronoi des pores. A partir de cette densité et jusqu'à la glace, la surface moyenne des cellules est stable.

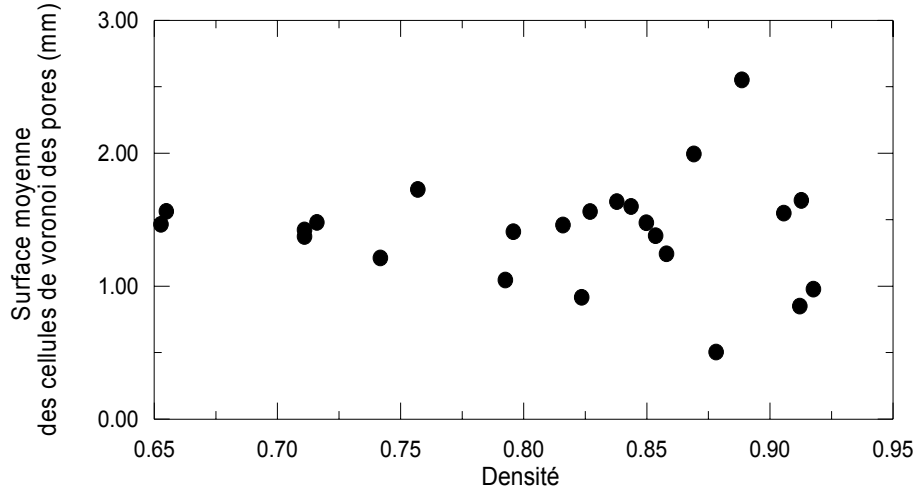


Figure 5.22; Evolution de la surface moyenne des cellules de voronoi des pores en fonction de la densité.
● Vostok (Bh7).

6 Conclusion :

Nous avons, grâce au traitement d'images et grâce à de nombreuses et nouvelles données expérimentales sur la taille et la forme des cristaux en fonction de la densité relative su site de prélèvement participé de façon importante à la description de la structure des grains du névé et de la glace polaire.

Les algorithmes développés pour le filtrage des images et les algorithmes d'extraction des paramètres des images binaires permettent d'obtenir les tailles moyennes des grains, les distributions de taille des grains, le nombre de contacts grain-grain ou grain-pore et d'en déduire des paramètres secondaires comme les surfaces spécifiques.

Dans le domaine glaciologique, ces données vont permettre d'intégrer une description précise de la structure des grains dans les modélisations des phénomènes physiques ou la taille et la forme des grains interviennent.

En dehors de ces résultats bruts, nous avons montré que la structure des grains dans le névé poreux découle principalement du phénomène de grossissement normal des grains. D'autre part nous avons montré que la cinétique de grossissement des grains dans le névé est caractérisée par une loi de croissance linéaire avec le temps (A linéaire avec le temps).

Nous restons prudent par contre sur la détermination de l'énergie d'activation, puisque nous avons montré que la pente de la loi de croissance des grains varie en fonction du paramètre utilisé (taille moyenne, 50 plus gros grains ou 25% des plus gros grains).

Nous avons mis en évidence grâce à l'analyse des pores sur un site Vostok (Bh7) ou le nombre de données est important, le début de la zone de fermeture des pores (close off). Nous avons également déterminé les différents stades de densification par une analyse des cellules de voronoi du centre de gravité des grains, en ne tenant pas compte des pores.

Pratiquement, cette description synthétique de la structure des grains (tailles et formes) dans le névé et la glace polaire, en particulier sous la forme de relations analytiques pour les distributions de la taille et de la forme (nombre de faces) a été utilisé dans la modélisation de la fermeture des pores dans le névé. Ces résultats ont également servi à la modélisation de la densification et la modélisation du transport des gaz à travers le névé polaire.

1 Introduction :

Nous avons vu en introduction générale (*Chapitre I*) l'intérêt glaciologique d'analyser des microstructures de glace :

- détermination de la loi de croissance des cristaux de glace,
- analyse des distributions de taille des grains en fonction de la profondeur,
- validation du modèle de grossissement des grains,
- détection des transitions climatiques en général.

Nous allons dans ce chapitre présenter les méthodes de filtrage et de segmentation des images couleurs des lames minces de glace. Nous analyserons ensuite les images des lames minces prélevées sur le site de Dôme C en Antarctique.

Le but de cette étude est la détermination de la loi de croissance des grains dans la glace peu profonde par une approche d'analyse automatique d'images de lames minces de glace. Nous comparerons la variation de cette loi de croissance par rapport aux différents paramètres utilisés pour la déterminer.

L'étude des distributions de taille de grains en fonction de la profondeur nous permettra de déterminer la forme générale de la loi de distribution et de montrer que le grossissement des grains est un grossissement normal des grains jusqu'à une profondeur de 430 mètres.

L'étude de l'anisotropie des grains par les longueurs d'intercepte montrera l'écrasement des grains avec la profondeur.

Ce chapitre s'articule autour de deux articles. Le premier décrit la reconstruction automatique de micro-structure de glace polycristalline à partir des images de lames minces et son application au projet EPICA (European Projet for Ice Coring in Antarctic) à Dôme Concordia en Antarctique.

Le second article sera consacré à l'analyse des micro-structures entre 100 mètres et 600 mètres de profondeur. Nous montrerons que la profondeur de la transition du dernier maximum glaciaire/holocène à Dome Concordia est légèrement différente de celle obtenue à Dôme C, ceci pouvant provenir de la différence des taux d'accumulation.

Nous insisterons sur l'avantage de pouvoir analyser les tailles de grain mais aussi les distributions de taille, et nous montrerons que ces données peuvent être utilisées comme indicateur des variations du climat.

2 Filtrage et segmentation :

La segmentation des images couleurs consiste à effectuer une partition de l'image en régions homogènes par rapport à un ou plusieurs critères. Les régions obtenues se distinguent les unes des autres par des différences significatives selon ces mêmes critères.

L'étape de pré-traitement a pour but de faciliter la segmentation en renforçant la ressemblance entre pixels appartenant à une même région, ou en accentuant la dissemblance entre pixels appartenant à des régions différentes.

Les régions formant l'image sont caractérisées par leur intensité moyenne. Les fluctuations autour de cette intensité moyenne peuvent provenir soit du dispositif d'acquisition, soit de la scène elle même poussière, rayures, hétérogénéité due à des différence d'épaisseur de l'échantillon dans le cas des lames minces de glaces. Elles constituent des perturbations qui affectent la qualité de la segmentation et sont généralement désignées sous le terme de bruit d'image. L'échelle spatiale des fluctuations est relativement faible par rapport aux dimensions des régions, le bruit est donc plutôt de type haute fréquence.

Généralement le bruit d'images est considéré comme étant aléatoire, centré et additif. Le pré-traitement se ramène alors à un problème de traitement du signal : retrouver par filtrage les niveaux d'intensité nominaux de chacune des régions. L'objectif est donc de réduire l'amplitude de variations d'intensité de chacune des régions tout en conservant les transitions entre régions adjacentes.

Les méthodes les plus simples sont basées sur le filtrage linéaire stationnaire (invariant par translation). Nous faisons le choix après quelques tests sur les images de ne pas utiliser de telles méthodes. Le principal inconvénient des filtres linéaires est que la réduction du bruit s'accompagne d'un étalement des transitions entre régions. Ces zones de transition dans le cas de la glace représentent les joints de grain et ils nécessitent une attention particulière afin d'en minimiser la déformation ou l'étalement.

Nous faisons donc le choix d'utiliser des filtres non-linéaires stationnaires. Ces derniers introduisent des modifications irréversibles de l'image, ce qui n'est pas gênant dans notre cas. Ces transformations affectent la perception visuelle de l'image, mais elles en constituent une simplification, rendant plus aisée l'étape de segmentation. Nous allons voir que c'est une combinaison de filtres d'ordre, de filtres morphologiques et d'un opérateur dérivatif qui va permettre l'extraction des joints de grains de chaque monocristal de glace et la reconstitution des micro-structures à différentes profondeurs.

Pour mieux appréhender les différents opérateurs utilisés, nous allons tout d'abord rappeler quelques définitions des filtres linéaires. Lorsque nous avons utilisé des filtres non linéaires, nous avons pu ramener la décomposition sous forme de combinaison linéaire de filtres linéaires et donc appliquer les propriétés des filtres linéaires stationnaires que nous allons sommairement rappeler.

2.1 Filtres linéaires stationnaires :

Ces opérateurs sont caractérisés par leur réponse impulsionnelle h(x,y). Soit une image initiale A[i,j], la relation entrée-sortie dans le domaine discret est définie par l'équation de convolution discrète :

$$C[i,j] = \sum_m \sum_n h[m,n]A[i-m,j-m] = \sum_m \sum_n A[m,n]h[i-m,j-m] \qquad (6\text{-}1)$$

A[i,j] : valeur du pixel de coordonnées i,j.

Le support du noyau de convolution h peut être borné ou non borné. Comme on accorde à priori la même importance aux pixels situés d'un coté ou de l'autre du pixel courant, les noyaux de convolution utilisés sont généralement symétriques par rapport à chacune des coordonnées.

$$h[m,n] = \begin{matrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{matrix}$$

Exemple de noyau de convolution 3x3.

On impose au filtre de ne pas altérerles intensités moyennes des régions, ceci conduit à :

$$\sum_m \sum_n h[m,n] = 1 \qquad (6\text{-}1\text{bis})$$

2.2 Filtre non linéaire :

Le premier filtre utilisé est un filtre morphologique, l'ouverture morphologique supprime les impulsions positives et préserve les impulsions négatives. L'effet inverse est obtenu par la fermeture. On applique successivement une ouverture et une fermeture avec un élément structurant agissant sur les 8 plus proches voisin. Ces deux opérateurs induisent une modification de la moyenne des intensités d'autant plus importante que la taille de l'élément structurant est grande et que l'amplitude du bruit est forte, nous avons volontairement limités au plus proche voisin l'opérateur. Les formules de ces filtres sont :

$$O^B(X) = D^B[E^B(X)] \tag{6-2}$$

$$F^B(X) = E^B[D^B(X)] \tag{6-3}$$

ou X représente une particule de l'image initiale, E^B représente l'érosion de cette particule par l'élément structurant B, D^B la dilatation par B et O^B représente l'ouverture de la particule par B (*Fig. 6.1*). On montre sur la *figure 6.2*, l'effet d'un tel filtre sur une image de Dôme C de 170 mètres.

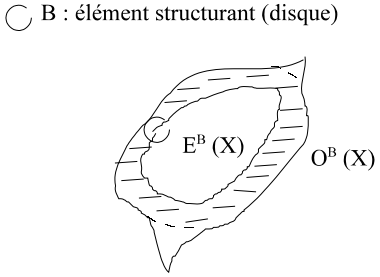


Figure 6.1: Opération d'ouverture sur une particule.

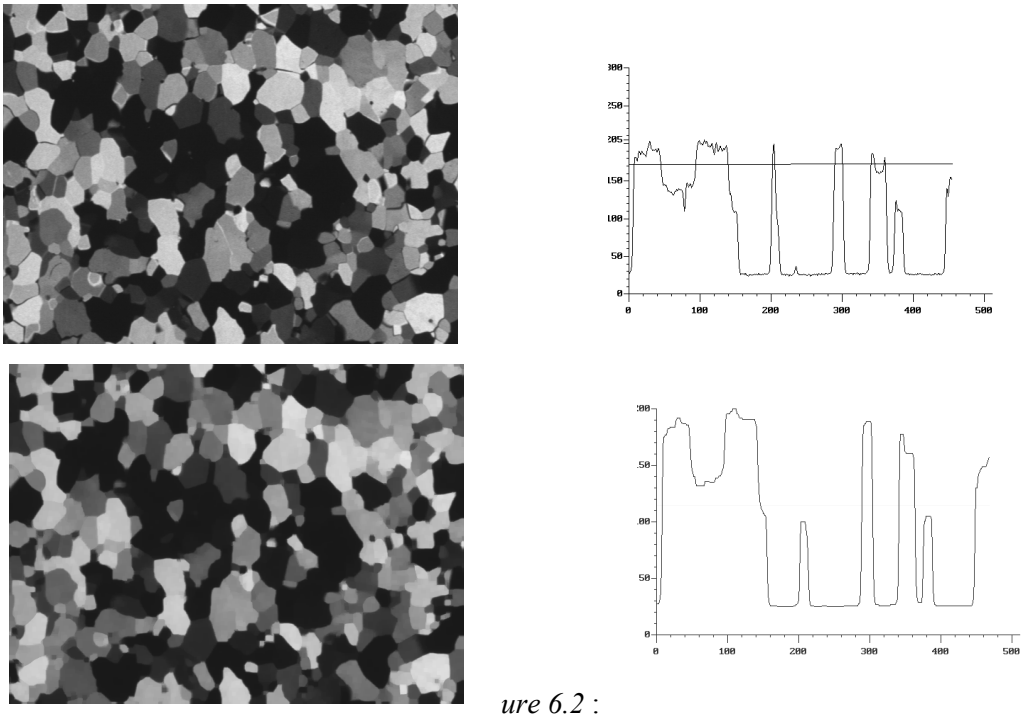


Figure 6.2 : Filtrage par ouverture morphologique, suivie d'une fermeture sur une image de monocristaux de glace de Dôme C, profondeur 170 mètres.

On voit sur les courbes de niveaux de gris que ce filtrage supprime les impulsions parasites et

conserve les fortes transitions. Ce filtrage morphologique étant insuffisant pour détecter les contours notamment dans les zones ou plusieurs petits grains ont leurs frontières mal définies, nous avons appliquer un filtre médian.

2.3 Filtre d'ordre :

Ce filtre est un filtre d'ordre dont nous rappelons le principe. On considère une fenêtre rectangulaire de taille (2M+1)*(2N+1) pixels, centrée sur le pixel [i,j] d'une image A. En numérotant de 1 à L = (2M+1)x(2N+1) les pixels de cette fenêtre, on définit des données disponibles :

$$a = \langle a_k | k = 1 \ldots L \rangle \tag{6-4}$$

Puis on trie les éléments de a par ordre croissant. On appelle j^{ème} statistique d'ordre, notée a(j), la valeur de rang j dans a.

$$a_{(1)} \preceq a_{(2)} \preceq \ldots. \preceq a_{(j)} \preceq a_{(j+1)} \ldots.. \preceq a_{(L)} \tag{6-5}$$

Pour un filtre d'ordre, la sortie est définie comme une fonction des statistiques d'ordre. Les données sont prise en compte selon leur rang dans la fenêtre d'analyse.

La sortie C[i,j] d'un L-filtre (David 1981) s'obtient par combinaison linéaire des statistiques d'ordre (*Fig. 6.2*) :

$$C[i,j] = \sum_{k=1}^{L} c_k a_{(k)} \tag{6-6}$$

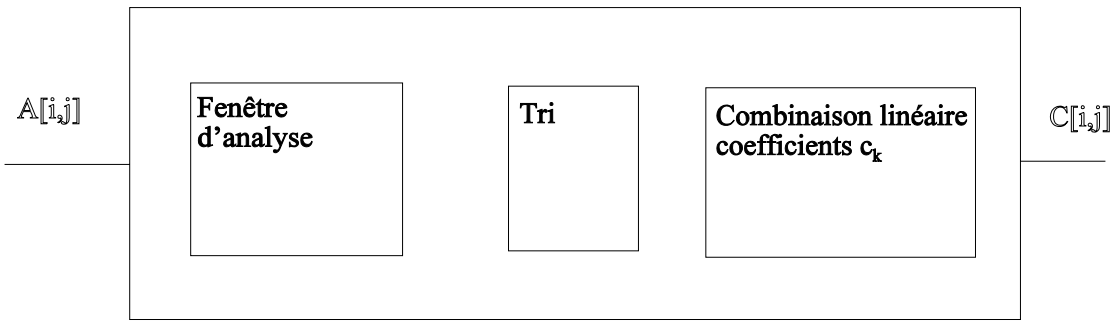


Figure 6.2 : L-filtre

Afin de ne pas modifier l'intensité des zones homogènes de l'image, les coefficients doivent satisfaire la contrainte :

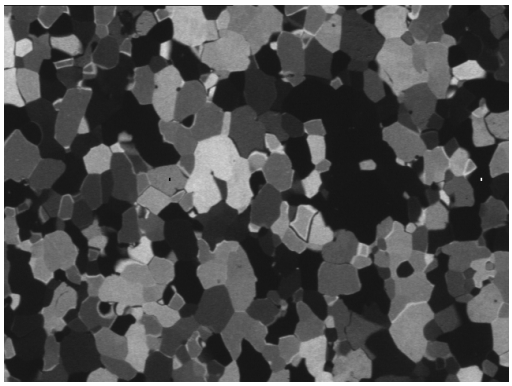
$$\sum_{k=1}^{L} c_k = 1 \tag{6-7}$$

Le filtre médian a pour valeur des coefficients :

$$c_k = \begin{cases} 1 \text{ si } k = (L+1)/2 \\ 0 \text{ ailleurs.} \end{cases} \tag{6-8}$$

Ce filtre sélectionne le pixel de la fenêtre d'analyse ayant la valeur médiane. Ce filtre est insensible à la présence de valeur aberrantes si leur nombre est inférieur à L/2. Il est très utile dans le cas de perturbations à caractère impulsionnel, et nous l'avons utilisés comme tel. De plus, le filtre médian a la propriété de laisser inchangées les transitions monotones entre régions. Il peut certaines fois affecter la géométrie des régions de l'image, les zones formant un angle aigu ont tendance à être arrondies par le filtrage. Chaque image couleur des cristaux de glace est décomposée en trois images en niveaux de gris, selon la décomposition lumière, teinte et saturation.

Nous avons appliqués ce type de filtre sur les trois images en niveaux de gris des trois composantes lumière, teinte et saturation de l'image couleur. On montre sur la *figure 6.3*, l'effet d'un filtrage cumulé entre une ouverture et une fermeture morphologique suivi d'un filtre médian.



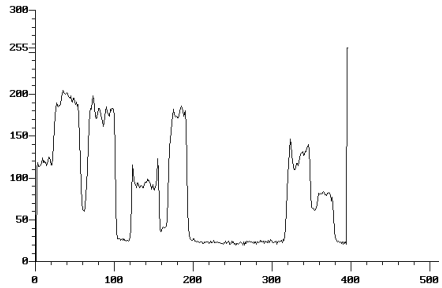
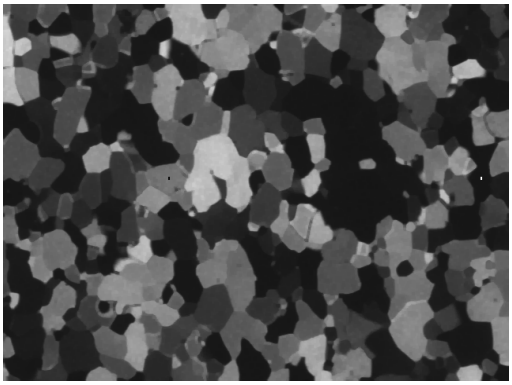
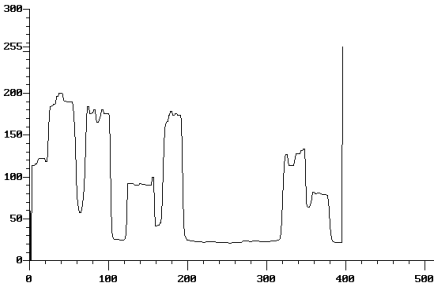
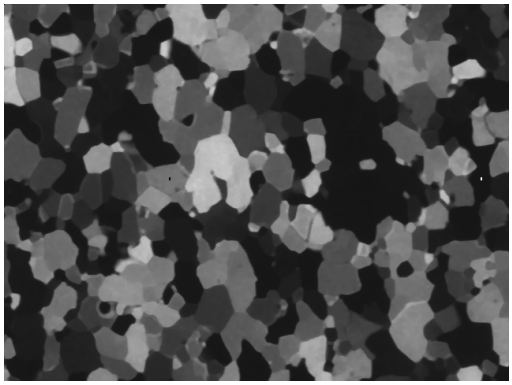


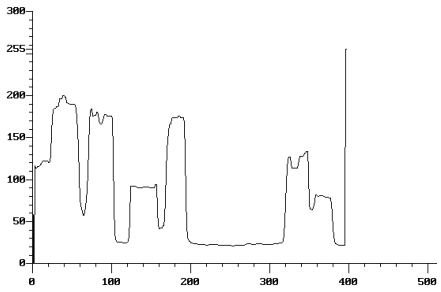
Image initiale.





Ouverture et fermeture morphologique.





Filtre médian.

Figure 6.3 : Filtrage cumulé, d'une ouverture, d'une fermeture morphologique et d'un filtre médian sur l'image en niveaux de gris d'une image couleur

Ce filtre médian atténue des pics parasites qui n'ont pas été enlevés par le filtrage morphologique. A ce stade, nous avons des frontières de joint de grains en niveaux de gris bien définies, il nous faut grâce à un filtre de Sobel dont la formule est rappelé ci-dessous extraire ces frontières puis les seuiller, pour en obtenir une image binaire.

$$C[i,j] = hj*[\, hi*A(i,j)] \tag{6-9}$$

$$\text{avec } hj = \begin{matrix} 1 & 0 & -1 \\ c & 0 & -c \\ 1 & 0 & -1 \end{matrix} \qquad hi = \begin{matrix} 1 & c & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -c & -1 \end{matrix} \tag{6-10}$$

ou c = 2 pour le masque de Sobel.

Ces opérations sont à recommencer pour les trois images couleurs, puisque nous avons vu (*chapitre II)* que pour visualiser chaque monocristal à partir d'une lame mince éclairée en lumière polarisée, il nous faut analyser trois images couleurs.

C'est à partir de ces trois images couleurs décomposées chacune en trois images en niveaux de gris selon la décomposition lumière, teinte et saturation, que nous allons déterminer les frontières des joints de grains, pour chaque monocristal.

Nous avons donc mis au point une méthode permettant la reconstitution d'une image 2D de micro-structure de monocristaux de glace à partir de trois images couleurs de lames minces de glace éclairées en lumière polarisée. On montre sur la *figure 6.4,* l'image initiale et l'image de micro-structure obtenue après l'ensemble des étapes de filtrage et de segmentation que nous venons de présenter.

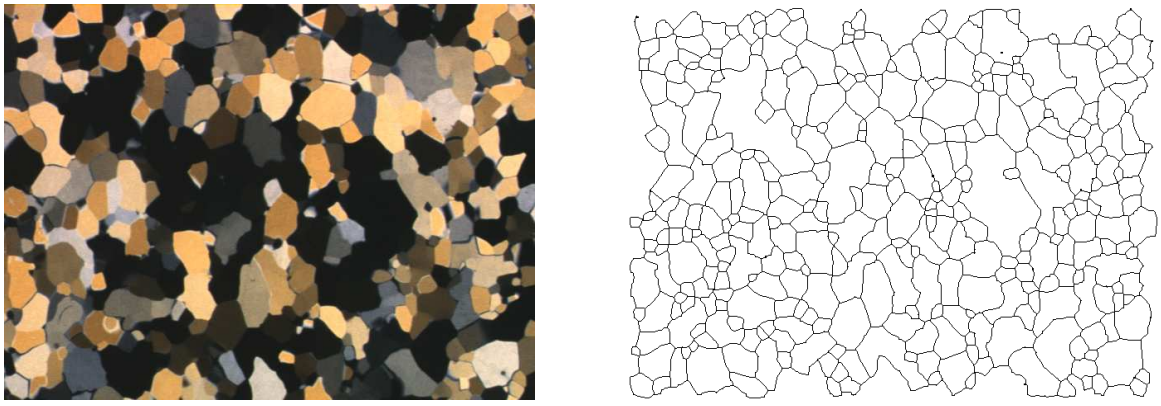


Figure 6.4 : Image couleur de Dôme C, profondeur 170 mètres, et l'image de la micro-structure des joints de grains.

2 bis Synthèse des deux articles suivants :

Le premier article présente l'algorithme complet de segmentation des images de cristaux de glace utilisé pour obtenir la microstructure en 2D de la glace. A partir de cette microstructure, nous montrons que l'on peut déterminer la loi de croissance des cristaux en fonction de la profondeur et donc de l'age.

Nous montrons que la loi de grossissement des cristaux est une loi linéaire quelque soit le paramètre utilisé (A, A_{50}, L^2) pour mesurer la taille moyenne des grains (équ. 1). Par contre la pente de cette droite varie d'un facteur deux en fonction du paramètre que l'on choisit (A, A_{50}, L). Dans le cas des 50 plus gros grains, la valeur initiale est décalée. Ceci montre le biais introduit par la méthode de mesure et montre l'importance de choisir le même paramètre de représentation des lois de grossissement pour comparer les différents sites.

Durant le grossissement des grains, la distribution de taille des cristaux est supposée ne pas changer, et des auteurs ont proposé une distribution log-normal (Atkinson, 1988, Anderson et al. 1989), ce qu'on observe sur nos distributions.Toutefois, la valeur du pic maximum et l'écart type de la distribution changent avec le temps.

Dans notre analyse, la représentativité des 50 plus grains varie de 10% à 100 m jusqu'à 25% à 360 m. Cette valeur de 10% à 100 m est très inférieure à l'analyse de Gow (1969) qui utilise systématiquement une valeur égale ou supérieure à 25 % des grains. Pour comparer, nous avons déterminé l'évolution de la taille des grains en prenant 25% des plus gros grains. Le tableau I résume l'ensemble des valeurs de la pente K.

Basé sur la simulation 3D de grossissement des grains, Anderson at al. (1989) a montré que la cinétique de grossissement des grains basée sur la croissance du volume moyen des grains est très proche de la cinétique dérivée des paramètres 2D et de la surface moyenne A, de tous les grains présents dans la section. Nous pensons que la surface moyenne (A) est le paramètre le plus représentatif en 2D pour déduire la cinétique de croissance des grains en 3D.

Nous montrons ensuite l'anisotropie des grains par la méthode d'analyse des lignes d'interceptes. Les grains sont aplatis dans le plan horizontal.

Dans le deuxième article, nous analysons par traitement d'images les lames minces du projet Européen (EPICA). Nous montrons que la variation de la loi de croissance des cristaux et les distributions de taille des grains révèlent un grossissement normal des grains jusqu'à 430 m. Entre 430 m et 500 m, une décroissance marquée de la taille des grains est observée montrant la transition Holocène, dernier maximum glaciaire. En comparant ces données avec les données de Dôme C, on constate que cette transition n'est pas à la même profondeur sur les deux sites. Cette différence pourrait s'expliquer par une accumulation inférieure d'environ 10% à Dôme Concordia.

On constate également un aplatissement des grains avec la profondeur. Ceci permet d'estimer la vitesse de déformation verticale de la glace.

3 AUTOMATIC RECONSTRUCTION OF POLYCRYSTALLINE ICE MICROSTRUCTURE FROM IMAGE ANALYSIS: APPLICATION TO THE EPICA ICE CORE AT DOME CONCORDIA, ANTARCTICA

by
MICHEL GAY
and
JEROME WEISS
LGGE, CNRS, B.P. 96, 38402 St Martin d'Hères Cedex

(Article sous presse dans "Journal of Glaciology")

Abstract

A digital image processing approach is proposed which allow to extract 2D polycrystalline ice microstructure (grain boundaries) from thin sections observed between cross-polarizers. It is based on image segmentation of colour images. The method is applied to the preliminary analysis of the shallow (Holocene) ice of the EPICA ice core at Dome Concordia, Antarctica. Structural parameters such as the mean cross-sectional area, shape anisotropy and grain morphology, are obtained. The interest and limitations of this automatic procedure are discussed.

3.1 Introduction

As for many crystalline materials, ice microstructure, i.e. the size and morphology of grains, controls many physical and mechanical properties of the material. It is therefore of primary importance to obtain a description of this microstructure as complete as possible. This includes not only mean grain size measurements (we will come back later on the definition of the "size"), but also size distribution, shape anisotropy (elongation of grains along a preferential direction), grain morphology (through the relations volume/surface or surface/perimeter), or topological characteristics. Moreover, as stressed by Alley et al. (1986) or Petit et al. (1987), ice microstructure may record the age and past history of ice. Indeed, microstructure evolution depends on strain history, temperature and impurity content (Alley et al., 1986; Alley and Woods, 1996) these parameters varying themselves with climate. This is of particular importance when studying polar ice from deep ice cores. As an example, correlations have been observed between climatic record from $\delta^{18}O$ isotopic studies and mean grain size evolution in polar ice (Duval and Lorius, 1980; Thorsteinsson et al., 1995). Correlations between grain size and impurity content, though relatively noisy, have also been reported (Alley and Woods, 1996; Thorsteinsson et al., 1995).

Most of the analyses of ice microstructure presented so far were performed manually on 2D thin sections. They were therefore laborious and time consuming. For this reason, most of these works were restricted to the study of mean grain size evolution. Several different methods were used to estimate this "size". Gow (1969), in polar firn, measured the length and breadth of the 50 largest crystals in each section with a "pocket comparator". These 50 crystals represented at least 25% of the total number of crystals, but this representativity depended on the number of crystals in the section and therefore on the mean grain size itself. These crystals do not therefore represent the entire population of grains, especially if size distribution is changing with time. Duval and Lorius (1980) estimated mean grain size from crystal counting on a given area, but did not take into account the smallest grains, sometimes of ambiguous existence. Once again, the entire population is not taken into account. Thorsteinsson et al. (1995) or Alley and Woods (1996) used the linear intercept method. Alley and Woods (1996) reported some data about size distributions as well. Although probably less "subjective" than the former ones, this method can raise some problems of interpretation. The mean intercept length is related to the mean cross-sectional area through the average morphology of grains which can change with time. Moreover, Thorsteinsson et al. (1995) performed linear intercept analysis along a unique (vertical) direction, which is not representative of real grain morphology if grains are not isotropic, and if this shape anisotropy is changing (as observed during this work; see below). The definition of grain "size" is actually not trivial. As demonstrated in this

work, different size estimation methods can lead to very different results, for example for grain growth kinetics (see below) and can be therefore misleading. Another problem with manual methods is related to "human" bias. The acuity, concentration and measuring ability of a worker can strongly vary during a long, tiring day, especially in a cold environment. This will, most probably, increase the discrepancy of results.

In order to obtain the most complete representation of ice microstructure on 2D thin sections, all the grain boundaries have to be extracted. It is worth noting here that this complete description is necessary (though maybe not sufficient) to reconstitute 3D microstructure from 2D analysis (Underwood, 1970). This cannot be reasonably achieved manually. Here, we present an automatic method, based on image analysis, which allow to easily and rapidly extract ice microstructure from thin sections examined between crossed polarizers. After a technical presentation of the method and the image analysis procedure, we illustrate its interest with a preliminary study of ice microstructure in the shallow part (Holocene ice) of the EPICA ice core at Dome C, Antarctica, discussing on the definition of grain "size", shape anisotropy and grains morphology.

3.2 Experimental procedure

The method of extraction of grain boundaries from colour images of 2D thin sections is based on image segmentation from variation of colour between neighbouring grains observed between crossed polarizers. Arnaud et al. (1998) presented a different technique to reveal and automatically characterize pores and grains boundaries in firn, based on sample sublimation, coaxial episcopy and image analysis. Using this technique, Arnaud (1997) was able to determine distributions of grain cross-sectional areas, at different depths, in firn at Vostok station, Antarctica. Though worth using to study porous media (e.g. firn), optimal sublimation conditions are not easily obtain, and hence sample preparation is difficult and time consuming. The "standard" thin sections used in the present work are much easily and rapidly obtained. Eicken (1993) proposed an automated image analysis of ice thin sections under crossed polarizers. Unlike the present work, this author used a universal (Rigsby) stage and grey scale digitization.

3.3 Preparation of thin sections and image recording

Ice thin sections are prepared by regular microtoming. Section thickness is an important parameter. The optimized thickness is a compromise between large enough colour differences between grains, and sharp enough colour transitions. Too thick sections have great colour differences but grains boundaries appear too thick, with coloured interferences fringes which can be misleading for image analysis. Too thin sections have well defined spatial transitions but weak differences, most of the grains appearing within a grey range of colours. From experience, it turned out that the optimized thickness corresponds to grain colours around a brown-yellow range. An example is given on Figure 1a. Note that in the case of examination of columnar ice, with columns axis perpendicular to the section, this problem of thickness would be less crucial, grain boundaries being almost perpendicular to the section.

For each thin section, three different pictures are taken while rotating crossed polarizers together (at 0°, 30° and 60°), the thin section itself being fixed with respect to the camera. By this way, grains remaining dark for one rotation angle are illuminated for other angles, except if their c-axes are perpendicular to the section. The image field has to coincide for the three different pictures. Note that a universal stage is not used in the present analysis. For the analysis of the EPICA ice core (see below), slides were taken with a regular camera, then digitalized using a CCD colour camera. However, digital image recording can be performed directly with a digital camera. The format of the images was 640×480 pixels. The choosen image field resulted from a compromise between a good resolution and a reasonable statistical population of grains, i.e. at least 200 grains. In the study of the shallow part of the EPICA ice core, with mean cross-sectional area of grains ranging between 1 and 2 mm^2, this corresponded to a resolution of 42.5 µm/pixel.

The sampled population of grains varied from about 500 grains at a depth of 100m to slightly less than 200 grains at 360m.

3.4 Image analysis

Image segmentation aims to subdivide the image into regions of homogeneous colour characteristics (Gonzales and Woods, 1992). The discontinuities, i.e. grain boundaries in the present case, correspond to sharp spatial variations of these characteristics. They can be detected using derivative operators (or filters; Gonzales and Woods, 1992). However, pre-processing is generally required in order to remove sharp but small variations resulting from noise, while preserving large variations. Therefore, any image segmentation processing should include a pre-processing step in order to remove noise and sharpen variations, followed by a detection of the discontinuities using derivative filters. In the digital image processing developed for ice microstructure extraction, summarized in algorithm 1 and detailed below, steps #2.1 and #2. 2 belong to the pre-processing, whereas steps #2.3 and #2.4 correspond to the detection of the discontinuities.Within this general framework, several different procedures can be considered at each step of the algorithm. The algorithm proposed below results from such trials at each step. As an example, at step #2.1, a "closing then opening" procedure (instead of "opening then closing") was tested but found to be less efficient to reduce noise (see below). Although the proposed image processing was found to be the most efficient, this does not exclude the possibility for an another, completely different, efficient processing.

The proposed image segmentation processing is as follows:

1. The first colour image (an example is shown on figure 1a), noted I, is decomposed into three grey scale images, *brightness*, *hue* and *saturation* (Gonzales and Woods, 1992), respectively noted grey scale image 1, 2 and 3. Other decompositions of colour images are possible, but this one is used by the human visual system to interpret and differenciate colours. This is the reason of our choice. To each pixel of a grey scale image is assigned an intensity, or grey level, from 0 (black) to 255 (white) and noted $I[x,y]$. x and y are the pixel coordinates. The saturation grey scale image corresponding to figure 1a is shown on figure 2a, as well as the variation of intensity along a section.
2. For each grey scale image #1 to #3, the following steps 2.1 to 2.5 are performed:

2.1. Morphologic filter. This filter consists in an opening operation, followed by a closing operation. An opening operation is an erosion followed by a dilation, whereas a closing operation is exactly the reverse. Erosion of a grey scale image consists in assigning to each pixel the minimum intensity of the set of pixels corresponding to this pixel and its neighbours (8 nearest neighbours in the present analysis). Similarly, dilation assigns the maximum intensity of the set to the pixel. More details are given in Gonzales and Woods (1992). This filter reduces high frequency noise, and allows to remove small and unsignificant features such as microcracks and pits. The result for a typical image is shown on figure 2b.

2.2. Median filter. The median m of a set of values is such that half the values in the set are less than m and half are greater than m. In order to perform median filtering in a neighbourhood of a pixel, first the intensities I of the pixel and of its neighbours are sorted, the median is then determined and assigned to the pixel. In the present analysis, we limited the calculation to the 8 nearest neighbours. This filter reduces noise while preserving the sharpness of the discontinuities. The result is shown on figure 2c.

2.3. Sobel filter. This filter is a derivative filter which detects discontinuities of intensity. The gradient of intensity (along directions x and y) is calculated. The maximum value of dI/dx and dI/dy is assigned to the pixel. This results in low values for homogeneous regions, and very high values along discontinuities (grain boundaries). Thresholding will be therefore easy to perform, in order to extract these discontinuities. More details about Sobel filter are given in Gonzales and Woods (1992). The image obtained is shown on figure 2d with its associated grey level histogram.

2.4. Thresholding. A threshold is defined on the histogram (figure 2d) by visual testing: the operator "moves" the threshold along the grey scale and selects the best result for the thresholding of boundaries. A grey level of 255 (white) is assigned to the pixels above the threshold, corresponding to discontinuities, and a grey level of 0 (black) is assigned to the pixels below the threshold. This results in a binary image. The three thresholds determined for the three grey level images (*brightness*, *hue* and *saturation*) are memorized. They will be used for thresholding of the two other colour images, in order

to accelerate the process.

2.5. Skeletonizing. This operation, also called thinning, determines the skeleton, one pixel wide, of the white regions of the formerly defined binary image. This classical algorithm is detailed in Gonzales and Woods (1992). The sketeton is shown on figure 2e.

3. The three binary images resulting from digital processing (steps 2.1. to 2.5;) of the three grey level images are summed.

4. The operations 1. to 3. are repeated for the two other colour images noted II and III, using the previously memorized thresholds (see above).

5. The three binary images arising from the three colour images I, II and III, are summed. Note that the obtained binary image results from the addition of 3×3=9 binary images. The result is shown on figure 2f.

6. Binary closing (dilation then erosion). After step #5, because the three former colour images do not coincide perfectly, grain boundaries appear blurred. Binary closing allows to re-assemble blurred boundaries.

7. Skeletonizing.

8. Final trimming to remove “dead end” branches.

The final microstructure obtained at the end of this algorithm is shown on figure 1b, to be compared with one of the three starting colour images (figure 1a). Structural and topological parameters can now be computed on this final binary image. Note that the digital image processing proposed by Eicken (1993), though different, included some operations similar to that employed here, such as grey scale image opening or Sobel filtering. The order specified in algorithm 1 is important. If one step is omitted, the quality of image segmentation decreases and we loose grain boundaries. The morphologic, median, and Sobel filters are non-linear filters (Gonzales and Woods (1992)). The use of linear filters was tempted, but it results in a broadening of the transitions (or discontinuities), therefore making more difficult the thresholding.

An intrinsic limitation of the proposed method is clearly illustrated on figure 1b. When neighbouring grains have very similar c-axis orientations perpendicular to the section, they remain dark on the three colour images and are not easily segmented. Note that this effect is particularly pronounced on figure 1b. It could be reduced with the help of a universal Rigsby stage. This limitation has little effect on the calculation of mean parameters (e.g. mean area, mean perimeter) but can have an effect on grain sizes distribution towards the large sizes. The same limitations exist with manual estimation of grain sizes. Note that a manual adding of the “obvious” missed boundaries can be done easily on the computer. An another way to deal with this problem is to remove the most suspicious regions (e. g. regions noted 1 and 2 on figure 1b) from the subsequent statistical analyses.

3.5 Application to the epica ice core (a preliminary study)

The EPICA ice coring started at Dome Concordia (75°06'S, 123°24'E, elevation 3233m) during the austral summer 1996-97. It reached 363m depth at the end of the 1997-98 field season. During this season, thin sections of ice were produced along the core between 100m and 360m depth, following the procedure described above, then digitalized and analyzed at LGGE. Most of them were vertical thin sections with a breadth of about 8cm and a length (along the vertical direction) of 11cm. Only a fraction of the section, representing a surface of about 27.2×20.4 mm^2, was digitalized. At three different depths (120m, 218m, 357m), three images were digitalized from the same section, but with different image fields, in order to estimate the experimental scatter on the structural parameters extracted. Few horizontal thin sections were also produced and digitalized at the same resolution.

From the microstructures obtained after image analysis, numerous structural and topological parameters can be extracted in order to characterize the material. As an illustration of the potential of the procedure described above, we will focus now on three problems: the definition of grain "size", and its influence on grain growth kinetics; shape anisotropy; and morphology of grains.

3.6 Mean grain size and grain growth

As for many crystalline materials (see e.g. Ralph, 1990) at elevated relative temperature (at least $T/T_F>0.5$), polar ice experiences grain growth through time. The driving force for grain growth arises from a reduction of the total grain boundary free energy within the system (Ralph, 1990; Duval and Lorius, 1980). Normal grain growth, i.e. a linear increase of the mean cross-sectional area, $\bar{A}$, with time *t* (Alley and Woods, 1996), has been reported for shallow ice of cold ice sheets (Gow and Williamson, 1976; Duval and Lorius, 1980).

$$\bar{A} = \bar{A}_0 + Kt \quad (1)$$

where $\bar{A}_0$ is the initial mean cross-sectional area and *K* a constant showing an Arrhenius dependance on temperature. This was sometimes expressed as a parabolic growth law for the mean grain "size" :

$$^2 = {}^2_0 + Kt \quad (2)$$

It is not the purpose of the present work to discuss the validity, the physical or climatic significance of such a growth law (see Alley et al., 1986, or Petit et al., 1987). We will restrict our analysis to the relationship between grain "size", *d*, and grain cross-sectional area, *A*, and to the influence of the method of size estimation on subsequent growth law.

Figure 3 shows the evolution of the mean squared grain size, ^{2}, with depth for the EPICA ice core, ^{2} being estimated from different method. The first one (squares) corresponds to the averaging of cross-sectional area of grains, $\bar{A}$, easily obtained from image analysis of ice microstructure map such as the one shown on figure 1b. Circles represent the mean cross-sectional area of the 50 largest grains in each section, $\bar{A}_{50}$, a way to estimate grain size similar to that employed by Gow (1969). Triangles correspond to the square of the mean linear intercept length, ^{2}. At the three depths where three different images were digitalized from the same sections, the corresponding different estimations of the mean cross-sectional area fall within a range of about 0.30 mm^2, whatever the method used ($\bar{A}$, $\bar{A}_{50}$ or ^{2}). Estimation of was performed automatically with lines along the vertical and horizontal directions and a line crossing the image each two pixels. This represents obviously a line density much larger than those used for manual measures, thus reducing scatter. These three different sets of data are well described by linear fits, but with different slopes. Note that for shallow ice of large ice sheets, a linear relationship between depth and age, *t*, is a very reasonable approximation. Therefore, the data of figure 3 seem to support equation (1). However, the constant *K* varies with the method used to evaluate the mean squared grain size up to a factor of about 2 (see table I). Moreover, if one extends the linear fit for $\bar{A}_{50}$ up to the surface (0m), a much larger "initial" value is found compare to the $\bar{A}$ or ^{2} methods. This results from a bias introduced by a representativity evolving with mean grain size (see above). The relationship between $\bar{A}$ and the mean cross-sectional area of the 50 largest grains, $\bar{A}_{50}$, is not trivial and obviously depends on size distribution, which could change through time and from site to site (because of temperature and climatic differences). During normal grain growth, the shape of the grain size distribution is not supposed to change, and some authors have proposed log-normal distributions to describe experimental data or results of computer simulation (see e.g. Atkinson, 1988; Anderson et al., 1989). However, such distribution has received so far no theoretical basis. Moreover, the peak value as well as the standard deviation of the distribution are changing with time. Therefore, an estimation of activation energy for grain growth by comparison of grain growth kinetics, deduced from the $\bar{A}_{50}$ method, at different sites with different mean annual temperatures (see e.g. Gow, 1969), has to be taken with caution. As mentioned above, an additional problem of the $\bar{A}_{50}$ method comes from a increasing representativity of the 50 largest grains as the mean grain size increases. In the present analysis, this representativity increased from about 10% at 100m to 25% at 360m, which is less than in the Gow (1969) analysis ($\geq$25%). To examine a possible effect of such evoluting representativity, we computed the mean cross-sectional area of the 25% largest grains in each section, $\bar{A}_{25\%}$ (see figure 3). With this method, the extrapolation of the linear fit up to 0m is very close to that found with the $\bar{A}$ or ^{2} methods (see table I).

With this method, 75% of the available information is still lost.

In classical normal grain growth analytical models (2D models, see e.g. Hillert, 1965; adapted by Alley et al., 1986 for ice; or Atkinson, 1988), the critical size parameter, d_{crit} or A_{crit}, such that grains larger than A_{crit} are growing and smaller grains are shrinking, is equal to $\bar{A}$ (or $\bar{d}$). Any other value of A, including the mean cross-sectional area of the 50 largest grains, has much less physical significance with respect to theoretical models. Note, however, that 3D parameters such as the mean grain volume would have even more physical meaning. From three-dimensional computer simulations of normal grain growth, Anderson et al. (1989) showed that, if the morphology of grains is such that grain shapes are compact and exhibit close to minimal surface areas with respect to grain volume at all times, then the "true" grain growth kinetics, based on the evolution of the mean grain volume, is very close to the kinetics derived from 2D parameters (mean cross-sectional area, $\bar{A}$). Particularly, the same constant K is found (Anderson et al., 1989).This similitude does not hold if morphology is changing through time. At the authors' knowledge, the only available data set about the distribution of grain volumes and corresponding cross-sections and linear intercepts for a "realistic" microstructure is the Anderson's paper. On this (limited) basis, we argue that the mean cross-sectional area method ($\bar{A}$) is the most "exact" to derive true 3D grain growth kinetics from thin section analyses. In table I, the constant K obtained with the 50 largest grains method is close to that obtained by Duval and Lorius (1980) from a former core drilled at the "old" Dome C site (74°39'S, 124°10'E, about 70 km from the current Dome Concordia drilling site), in agreement with the method used by these authors to estimate grain sizes.

The linear intercept method gives results closer to $\bar{A}$ than the 50 largest grains method. However, for a given volume element (a "grain"), the relation between $\bar{A}$ and depends on the element morphology (Underwood, 1970). The ratio $\bar{A}/$ ^{2} is equal to $3\pi/8 \approx 1.18$ for a sphere. For a truncated octahedron, a volume element allowing space filling and sometimes used to modelize grains (Gibson and Ashby, 1988), this ratio is about 1.32. For a space filling assembly of grains of different sizes, isotropic in average, depends on both $\bar{A}$ and on the mean perimeter of grains, (Underwood, 1970):

$$\overline{L} = \pi \frac{\overline{A}}{\overline{s}} \quad (3)$$

For a grains assembly with shape anisotropy, the problem is even more complex. It is shown below that the average shape anisotropy of grains varies with depth (and so time) along the EPICA ice core. The linear intercept method is therefore not able to exactly reproduce the evolution of $\bar{A}$, and so the evolution of the mean grain volume, as shown by Anderson et al. (1989).

From the above discussion, it appears that in 2D the measure of the mean cross-sectional area, $\bar{A}$, is the size definition ($\bar{d} \sim \bar{A}^{1/2}$) with the best physical significance. This measure is difficult to determine manually, thus demonstrating the relevance of the automatic procedure described here.

Finally, one can notice on figure 3 that the mean crystal sizes observed on horizontal sections are systematically slightly larger than expected from the regression analysis, whatever the definition of the size. This results from the flattening of grains on the horizontal plane (see below).

3.7 Shape anisotropy

In order to show a possible anisotropy of grains shape, the ratio between the mean linear intercept along an horizontal (X) direction and the mean linear intercept along the vertical (Z) direction, $\bar{L}_X/\bar{L}_Z$, has been calculated on vertical thin sections (figure 4). This ratio is systematically larger than 1, which means that the grains are flattened along the horizontal plane. Flattening seems to increase with depth, from about 1.05 at 100m to about 1.12 at 180-200m, then remains roughly constant up to 360m. At the three depths where three different images were digitalized from the same sections, the different estimations of $\bar{L}_X/\bar{L}_Z$ fall within a range of about 0.03-0.04, except for one image at 357m which exhibits a surprisingly low flattening. On the other hand, grains are isotropic on horizontal thin sections, with a ratio $\bar{L}_X/\bar{L}_Y$ close to 1 (Y is a second horizontal direction). Such a shape anisotropy makes the link

between $\bar{L}$ and $\bar{A}$ even more difficult to establish (see above).

3.8 Grains morphology

On figure 5 is plotted the evolution of the ratio A/s^2 (cross sectional area/perimeter^2) averaged over all the grains of the section, with depth. This adimensional mean form factor, which is maximum for spheres ($A/s^2=1/4\pi\approx0.08$), is a measure of the average grain morphology. This average grain morphology is remarkably stable during grain growth around a value of 0.055. This suggests that grain morphologies are close, in average, to an equilibrium minimizing surface area (in 3D) with respect to grain volume while subject to topological constraints and flattening.

3.9 Conclusion and prospect

An automatic procedure, based on colour image analysis of thin sections observed between crossed polarizers, has been developed in order to extract 2D (cross-sectional) ice microstructure. From these microstructures, numerous structural, morphological and topological parameters can be determined to characterize the material and its evolution. This has been illustrated with three examples on the shallow ice of the EPICA ice core (Dome C, Antarctica), including mean cross-sectional area of grains, shape anisotropy and average grain morphology.

However, averaged values of parameters are not sufficient to follow in details the evolution of the microstructure. As an example, the evolution of grain size distribution through time can be used to differenciate grain growth regimes (normal vs abnormal; see e.g. Hillert, 1965, or Ralph, 1990). Statistical distributions of parameters can be easily and automatically extracted from microstructures such as the one represented on figure 1b. Note that Arnaud (1997) obtained such distributions for Vostok firn, using a different technique to reveal the microstructure (see above).

Topological parameters, e.g. the number of sides per grains (in 2D), are also of primary importance to characterize the physics of polycrystalline materials (Atkinson, 1988), including ice (Arnaud, 1997). Topological 2D parameters are easily obtained from reconstructed ice microstructures.

The ultimate goal of the study of ice microstructure is to infer 3D parameters, such as volumes of grains, from 2D parameters obtained on cross-section. This is a difficult problem. As noted above, in the case of isotropic microstructures and compact grain shapes, mean grain volume could be correctly estimated from the mean cross-sectional area (Anderson et al., 1989). This is no longer true for anisotropic microstructures, or changing morphologies. Thorvaldsen (1997) stressed that two polycrystals with identical mean linear intercept on 2D section can have different mean grain volume, depending on grain volume distribution and grain shapes. The correspondence between cross sectional area distributions and grain volume distributions is even less straightforward (Anderson et al., 1989). A complete description of the 2D microstructure, and especially statistical distributions of structural and topological paramaters, is necessary, though maybe not sufficient, and simplifying stereological hypotheses on isotropy and morphology have to be made in order to infer 3D parameters. Such kind of analysis would be impossible to perform from manual analysis of thin sections.

Acknowledgments

This work is a contribution to the "European Project for Ice Coring in Antarctica" (EPICA), a joint ESF (European Science Foundation)/EC scientific program, funded by the European Commission under the Environment and Climate Programme (1994-1998) contract ENV4-CT95-0074 and by national contributions from Belgium, Denmark, France, Germany, Italy, the Netherlands, Norway, Sweden, Switzerland and the United Kingdom. (EPICA publication no. 5)

We would like also to thank P.Duval and L.Arnaud for valuable discussions and comments, as well as two anonymous reviewers whose comments and suggestions help to improve the clarity of the paper. LGGE is a laboratory associated with Université Joseph Fourier, Grenoble I.

References

Alley, R.B., Perepezko, J.H. and Bentley, C.R. 1986. Grain growth in polar ice: I, Theory, J. Glac., 32 (112), 415-424

Alley, R.B. and Woods, G.A. 1996. Impurity influence on normal grain growth in the GISP2 ice core, Greenland, J. Glac., 42 (141), 255-260

Anderson, M.P., Grest, G.S. and Srolovitz, D.J. 1989. Computer simulation of normal grain growth in three dimensions, Philos. Mag. B, 59 (3), 293-329

Arnaud, L. 1997. Modélisation de la transformation de la neige en glace à la surface des calottes polaires; Etude du transport des gaz dans ces milieux poreux, PhD Thesis, Université Joseph Fourier, Grenoble I.

Arnaud, L., Gay, M., Barnola, J.M. and Duval, P. 1998. Imaging of firn and bubbly ice in coaxial reflected light: a new technique for the characterization of these porous media, J. Glac., in press

Atkinson, H.V. 1988. Theories of normal grain growth in pure single phase systems, Acta Metall., 36(3), 469-491

Duval, P. and Lorius, C. 1980. Crystal size and climatic record down to the last ice age from antarctic ice, Earth Planet. Sci. Lett., 48, 59-64

Eicken, H. 1993. Automated image analysis of ice thin sections-instrumentation, methods and extraction of stereological and textural parameters, J. Glac., 39 (132), 341-352

Gibson, L.J. and Ashby, M.F. 1988. Cellular solids: structure and properties, Pergamon Press, New York.

Gonzales, R.C. and Woods, R.E. 1992. Digital image processing, Reading, MA, Addison Wesley Publishing Co.

Gow, A.J. 1969. On the rates of growth of grains and crystals in south polar firn, J. Glac., 8(53), 241-251

Gow, A.J. and Williamson, T. 1976. Rheological implications of the internal structure and crystal fabrics of the west antarctic ice sheet as revealed by deep core drilling at Bryd station, CRREL Report 76-35

Hillert, M. 1965. On the theory of normal and abnormal grain growth, Acta Metall., 13, 227-238

Petit, J.R., Duval, P. and Lorius, C. 1987. Long-term climatic changes indicated by crystal growth in polar ice, Nature, 326, 62-64

Ralph, B. 1990. Grain growth, Mat. Sci. Tech., 6, 1139-1144

Thorsteinsson, T., Kipfstuhl, J., Eicken, H., Johnsen, S.J. and Fuhrer, K. 1995. Crystal size variations in Eemian-age ice from the GRIP ice core, central Greenland, Earth Planet. Sci. Lett., 131 (3-4), 381-394

Thorvaldsen, A. 1997. The intercept method-2. Determination of spatial grain size, Acta Mater., 45 (2), 595-600

Underwood, E.E. 1970. Quantitative stereology, Reading, MA, Addison Wesley Publishing Co.

	$\bar{A}$	^{2}	$\bar{A}_{50}$	$\bar{A}_{25\%}$	Duval and Lorius (1980)
K' (mm²/m)	0.60×10^{-2}	0.80×10^{-2}	1.00×10^{-2}	1.68×10^{-2}	1.10×10^{-2}
R^2 (regression coeff.)	0.92	0.95	0.87	0.93	

Table I: Grain growth kinetics for the shallow part (Holocene ice) of the EPICA ice core at Dome Concordia deduced from different grain size definitions (see text for details). Grain growth kinetics are expressed in terms of mean squared grain size *vs* depth: $\bar{d}^2=\bar{d}_0^2+K'z$ (z=depth in meters).

Figure 1.

a) Thin section of polar ice examined between crossed polarizers, with an optimized thickness for image analysis. EPICA ice core, Dome C (Depth=170m)

b) The corresponding binary image of the microstructure (grain boundaries), after digital image processing. ① and ② are regions where the segmentation of grains was difficult, owing to c-axes of grains perpendicular to the thin section.

Figure 2. Successive modifications of a digital image of grains.

a) Saturation grey scale image of the colour image of figure 1a. Left: full image. Right: variation of intensity along a section, indicated by a white line on the left.

b) Grey scale image after morphologic filter.

c) Grey scale image after median filter.

d) Grey scale image after Sobel filter. Right: corresponding grey level histogram

e) Binary image after thresholding and skeletonizing of the image of figure 2d.

f) Binary image after summation of 3×3=9 binary images similar to that of figure 2d (see text for details).

Figure 3. Evolution of the mean cross-sectional area of grains with depth from the shallow part of the EPICA ice core.
Squares: deduced directly from image analysis of ice microstructure
Triangles: deduced from the linear intercept method
Circles: mean cross-sectional area of the 50 largest grains
Inverted triangles: mean cross-sectional area of the 25% largest grains
Open symbols: vertical thin sections
Closed symbols: horizontal thin sections

Figure 4. Evolution of shape anisotropy with depth from the shallow part of the EPICA ice core.
Triangles: vertical thin sections; anisotropy measured by $\bar{L}_X/\bar{L}_Z$ (Z: vertical direction, X: horizontal direction)
Squares: horizontal thin sections; anisotropy measured by $\bar{L}_X/\bar{L}_Y$ (X and Y: horizontal directions)

Figure 5. Evolution of the average grain morphology, expressed by the form factor A/s^2 averaged over all the grains of the section, with depth, for the shallow part of the EPICA ice core. Arrows indicate, for comparison, the form factor of three simple 2D shapes (circle, square and equilateral triangle).

Algorithm 1

For colour image *i*=I to III

begin
The colour image *i* is decomposed into three grey scale images *brightness*, *hue* and *saturation*, called grey scale images 1, 2 and 3 respectively.

For grey scale image *j*=1 to 3

begin
Morphologic filter: opening then closing
Median filter
Sobel filter
Thresholding
Skeletonizing ⇨ binary image *j*
end

Addition of the three binary images *j* ⇨ binary image *i*
end

Addition of the three binary images *i*

Binary closing: dilation then erosion

Skeletonizing

Trim

⇨ microstructure

Figure 1

Figure 2

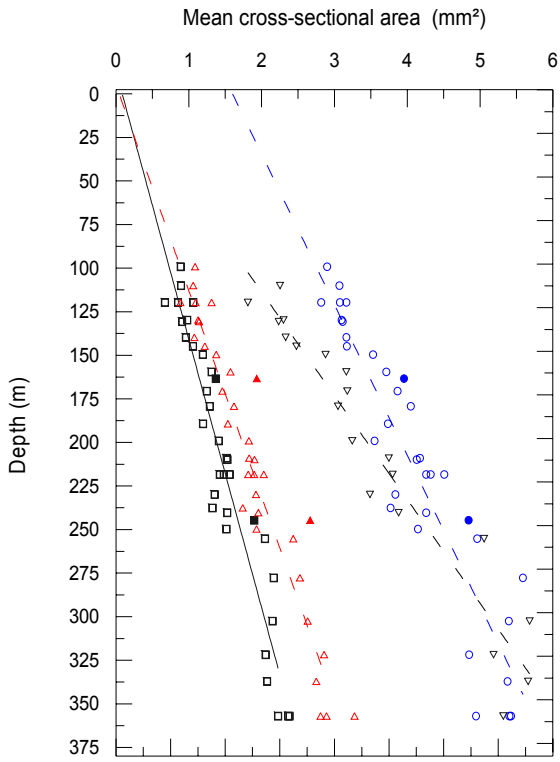


Figure 3

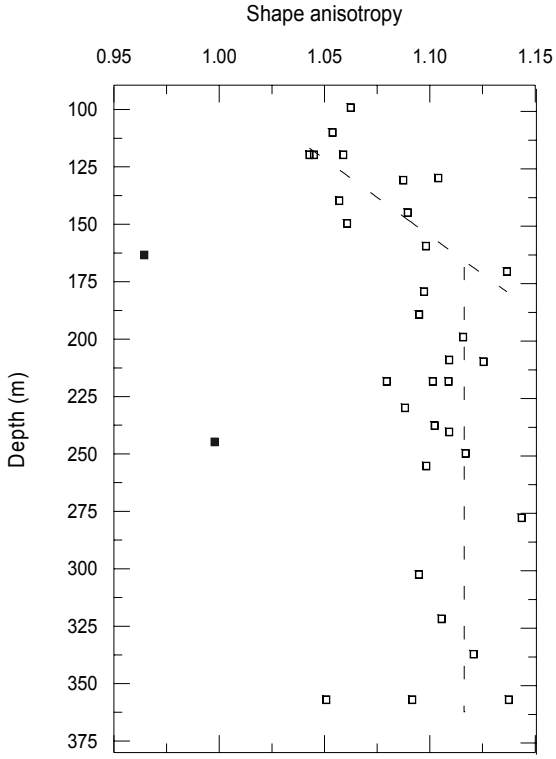


Figure 4

Figur

e 2

Figure 5

4 SHALLOW ICE MICROSTRUCTURE AT DOME CONCORDIA, ANTARCTICA

by
Laurent Arnaud, Jérôme Weiss, Michel Gay and Paul Duval
LGGE, CNRS, BP 96, 38402 St Martin d'Hères Cedex

(Article sous presse dans "Annals of Glaciology")

Abstract

The shallow ice microstructure at Dome Concordia, Antarctica, has been studied between 100 m and 580 m. An original digital image processing technique has been especially developed in order to extract ice microstructure (grain boundaries) from thin sections prepared during the two first scientific EPICA field seasons (1997/98 and 1998/99). Using this, not only the mean crystal size, but also crystal size distributions and shape anisotropy were determined. The mean crystal size profile as well as crystal size distributions reveal normal grain growth up to 430 m. Between 430 m and 500 m, a marked decrease of crystal size is observed and compared with similar trend obtained in the "old" Dome C ice core formerly associated with the Holocene/Last Glacial transition (Duval and Lorius (1980)). This seems to indicate a slightly lower accumulation rate (by less than 10 %) at Dome Concordia. The shapes of the crystal size distributions, though very similar, do evolve with depth and seem to be sensitive to climatic changes. An increasing flattening of crystal shape is observed with depth. This allowed to estimate the vertical strain rate of the shallow part of the ice sheet.

4.1 Introduction

The mean crystal size (see below for a definition of "size") has been recognized as an interesting parameter, independent of the isotopic composition of the ice, to reveal climatic changes from polar ice cores (Petit et al. (1987)). This correlation between crystal size and climate is well illustrated by a strong decrease of the mean crystal size at a climatic transition, such as the Holocene/Last Glacial Maximum transition (Duval and Lorius (1980) ; Petit et al. (1987)). Moreover, polar ice microstructure (crystal size and crystal shape) is of interest because it controls different physical properties of the material and can give insight into the strain history and recrystallisation processes of the ice, as for any crystalline material.

So far, most of the analyses of ice (or firn) microstructure from polar ice cores were performed manually on 2D thin sections, and therefore restricted to the study of the mean crystal size profile (see e.g. Gow (1969); Duval and Lorius (1980); Thorsteinsson et al. (1995)). However, in order to fully characterize ice evolution, including grain growth, flattening of grains or recrystallisation processes, not only the mean crystal size is needed but also size distribution, grain morphology and topological characteristics. Alley and Woods (1996) reported some data about size distributions from the shallow ice of the GISP2 ice core, Greenland. Such detailed analyses are difficult to perform manually and very time consuming. A digital image processing based on the segmentation of colour images of 2D thin sections of ice observed between cross-polarizers has been developed recently at LGGE (Gay and Weiss, 1999). This allows the automatic extraction of all the grain boundaries on the section, from which morphological, statistical and topological parameters can be computed.

The present work presents a preliminary analysis of the ice microstructure from the EPICA ice core at Dome Concordia, Antarctica (75°06'S, 123°24'E, elevation 3233m), up to a depth of about 580m, based on this automatic digital processing. After a short description of the experimental procedure employed, the mean crystal size profile is given and discussed, especially the depth at which the Holocene/Last Glacial transition is observed. Then, crystal size distributions are described and their evolution with depth discussed. This gives insight into the the grain growth process in shallow polar ice. Finally, preliminary results about the shape anisotropy of grains (flattening) are given.

4.2 Experimental procedure

The EPICA ice coring started at Dome Concordia during the austral summer 1996-97. It reached 787m depth at the end of the 1998-99 field season. During the field seasons 97-98 and 98-99, thin sections of ice were produced along the core between 100m and 581m depth, then digitalized and analyzed at LGGE. Because of the very brittle character of the ice below 581m, deeper ice was left at the drilling site to relax and no thin sections have been prepared so far between 581m and 787m.

The preparation of thin sections, the image recording and the digital image processing used to extract the microstructures have been detailed in Gay and Weiss (1999) and willl not be discussed here. Note simply that at each depth, three different pictures of the same thin section were taken while rotating crossed polarizers together (at 0°, 30° and 60°), the thin section itself being fixed with respect to the camera. The image analysis combined information from the three images to reveal grain boundaries. After digitalization, the image resolution was 48.1 m/pixel whereas the image field covered 31mm× 23 mm. The number of grains sampled in one image ranged between 200 and 500.

4.3 The mean crystal size profile

In the previous analyses of the mean crystal size in polar ice cores, several different methods were used to estimate this "size". Gow (1969), in polar firn, measured the length and breadth of the 50 largest crystals in each section with a "pocket comparator". Duval and Lorius (1980) estimated mean grain size from crystal counting on a given area, but did not take into account the smallest grains, sometimes of ambiguous existence, whereas Thorsteinsson et al. (1995) or Alley and Woods (1996) used the linear intercept method. The linear intercept method expresses the "size" in terms of *length*, whereas the size is a mean crystal *area* with the other methods of analysis. More importantly, even after a re-scaling of all the measures to the same dimension (e.g. an area), these different size estimation methods lead to very different results, for example for grain growth kinetics, and can be therefore misleading (Gay and Weiss (1999); Arnaud (1997)). The size definition with the best physical significance would be a mean crystal volume. This 3D parameter cannot be directly determined from a single 2D thin section. To the authors' knowledge, the only available data which allow a comparison of 3D mean crystal volume with 2D (or 1D) parameters is the Anderson et al. (1989) simulation of normal grain growth. On this (limited) basis, Gay and Weiss (1999) have shown that the mean cross-sectional crystal area method, averaging over the entire crystal population of the section, is the most "exact" way to derive true 3D grain growth kinetics from thin section analyses. This analysis, difficult to perform manually, can be easily computed from the 2D microstructures extracted by image analysis (Gay and Weiss (1999)). The crystal "sizes" reported below were estimated by this way. From a limited analysis, Gay and Weiss (1999) estimate the dispersion of the mean cross-sectional area to less than 0.30 mm^2. A planned analysis of one meter continuous thin sections will furnish a better estimate of the dispersion and variability of the mean cross-sectional area.

Figure 1 shows the evolution of the mean cross sectional crystal area versus depth. In the shallow part of the core (from 100 m to 430 m), the results are in agreement with a linear increase of the mean crystal area with depth. According to previous glaciological studies (Duval and Lorius (1980), Gow (1969) and Alley et al. (1986)) normal grain growth in ice is characterized by a linear increase of the mean cross sectional (A) area with time (t) :

$$A = A_0 + K(T) \times t \qquad (1)$$

The growth rate K(T) is an Arrhenius temperature dependent factor. Therefore, the linear relation (1) no longer holds with varying temperature, i.e. climatic changes. For shallow ice in a large ice sheet, a linear relationship between depth and age is a very reasonable approximation. Therefore, as previously described by Duval and Lorius (1980), the linear increase of the mean crystal area with depth characterizes a normal grain growth process during Holocene.

For deeper ice (between 430 m and 500 m), the mean crystal area was observed to decrease

significantly in size (Figure 1 and 2a). The same feature (see Figure 2b) was observed in the "old" Dome C ice core (74°39'S, 124°10'E, elevation 3240 m) and associated by Duval and Lorius (1980) with isotopic variations due to the Holocene/Last Glacial transition. If both decreases at Dome Concordia (Figure 2a) and at the "old" Dome C (Figure 2b) are representative of the same climatic event, a comparison of the two profiles able us to compare accumulation rate at these two different drilling sites, located about 70 km apart. The crystal size decrease is observed over about the same thickness of ice i.e. ~ 70 m, but slightly shifted upwards at Dome Concordia. This shift, less than 10 %, gives an upper estimate for the difference between the accumulation rate at the two drilling sites.

After this marked decrease, the crystal size seems to increase again in the deepest part of the core, supposedly within the last glacial.

4.4 Size distributions

The shape of the grain size distribution is an another important parameter to characterize grain growth or recrystallisation processes in crystalline materials (see e.g. Ralph (1990), or Atkinson (1988)). It is customary to plot size distributions in terms of normalized grain "radius", R/R_m, where R can be calculated, for example, as the square root of a cross-sectional area, and R_m is the mean radius (see e.g. Anderson et al. (1989)). In material science, one classically divides the processes of grain growth into two types: normal and abnormal (Ralph (1990)). Normal grain growth is characterized by a grain size distribution remaining the same shape (typically log-normal) with time (Ralph (1990), Atkinson (1988)). A typical crystal size distribution is shown on Figure 3a. The experimental histogram fits well a log-normal distribution. Similar histograms were extracted from each thin section along the whole core between 100m and 580m. Log-normal distributions were systematically observed. In first approximation, the shape of the normalized size distribution is independent of depth (see below); all grain size data at all depths gather together (more than 20000 grains) are log-normally distributed (Figure 3b).

A log-normal distribution is fully characterized by two independent parameters : the average value and standard deviation of $\ln(R/R_m)$. The evolution of these two parameters with depth is plotted respectively on figures 4a and 4b. The range of variation is narrow in both cases (see above and Figure 3b). This is illustrated on figure 5 which shows the most different log-normal distributions observed, indeed very close. This strongly argues for a normal grain growth process for shallow polar ice. An abnormal grain growth would have been characterized by a second maximum in the grain size distribution at large grain size (see e.g. Ralph (1990)), never observed during this work.

However, within these narrow ranges of variation, significant trends can be detected, especially during the decrease of the mean grain size previously associated with climatic transition. Average value and standard deviation of $\ln(R/R_m)$ follow inverse trends throughout the entire depth.

Ongoing detailed analyses of the variations of crystal size distributions will help to reveal the very nature of the grain growth process in polar ice, and especially the role of impurities (bubbles, dust, dissolved impurities (Alley et al. (1986)) on grain boundary migration.

4.5 Shape anisotropy

In order to show a possible anisotropy of grains shape, the ratio between the mean linear intercept along an horizontal (X) direction and the mean linear intercept along the vertical (Z) direction, $\bar{L}_X/\bar{L}_Z$, has been calculated on vertical thin sections (figure 6). Estimations of $\bar{L}_X$ and $\bar{L}_Z$ were performed automatically with a line crossing the image each two pixels, i.e. 96.2 m. This ratio is systematically larger than 1, which means that the grains are flattened along the horizontal plane.

Flattening seems to increase with depth, from about 1.05 at 100m to about 1.19 at 580m. This corresponds to a flattening of roughly 13 % over 480 m. Using the chronology given by Lorius et al. (1979) for the "old" Dome C, corrected by a 10 % decrease of the accumulation rate (see section 3), one can estimate from this flattening a vertical strain rate of $0.13/13000\ \text{yr} = 1.00\times10^{-5}\ \text{yr}^{-1}$. This is in good agreement with

a simple estimate of this strain rate based on an equilibrium hypothesis for the ice sheet. At equilibrium, i.e. a constant thickness of the ice sheet, a 3.4 cm accumulation of ice (accumulation rate given by Lorius et al. (1979) for the "old" Dome C corrected by a 10 % decrease (see section 3)) is spread each year over a 3200 m deep ice column leading to a strain rate of $3.4/3200 = 1.04\times10^{-5}$ yr^{-1}. This agreement indirectly validates the hypothesis of homogeneity of the strain-rate through the full ice thickness, used for the second estimate.

4.6 Conclusion

Experimental results on the ice microstructure (crystals size and shape) from the EPICA ice core at Dome Concordia, Antarctica, have been obtained from image analysis of thin sections prepared during the two first field seasons (97/98 and 98/99). A novel digital image processing developped at LGGE (Gay and Weiss (1999)) allowed the extraction of not only the mean value of the crystal size, but also size distributions and shape anisotropy.

The mean crystal size profile as well as crystal size distributions reveal normal grain growth up to 430 m. Between 430 m and 500 m, a marked decrease of crystal size is observed and compared with similar trend obtained in the "old" Dome C ice core formerly associated to the Holocene/Last Glacial transition (Duval and Lorius (1980)). This seems to indicate a slightly lower accumulation rate (by less than 10 %) at Dome Concordia. An increasing flattening of crystal shape is observed with depth. This allowed the estimation of the vertical strain rate of the shallow part of the ice sheet.

Completion of these preliminary experimental results will allow a better understanding of the physics of crystal growth and recrystallisation processes in polar ice. Numerous different morphological and topological parameters will be easily extracted using our digital image processing on the continuous thin section of the EPICA ice core. The effect on ice microstructure of parameters such as temperature, impurities content or stress/strain fields could be studied in order to use ice microstructure as a climatic record, and to improve our knowledge of the flow of ice sheets.

Acknowledgments

This work is a contribution to the "European Project for Ice Coring in Antarctica" (EPICA), a joint ESF (European Science Foundation)/EC scientific program, funded by the European Commission under the Environment and Climate Programme (1994-1998) contract ENV4-CT95-0074 and by national contributions from Belgium, Denmark, France, Germany, Italy, the Netherlands, Norway, Sweden, Switzerland and the United Kingdom.

We would like also to thank A. Manouvrier for technical assistance.

References:

Alley, R.B., Perepezko, J.H. and Bentley, C.R. 1986. Grain growth in polar ice: I, Theory, J. Glac., 32 (112), 415-424

Alley, R.B. and Woods, G.A. 1996. Impurity influence on normal grain growth in the GISP2 ice core, Greenland, J. Glac., 42 (141), 255-260

Anderson, M.P., Grest, G.S. and Srolovitz, D.J. 1989. Computer simulation of normal grain growth in three dimensions, Philos. Mag. B, 59 (3), 293-329

Arnaud, L. 1997. Modélisation de la transformation de la neige en glace à la surface des calottes polaires; Etude du transport des gaz dans ces milieux poreux, PhD Thesis, Université Joseph Fourier, Grenoble I.

Atkinson, H.V. 1988. Theories of normal grain growth in pure single phase systems, Acta Metall., 36(3),

469-491

Duval, P. and Lorius, C. 1980. Crystal size and climatic record down to the last ice age from antarctic ice, Earth Planet. Sci. Lett., 48, 59-64

Gay, M. And Weiss, J. 1999. Automatic reconstruction of polycrystalline ice microstructure from image analysis: application to the EPICA ice core at Dome Concordia, Antarctica, submitted to J. Glac.

Gow, A.J. 1969. On the rates of growth of grains and crystals in south polar firn, J. Glac., 8(53), 241-251

Lorius, C, Merlivat, L., Jouzel, J. and Pourchet, M. 1979. A 30,000 yr isotope climatic record from Antarctic ice, Nature, 280, 644

Petit, J.R., Duval, P. and Lorius, C. 1987. Long-term climatic changes indicated by crystal growth in polar ice, Nature, 326, 62-64

Ralph, B. 1990. Grain growth, Mat. Sci. Tech., 6, 1139-1144

Thorsteinsson, T., Kipfstuhl, J., Eicken, H., Johnsen, S.J. and Fuhrer, K. 1995. Crystal size variations in Eemian-age ice from the GRIP ice core, central Greenland, Earth Planet. Sci. Lett., 131 (3-4), 381-394

Figures captions :

Figure 1 : Evolution of the mean cross-sectional area of crystals with depth, for the shallow part of the EPICA ice core. The straight line represents the linear regression of mean crystal size data between 100 and 430 m. The slope of this line give the growth rate (K') in mm^2/m.

Figure 2 : Evolution of the mean cross-sectional area of crystals with depth between 350 and 580m at Dome Concordia, EPICA (2a) and at the "old" Dome C (2b, Duval and Lorius (1980)). The continuous lines represent the data splines smoothing and the shaded area indicates the zone of the crystal size decrease.

Figure 3 : Relative grain radius (R/R_m) determined from cross-sectional analysis : experimental data are shown as histograms and fitted with a log-normal distribution.
(3a) Data set corresponding to one particular depth : 492 m (average value of $\ln(R/R_m) = -0.22$ and standard deviation of $\ln(R/R_m) = 0.49$)
(3b) Data set corresponding to all the depths gather together (average value of $\ln(R/R_m) = -0.26$ and standard deviation of $\ln(R/R_m) = 0.53$).

Figure 4 : Evolution of the two independent parameters characterizing the log-normal distributions fitting the experimental histogram ($\ln R/R_m$). Average value and standard deviation of $\ln(R/R_m)$ are respectively plotted versus depth in (4a) and (4b). The dashed lines indicate the limits of the grain size transition defined on figure 2.

Figure 5 : Plots of the most different log-normal distributions fitting the experimental histograms of the relative grain radius.
Continuous line : distribution corresponding to the beginning of the transition zone (average value of $\ln(R/R_m) = -0.35$ and standard deviation of $\ln(R/R_m) = 0.65$).
Dashed line : distribution corresponding to the beginning of the transition zone (average value of $\ln(R/R_m) = -0.22$ and standard deviation of $\ln(R/R_m) = 0.51$).

Figure 6 : Evolution of the vertical shape anisotropy (ratio between the mean linear intercept along an horizontal direction and the mean linear intercept along the vertical) with depth.

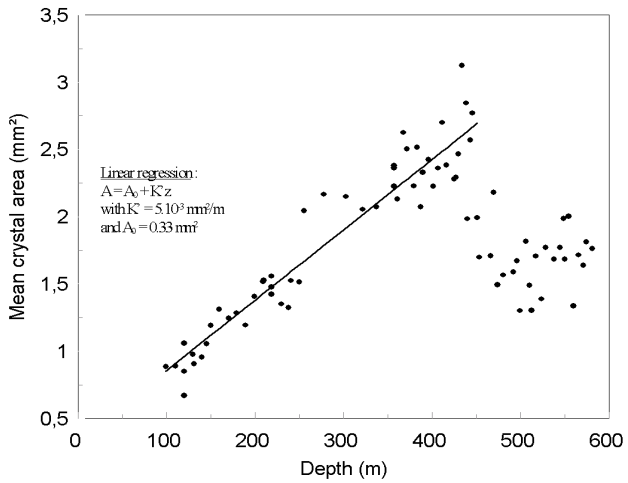


Figure 1

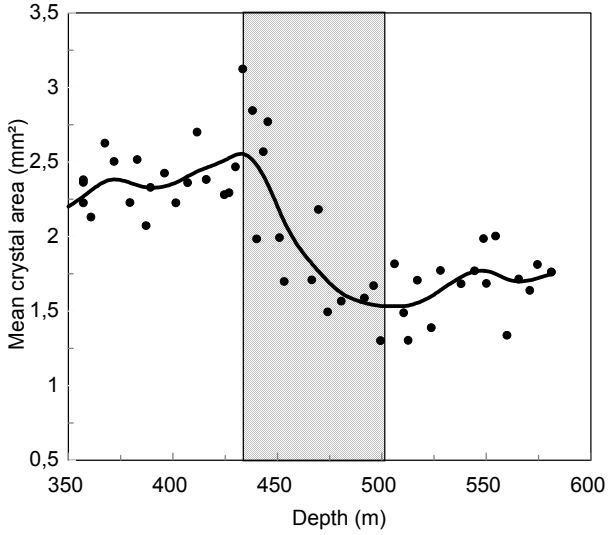


Figure 2a.

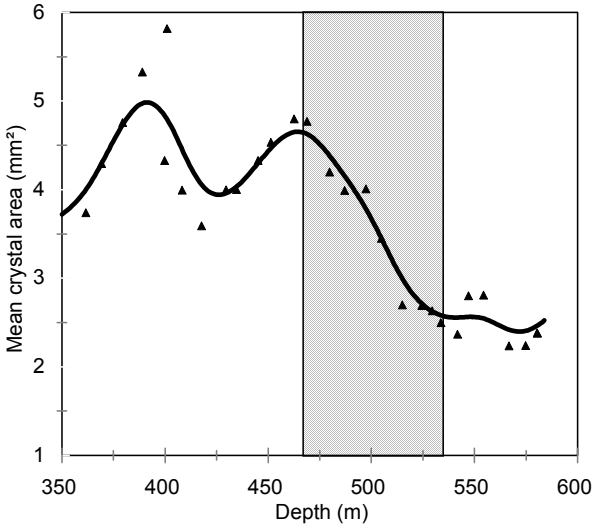


Figure 2b

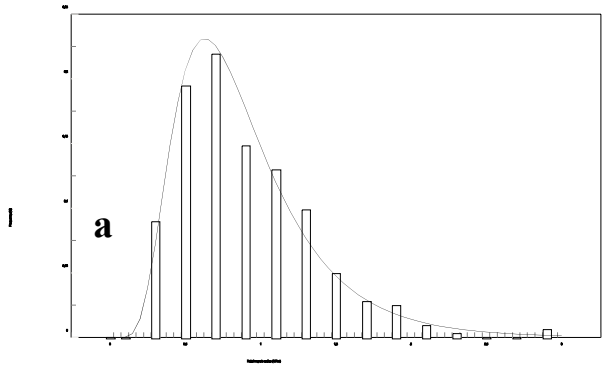


Figure 3a

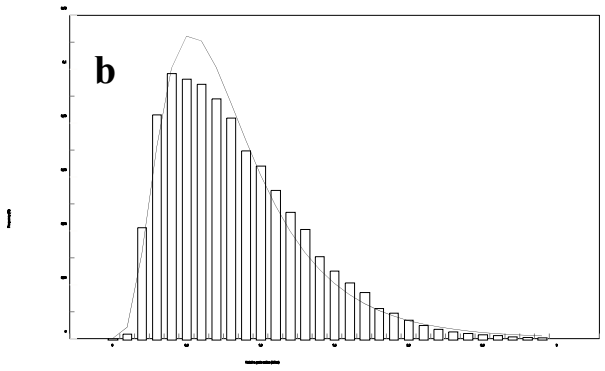


Figure 3b

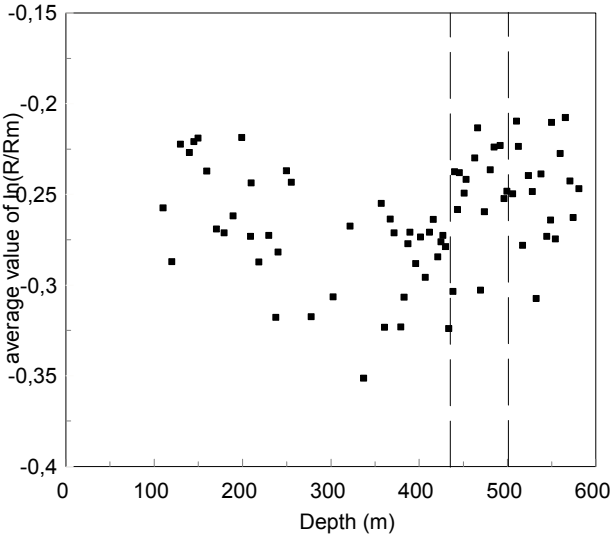


Figure 4a

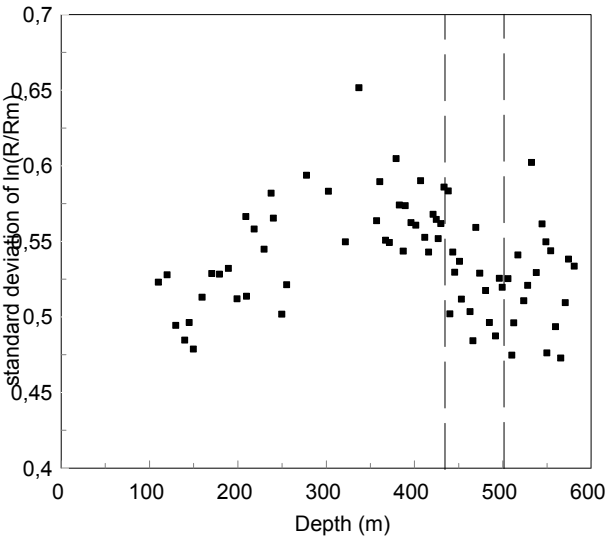


Figure 4b

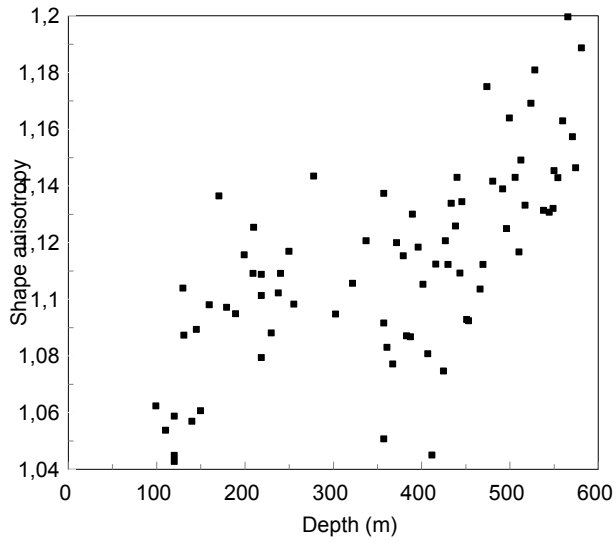

1,2
1,18
1,16
1,14
1,12
1,1
1,08
1,06
1,04
Shape anisotropy
0
100
200
300
400
500
600
Depth (m)

Figure 6

5 Evolution de la morphologie des grains :

La morphologie des grains de glace peut être étudié grâce au rapport aire/ périmètre² (utilisé page 163) que nous appelons facteur de forme Ff et que nous rappelons ici :

$$Ff = \frac{A}{p^2} \tag{6-11}$$

avec A : aire d'un cristal de glace et p son périmètre.

Grâce au traitement d'images, nous pouvons sur une image 2D en couleur d'une lame mince à une profondeur donnée, calculer ce rapport sur chaque cristal de glace pour ensuite obtenir une valeur moyenne.
On montre sur la *figure 6.5* l'évolution de ce facteur avec la profondeur.

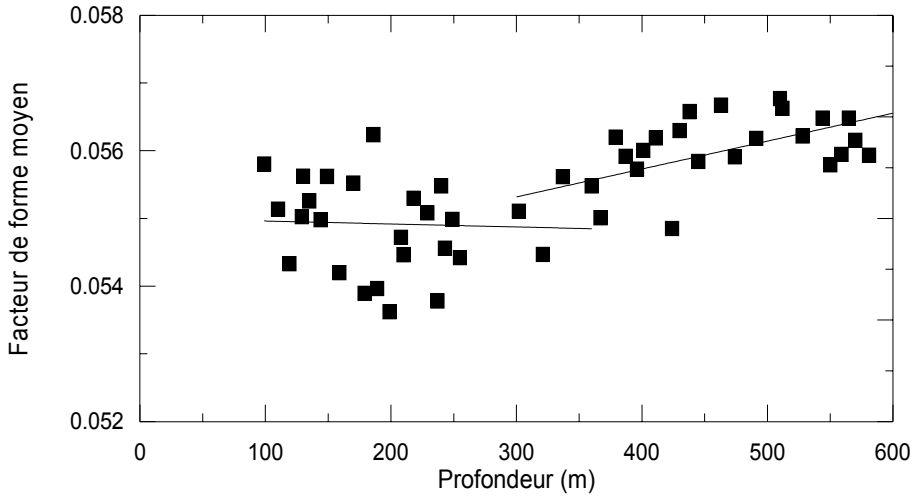


Figure 6.5 : Evolution du facteur de forme moyen en fonction de la profondeur sur le site de Dôme Concordia (EPICA).

Ce facteur de forme est stable jusqu'à 300 mètres et semble augmenter légèrement ensuite avec la profondeur. Notons toutefois que les variations sont trés faibles (*Fig. 5 page 170 cercle-triangle)*.

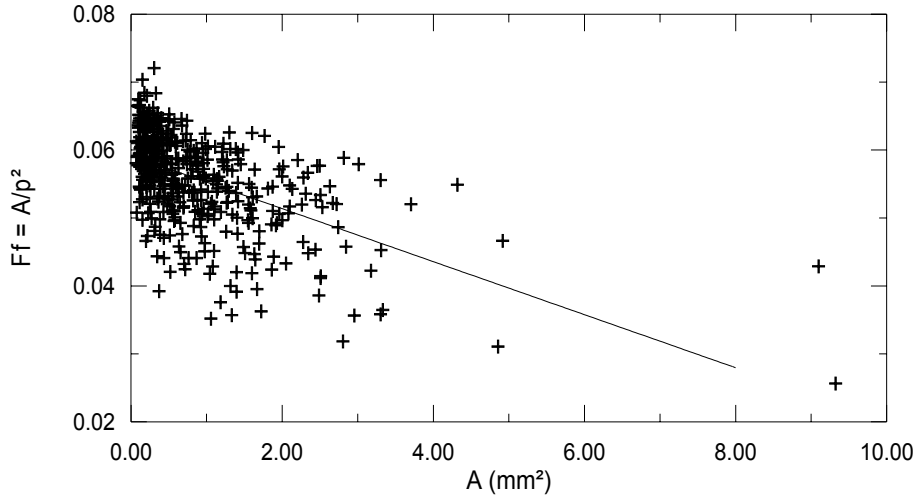


Figure 6.6 : Evolution du facteur de forme en fonction de l'aire des grains sur le site de Dôme Concordia à une profondeur donnée (99 mètres).

On montre sur la *figure 6.6* la variation du facteur de forme en fonction de l'aire des grains à une profondeur donnée. Cette décroissance de Ff par rapport à l'aire des grains A est à priori surprenante. En effet ce paramètre A/p² (en 2D) croit lorsqu'on évolue d'une forme triangulaire (nombre de faces : n=3) vers une forme octogonale (nombre de faces : n=8).

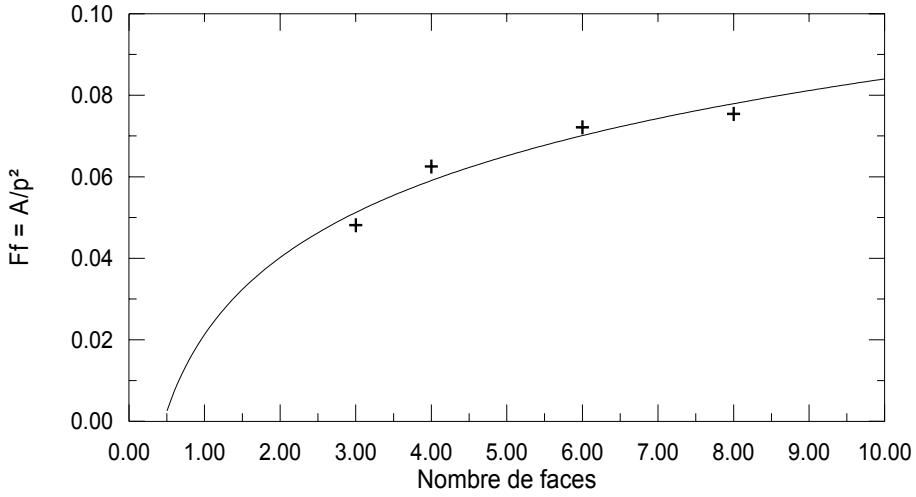


Figure 6.7 : Evolution du facteur de forme : A/p², en fonction de la topologie calculé avec les formules analytiques.
Axe x (nombre de faces) -> triangle : 3, carré : 4, hexagone : 6, octogone : 8.

On montre sur la *figure 6.7* l'évolution en fonction de la topologie du rapport A/p² calculé avec les formules analytiques.

Or dans notre cas, ce paramètre A/p² décroit en fonction de la taille des grains (*Fig. 6.6*) ce qui est contraire à l'attente que l'on peut en avoir. De plus Atkinson (Atkinson 1988) montre qu'il existe une relation entre l'aire du grain et le nombre de faces en 2D de la forme suivante :

$$\overline{A_n} \sim (n - n_0) \qquad (6\text{-}12)$$

ou n_0 est une constante.

Plus l'aire du grain augmente, plus le nombre de face, n, croit, donc le rapport : A/p² devrait augmenter, puisque les gros grains ont plus de faces que les petits grains.

On montre sur la *figure 6.8* que cette décroissance de Ff avec l'aire : A n'est pas liée à une mauvaise résolution qui pourrait surestimer la valeur de A/p².

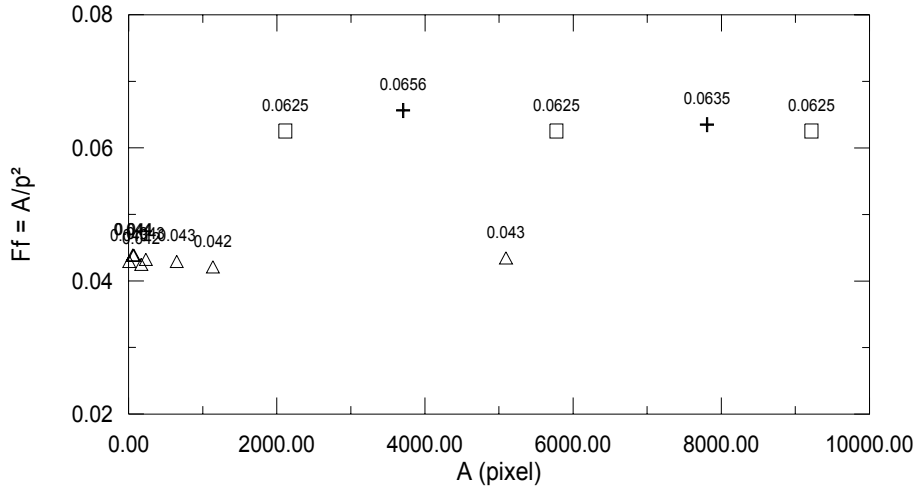


Figure 6.8: Evolution du paramètre s/p² en fonction de la surface en pixel.
⌂ triangle, ❑ carré, ✛ hexagone.

L e désaccord entre nos observation s et la relation prévue par la topologie semble indiquer que le matériau est dans un état ou l'énergie de joint de grain n'a pas encore été minimisée.

Nous avons représenté sur la *figure 6.9* l'évolution de la pente : α (coefficient directeur) du lissage par une fonction en y=αx+β du facteur de forme : A/p² en fonction de l'aire : A, pour chaque profondeur.

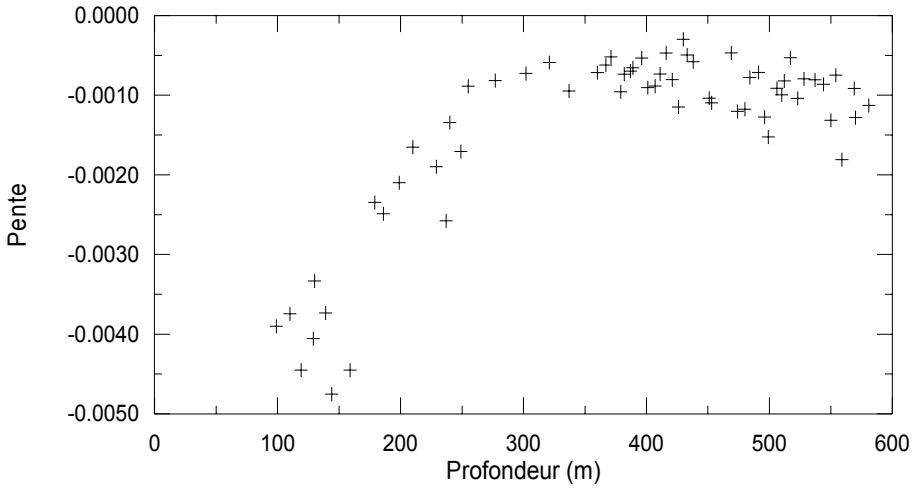


Figure 6.9 : Evolution du coefficient directeur : α en fonction de la profondeur.

On constate que ce facteur croit puis décroit à partir d'une valeur de 300 mètres de profondeur. Cette valeur ne correspond à une transition climatique. Nous ne pouvons pas pour l'instant expliquer à quoi est liée cette variation. Par contre on constate encore une fois tout l'intéret qu'apporte l'analyse par traitement d'images des cristaux de glace.

6 Conclusions :

A partir de trois images en couleur d'une même lame mince de cristaux de glace d'un même champ d'observation, nous avons élaboré une méthode de segmentation basée sur l'utilisation d'un filtre non linéaire, d'un filtre d'ordre et d'un filtre de Sobel permettant d'obtenir une image binaire de la microstructure des cristaux.

Nous avons ensuite traité un ensemble d'images de plusieurs profondeurs provenant du forage Européen EPICA. Ces profondeurs vont de la surface jusqu'à 600 mètres.

Nous avons montré que la loi de grossissement des grains (aire=f(temps)) est une loi linéaire avec la profondeur ou avec l'age jusqu'à 430 mètres. Nous avons comparé plusieurs paramètres (A, A_{50}, L^2) pour évaluer la loi de croissance des grains. Nous avons obtenu dans les trois cas une loi linéaire, mais dont la pente varie d'un facteur deux en fonction du paramètre utilisé. Nous montrons donc l'importance du choix du paramètre utilisé pour définir la taille. Une comparaison des vitesses de croissance entre différents sites nécessitera à l'avenir une définition commune de cette taille moyenne (A).

L'énergie d'activation du grossissement des grains peut être déduite à partir de la loi de croissance des grains en différents sites de différentes températures. Nous montrons que le paramètre le plus approprié pour déterminer cette énergie d'activation est la surface moyenne A de tous les grains présents dans la section 2D.

Plus directement et grâce aux résultats du traitement d'images, et à une analyse systématique des microstructures à plusieurs profondeurs, nous montrons que les distributions de la taille des grains sont des distributions log-normales. Ceci révèle un grossissement normal des grains jusqu'à une profondeur de 430 mètres.

Nous montrons ensuite que la décroissance marquée des cristaux de glace révèle la transition Holocène, dernier maximum glaciaire, et que cette transition n'est pas à la même profondeur à Dôme C qu'à Dôme Concordia.

L'analyse des microstructures par les lignes d'interceptes permet de quantifier l'anisotropie des cristaux, qui s'écrasent sous l'effet du poids de la colonne de glace. Ceci nous a permis d'estimer la vitesse de déformation verticale de la glace.

Conclusions et perspectives :

Nous allons dans cette dernière partie reprendre les conclusions importantes de ce travail et souligner les applications susceptibles d'être développées à l'issue de ce travail.

1. Méthodes de prises d'images :

Nous avons mis au point un dispositif expérimental permettant de prendre des photographies de grains de neige directement sur site. La qualité des photographies et des images après numérisation des négatifs montre que ce dispositif est parfaitement opérationnel. La principale difficulté de cette technique réside dans la séparation des grains de neige. Lors d'un raid ITASE en Antarctique (1998-99), nous avons prélevé et pris des photographies d'échantillons de grains de neige, nous traitons actuellement les données pour comparer la prise directe de photographies et le prélèvement de grains de neige dans l'isooctane.

Nous avons mis au point une nouvelle technique d'épiscopie coaxiale permettant de visualiser dans le névé polaire, les pores et les cristaux de glace. Le champ restreint d'observation nécessite la reconstitution d'une mosaïque d'images. L'obligation jusqu'à maintenant de numériser manuellement les négatifs avec une caméra CCD, nous a amenés à développer un algorithme semi-automatique de reconstitution de l'image. Le récent développement des scanners (à faible coût) permettant la numérisation automatique des négatifs nécessite de développer une reconstitution automatique de l'image basée sur la fonction d'autocorrélation par exemple.

Nous avons mis en évidence les biais liés à la préparation des échantillons pour le névé poreux et pour la glace et les incertitudes de mesure liées au traitement numérique des images. Nous avons montré que le nombre nécessaire de cristaux présents dans une image doit être égal ou supérieur à 400. La limitation matérielle de notre traitement d'images (640 x 480 pixels) nous a contraint à limiter notre champ d'analyse. Les récents codes de traitement d'images (Images Processing System par exemple) écrit en langage "C", utilisé en partie pour cette thèse, et que l'on peut se procurer sur les réseaux ont pour limite de dimension des images la capacité des zones de "swap" , la mémoire vive, et les temps de calcul de l'ordinateur. Les opérateurs et les algorithmes développés dans le premier environnement devront être réécrit pour ces nouveaux codes.

2. Méthodes d'analyse d'images

Neige :

Nous avons développé et mis au point une méthode de segmentation des grains de neige basée sur les filtres dérivatifs du premier ordre. Nous avons ensuite défini et étudié un paramètre représentatif de la taille des grains dans le domaine discret basé sur le contour des grains : le rayon convexe moyen. Les tests de sensibilité de ce paramètre en fonction du nombre de pixels utilisés pour approximer la courbure locale ont montré que l'erreur sur la valeur de la convexité pouvait atteindre 50%. Nous avons proposé et testé une autre approche basée sur le squelette pondéré et la distance de chanfrein. La distance de chanfrein la mieux adaptée au calcul des rayons convexes moyens est la distance $d_{5,7,11}$. Plusieurs tests sur des objets de référence nous ont amené à faire le choix de cette seconde méthode.

Nous avons ensuite étudié plusieurs paramètres représentatifs de la forme des grains et nous avons proposé une traduction nivologique des paramètres sélectionnés.

Une autre partie concerne la comparaison du rayon convexe moyen mesuré et la taille des particules hexagonales du modèle de réflectance qui produirait la même valeur de réflectance au nadir pour le même angle d'incidence. On constate que les mesures et le modèle sont en accord.

Dans une dernière partie, nous établissons des cartes de taille de grains de neige en différents points de l'Antarctique ou des prélèvements ont été effectués durant plusieurs campagnes. Il apparaît qu'en surface, la taille varie peu.

Ces données devront être complétées et pour être utilisées dans le modèle (CROCUS) de métamorphisme de la neige développé au Centre d'Etude de la Neige.

Névé :

Nous avons, grâce au traitement d'images ainsi qu'à de nombreuses et nouvelles données expérimentales sur la taille et la forme des cristaux en fonction de la densité relative du site de prélèvement, participé de façon importante à la description de la structure des grains du névé et de la glace polaire.

Les algorithmes développés pour le filtrage des images et les algorithmes d'extraction des paramètres des images binaires permettent d'obtenir les tailles moyennes des grains, les distributions de taille des grains, le nombre de contacts grain-grain ou grain-pore et d'en déduire des paramètres secondaires comme les surfaces spécifiques. Il sera nécessaire de traduire ces algorithmes en langage "C".

Dans le domaine glaciologique, ces données ont permis d'intégrer une description précise de la structure des grains dans les modélisations des phénomènes physiques ou la taille et la forme des grains interviennent.

En dehors de ces résultats bruts, nous avons montré que la structure des grains dans le névé poreux découle principalement du phénomène de grossissement normal des grains. D'autre part nous avons montré que la cinétique de grossissement des grains dans le névé est caractérisée par une loi de croissance linéaire avec le temps (A linéaire avec le temps). Nous restons prudents par contre sur la détermination de l'énergie d'activation, puisque nous avons montré que la pente de la loi de croissance des grains varie en fonction du paramètre utilisé (taille moyenne, 50 plus gros grains ou 25% des plus gros grains).

Nous avons mis en évidence grâce à l'analyse des pores sur un site Vostok (Bh7) ou le nombre de données est important, le début de la zone de fermeture des pores (close off). Nous avons également déterminé les différents stades de densification par une analyse des cellules de voronoi du centre de gravité des grains, en ne tenant pas compte des pores.

Pratiquement, cette description synthétique de la structure des grains (tailles et formes) dans le névé et la glace polaire, en particulier sous la forme de relations analytiques pour les distributions de la taille et de la forme (nombre de faces) a été utilisée dans la modélisation de la fermeture des pores dans le névé. Ces résultats ont également servi à la modélisation de la densification et la modélisation du transport des gaz à travers le névé polaire.

Il serait intéressant de comparer la taille des grains de neige avec la taille des agglomérats de glace dans le névé pour un même site. Ceci permettrait d'avoir une description continue du milieu neige-névé.

Glace :

A partir de trois images en couleur d'une même lame mince de cristaux de glace d'un même champ d'observation, nous avons élaboré une méthode de segmentation basée sur l'utilisation d'un filtre non linéaire, d'un filtre d'ordre et d'un filtre de Sobel permettant d'obtenir une image binaire de la microstructure des cristaux. Une éventuelle amélioration pourrait être l'utilisation du filtrage adaptatif ou de l'opérateur bidimensionnel de Deriche.

Nous avons montré que la loi de grossissement des grains (aire=f(temps)) est une loi linéaire avec la profondeur ou avec l'age jusqu'à 430 mètres. Nous avons comparé plusieurs paramètres (A, A_{50}, L^2) pour évaluer la loi de croissance des grains. Nous avons obtenu dans les trois cas une loi linéaire, mais dont la pente varie d'un facteur deux en fonction du paramètre utilisé. Nous montrons donc l'importance du choix du paramètre utilisé pour définir la taille. Une comparaison des vitesses de croissance entre différents sites nécessitera à l'avenir une définition commune de cette taille moyenne (A).

L'énergie d'activation du grossissement des grains peut être déduite à partir de la loi de croissance des grains en différents sites de différentes températures. Nous montrons que le paramètre le plus approprié pour déterminer cette énergie d'activation est la surface moyenne "A" de tous les grains présents dans la section 2D. Plus directement et grâce aux résultats du traitement d'images, et à une analyse systématique des microstructures à plusieurs profondeurs, nous montrons que les distributions de la taille des grains sont des distributions log-normales. Ceci révèle un grossissement normal des grains jusqu'à une profondeur de 430 mètres.

Nous montrons ensuite que la décroissance marquée des cristaux de glace révèle la transition Holocène, dernier maximum glaciaire, et que cette transition n'est pas à la même profondeur à Dôme C qu'à Dôme Concordia.

L'analyse des microstructures par les lignes d'interceptes permet de quantifier l'anisotropie des cristaux, qui s'écrasent sous l'effet du poids de la colonne de glace. Ceci nous a permis d'estimer la vitesse de déformation verticale de la glace.

Dans le futur l'effet sur la microstructure de la glace, prélevée sur différents sites de forage, des paramètres physiques comme la température, le contenu en impuretés ou la déformation pourront être étudiés grâce à l'analyse d'images présentée dans ce travail.

Annexe A

Microwave Remote Sensing of Snow from a Cable Car at Chamonix in the French Alps

L'immense étendue et l'accès difficile de l'Antarctique font que la télédétection constitue un outil approprié pour son observation. Un des objectifs des études faites au Laboratoire en télédétection est de comprendre les interactions neige/rayonnement électromagnétique afin de pouvoir mesurer de l'espace les paramètres géophysiques tel que la surface des zones de fonte, le taux d'accumulation, la température.

L'étude des cartes de données satellitaires sur l'Antarctique a mis en évidence des zones de comportement radiométrique différent et par conséquent de caractéristiques de "surface" différentes (Zwally and Gloersen, 1977). Les mesures satellitaires micro-ondes sont intéressantes car elles sont indépendantes des conditions d'éclairement, et elles sont quasiment indépendantes des conditions nuageuses. Elles permettent d'avoir une couverture spatiale quasi globale du continent Antarctique ainsi qu'un suivi régulier dans le temps.

Dans le cas de la neige sèche, le signal mesuré provient d'une épaisseur de neige de quelques centimètres à plusieurs mètres, il dépend de l'ensemble des caractéristiques du manteau neigeux. La mesure micro-onde est donc susceptible de fournir des informations sur ce manteau neigeux, telles que sa température, sa densité, sa stratification, la taille et la forme des grains de neige.

Pour valider les modèles d'émissivité micro-ondes il est important d'effectuer des mesures radiométriques et de collecter des données de terrain simultanément. Une expérience (PORTOS) a eu lieu dans les Alpes ou des mesures radiométriques ont été effectuées et des échantillons des grains de neige et de structure de la neige ont été prélevés.

La structure de la neige est décrite par la longueur de corrélation qui est un paramètre d'entrée des modèles d'émissivité. Nous déterminons les longueurs de corrélation dans les directions verticale et horizontale à partir des images de structure de la neige que nous avons numérisées puis binarisées.

Nous calculons les fonctions d'autocorrélations à l'aide des formules définies au *chapitre III* (p.40) sur chaque image de structure de la neige. Nous ajustons une fonction exponentielle sur les quatre premiers points de la fonction d'autocorrélation (*Fig.a.1)*. La longueur de corrélation est égale à l'inverse du coefficient négatif de l'exponentielle.

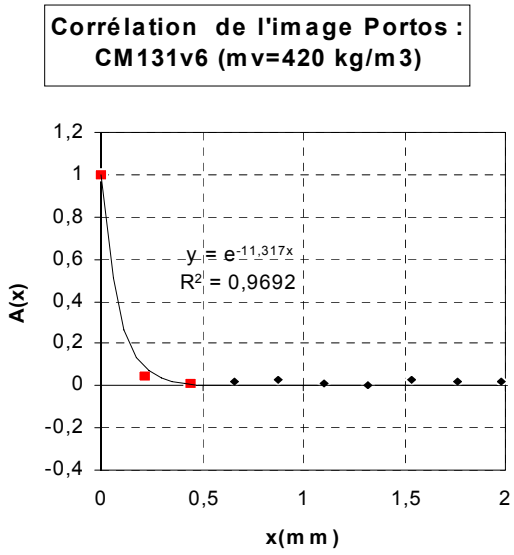


Figure a.1 : Fonction d'autocorrélation calculée à partir des images de la structure de la neige.

Nous présentons

dans l'article suivant les longueurs de corrélations calculées à différentes profondeurs à partir des images de structure de la neige. Nous montrons que la structure de la neige est fortement anisotrope prés de la surface, en effet la longueur de corrélation verticale est plus faible que la longueur de corrélation horizontale. Cette anisotropie de structure devra etre prise en compte lorsqu'on modélise l'émissivité du manteau neigeux.

Annexe B

Imaging of firn and bubbly ice in coaxial reflected light: a new technique for the characterization of these porous media.

Nous présentons dans cet article une nouvelle technique d'observation des surfaces en lumière réfléchie coaxiale des échantillons de névé poreux sublimés. Cette technique permet de voir simultanément le réseau poreux dans le névé, les bulles dans la glace et les frontières des cristaux de glace. Un inconvénient de cette technique est le champ réduit d'analyse.

Grâce au traitement d'images on reconstitue une mosaïque de plusieurs images à une même profondeur pour avoir un champ d'analyse suffisamment grand. Nous avons ensuite élaboré des filtres permettant de passer des images en niveaux de gris à des images binaires.

Le traitement de ces images à plusieurs profondeurs dans le névé poreux et dans la glace permet d'obtenir des paramètres 2D sur les pores et sur les cristaux de glace. Ces paramètres sont fondamentaux pour les modèles de densification, de fermeture des pores et de diffusion des gaz dans le névé poreux.

Annexe C

Annexe D :

Traitement de la 1° image couleur

FAIRE pour les trois images en niveau de gris d'une image couleur
Ouvrir l'image
Ouverture et fermeture en niveaux de gris
Filtre médian
Sobel, seuillage et mémorisation seuil_UN, puis seuil_DEUX, puis seuil_TROIS
Amincissement des joints de grains par squeletisation
FIN
Sommation des trois images binaires et sauvegarde de l'image temporaire_UN

Traitement de la 2° image couleur

FAIRE pour les trois images en niveau de gris d'une image couleur
Ouvrir l'image
Ouverture et fermeture en niveaux de gris
Filtre médian, Sobel
Seuillage avec seuil_UN, puis seuil_DEUX, puis seuil_TROIS
Amincissement des joints de grains par squeletisation
FIN
Sommation des trois images binaires et sauvegarde de l'image temporaire_DEUX

Traitement de la 3° image couleur

FAIRE pour les trois images en niveau de gris d'une image couleur
Ouvrir l'image
Ouverture et fermeture en niveaux de gris
Filtre médian, Sobel
Seuillage avec seuil_UN, puis seuil_DEUX, puis seuil_TROIS
Amincissement des joints de grains par squeletisation
FIN
Sommation des trois images binaires et sauvegarde de l'image temporaire_TROIS

Ouverture des images temporaire_UN, temporaire_DEUX, temporaire_TROIS
Addition
Fermeture binaire pour connecter les joints distants
Amincissement par squelettisation
Elagage

Reprise manuelle de l'utilisateur pour contrôle et modification éventuelle.

Algorithme 6.1 : Détermination des joints de grains d'une micro-structure de glace à partir de trois