

Images tridimensionnelles de neige : des prélèvements in situ aux fichiers de données volumiques.

Application à une expérience de métamorphose d'isothermie

Bernard LESAFFRE¹, Jean-Bruno BRZOSKA¹, Cécile COLEOU¹, Frédéric FLIN¹, Romeu
PIERITZ²

¹Météo-France, Centre d'Etudes de la Neige, 1441 rue de la piscine, 38406 Saint-Martin-d'Hères, France

²Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, 54 Rue Molières, 38402 Saint-Martin-d'Hères,
France

SOMMAIRE

RESUME	2
INTRODUCTION	3
1. PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE	4
1.1.Préparation de l'échantillon	4
1.1.a. Choix du produit d'imprégnation	4
1.1.b. Consolidation	5
1.1.c. Usinage	6
1.2. Tomographie	6
1.2.a. Dispositif expérimental à l'ESRF	7
1.2.b. Reconstruction	8
1.3.Méthode de détournage	8
1.3.a. Caractéristiques des images	
1.3.b. Traitement des bulles d'air	10
1.3.c. Seuillage	12
1.3.d. Vérifications et corrections manuelles	13
2. APPLICATION A UNE EXPERIENCE DE METAMORPHOSE	14
2.1. Conditions de prélèvements	15
2.2. Les images de neige	15
2.3. Quelques caractéristiques de la métamorphose d'isothermie	17
CONCLUSION ET REMERCIEMENTS	19
REFERENCES	20

RESUME.

L'analyse de la microstructure de matériaux s'est récemment développée grâce à l'accès à des images tridimensionnelles générées par des techniques telles que la tomographie et la RMN.

L'étroite relation entre les propriétés de la neige et sa microstructure fait de la production d'images 3D un très important domaine d'étude.

Nous avons développé une méthode fournissant des images de neige utilisables pour des mesures tridimensionnelles et également en tant que données d'entrée pour des modèles de structures. Les différentes étapes de cette procédure expérimentale sont la préparation de l'échantillon, l'acquisition des images et leur pré-traitement.

La phase de préparation nécessite une consolidation préalable de l'échantillon de neige. Après de nombreux essais, nous avons choisi le 1-chloronaphtalène pour imprégner les échantillons.

La seconde étape est réalisée à l'E.R.S.F. (European Synchrotron Radiation Facilities), ligne ID19 : des vues sont enregistrées par microtomographie par rayons X en absorption (résolution de $5\mu\text{m}$), puis reconstruites; elles aboutissent à un ensemble de 2048 images 2D, de chacune une taille de 2048×2048 pixels.

La dernière étape, principal sujet de ce travail, consiste à convertir ces images en niveaux de gris en images binaires dans lesquelles la glace est distinguée des pores.

Cette méthode a été appliquée dans une expérience de métamorphose en isothermie. Elle montre une bonne qualité des images produites. Ce type de données, d'un accès assez récent, devrait faire progresser l'analyse de la microstructure de la neige.

INTRODUCTION

De récentes techniques fournissant des images 3D ont ouvert des nouvelles perspectives pour l'analyse des microstructures de divers matériaux.

Dans le domaine de la neige, différentes techniques ont été mises en œuvre pour l'obtention d'images volumiques à différentes résolutions : d'abord des coupes sériées (Good, 1987, Schneebeli, 2000), plus récemment la microtomographie utilisant un rayonnement synchrotron (Coléou et al., 2001) et la RMN (Ozeki, 2002).

Quelle que soit la méthode utilisée, la phase de préparation est primordiale, car elle conditionne la qualité des images obtenues et leur futur traitement. La plupart des algorithmes fournissant des mesures tridimensionnelles à partir d'images peuvent être partagés entre les différents domaines traitant de la structure des matériaux.

Cependant, la première étape, de la préparation des échantillons à l'obtention des images 3D reste spécifique au matériau étudié. Une autre spécificité est le choix de la résolution et de la taille de l'échantillon, qui doivent être fixés en fonction de la taille des données et de leur pertinence pour le paramètre physique étudié.

L'objectif des images de neige présentées dans ce papier est une description de l'évolution de la structure de la neige soumise à des conditions d'isothermie. Cette métamorphose est principalement gouvernée par la courbure locale des surfaces de glace (Colbeck, 1980), c'est pourquoi une haute résolution de la surface des grains est nécessaire. Des mesures quantitatives ont déjà été effectuées dans divers travaux, utilisant des coupes minces ou les silhouettes des grains (Brown et al., 1994, Colbeck, 1998, Lesaffre et al., 1998). Les résultats furent intégrés avec succès dans des modèles d'évolution des couches de neige (Jordan, 1991, Brun et al., 1992, Bartelt and Lehning, 2001).

Les mécanismes mis en jeu dans l'évolution de la neige semblent bien connus mais sont encore l'objet de discussions. Des travaux récents d'Adams et alii (2001) tendent à donner un rôle plus important que précédemment à la diffusion aux joints de grains dans la croissance des ponts de glace entre les grains. La haute résolution des images produites par microtomographie aux rayons X permet de se focaliser sur les grains et les joints inter-grains. Elle permet de progresser dans l'étude des métamorphoses de la neige à cette échelle.

Dans la première partie, nous présentons la méthode développée pour obtenir les images 3D de neige. Chaque étape, depuis le prélèvement des échantillons jusqu'à l'obtention des données volumiques, est détaillée. La seconde partie décrit les résultats obtenus par cette méthode au cours d'une expérience de métamorphose de neige en conditions d'isothermie.

1. PROCEDURE EXPERIMENTALE

Chaque étape de la procédure expérimentale est décrite dans les paragraphes suivants. Nous nous concentrons sur l'analyse d'image dont le but est d'obtenir des images binaires, à partir des images en niveaux de gris fournies par la tomographie.

1.1. Préparation de l'échantillon

La production d'images de neige par tomographie d'absorption X nécessite une différence significative entre les coefficients d'atténuation de la glace et celle des pores, dans une gamme d'énergie allant de 6 à 40 keV. Les échantillons doivent avoir une dimension inférieure à 10mm.

La glace et l'air offrent un bon contraste mais la neige étant un matériau trop fragile, elle nécessite au préalable une consolidation avant son usinage produisant un cylindre d'une hauteur et d'un diamètre d'environ 9mm.

Lorsque la neige est suffisamment dense, le produit d'imprégnation peut être supprimé par rinçage avant l'acquisition d'images. L'expérience présente, avec de la neige récente de faible densité, requiert le choix d'un produit pertinent.

1.1.a. Choix du produit d'imprégnation

Les premières expériences utilisaient le diethyl-orthophtalate (phtalate en abrégé), déjà employé pour les coupes minces. Il remplissait les conditions quant à son point de fusion (-5°C), sa densité (pour éviter que la neige ne flotte trop), sa non-miscibilité avec la glace, sa

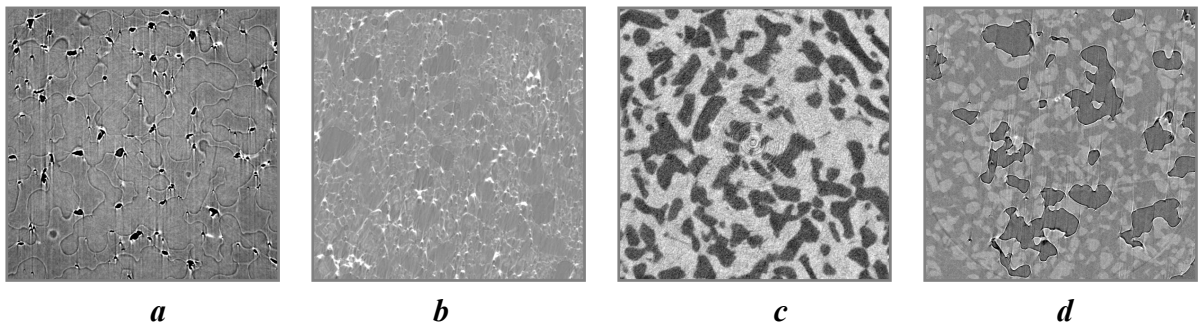


Fig. 1. Extraits (500² pixels) de plans reconstruits en niveaux de gris pour différents produits d'imprégnation. 1a : phtalate 1b : phtalate additionné de dibromoéthane 1c : dibromobenzène 1d : cycloheptane.

dureté (pour un usinage aisé). Malheureusement, son coefficient d'atténuation est trop proche de celui de la glace (fig. 1a), ce qui obligeait à rincer l'échantillon, opération impossible avec de la neige plus fragile.

Nous avons tout d'abord essayé d'augmenter son coefficient d'absorption par l'addition d'un autre corps chimique, dont la formule comportait un élément de haut numéro atomique.

Une partie des essais avec le 1,2-dibromoéthane furent fructueux, mais nombre d'entre eux échouèrent à cause de la séparation des phases dans le mélange ; ainsi, la plupart des images étaient intraitables (fig. 1b). Divers corps purs furent testés : trans-1,2-dibromocyclohexane et

dibromobenzène (fig. 1c) étaient beaucoup plus absorbants que la glace. L'énergie nécessaire était plus élevée (50 keV) et en conséquence, la glace et les bulles d'air résiduelles, lorsqu'elles existaient, n'étaient plus différenciables. Ces résultats ont conduit à ne plus utiliser de molécules contenant du brome.

Un autre test fut mené, employant le cycloheptane (fig. 1d), dont la densité et le coefficient d'atténuation sont inférieurs à ceux de la glace. Les images, offrant un faible contraste, furent difficiles à traiter. De plus, la consistance assez pâteuse de ce produit autour de -20°C à -25°C rendait l'usinage délicat.

Dans cette présentation, nous avons utilisé le 1-chloronaphtalène ($\text{C}_{10}\text{H}_7\text{Cl}$, densité 1.194, point de fusion -20°C lorsqu'il est pur).

Malgré la présence de chlore dans ce produit, il ne dissout pas la glace. Les radiographies ont été réalisées avec des énergies de 18 et 20 keV. Dans cette fourchette, le coefficient d'absorption du chloronaphtalène est d'environ trois fois celui de la glace. A des énergies plus basses, la distinction entre l'air et la glace est meilleure mais le rapport signal/bruit se dégrade.

Il fallait trouver un compromis entre une bonne distinction des phases et une intensité transmise suffisante au travers de l'échantillon.

1.1.b. Consolidation

Une carotte de neige d'un diamètre et d'une hauteur de 4 cm est prélevée dans une couche de neige et placée dans un flacon. Elle est ensuite immergée lentement en faisant couler, à -8°C , le chloronaphtalène le long de la paroi du flacon.



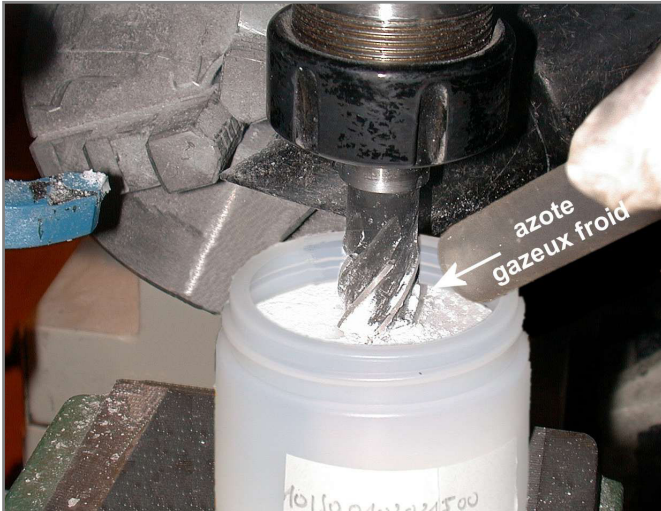
Afin d'éliminer l'air résiduel, le flacon est placé sous vide ($\sim 5\text{hPa}$) pendant 5 minutes. L'échantillon est finalement congelé à -20°C .

Le séjour sous vide s'est avéré peu efficace pour éliminer l'air résiduel. Un grand nombre de bulles d'air restaient piégées, nécessitant un traitement spécifique des images.



1.1.c. Usinage

L'échantillon imprégné et gelé est suffisamment solide pour être usiné, quoiqu'un peu friable. Quelques cylindres usinés ont présenté des fractures, compliquant les traitements. Cette délicate phase d'usinage s'est déroulée en chambre froide, à une température inférieure à -20°C .



Un cylindre d'un diamètre de 9 mm est prélevé à l'aide d'une fraise, puis coupé à une longueur de 9 mm.

L'échantillon est ensuite soudé, à l'aide d'une goutte de chloronaphtalène, au sommet d'un porte-échantillon de cuivre, puis couvert d'un capuchon de Plexiglas,



évitant toute sublimation de la glace. Chaque échantillon est stocké à -40°C , en attendant la tomographie.

1.2. Tomographie

Les images 3D de neige ont été obtenues en utilisant la tomographie d'absorption X, technique bien établie, mise en œuvre sur la ligne ID19 (Baruchel et al., 2000) de l'ESRF (European Synchrotron Radiation Facilities), Grenoble, France.



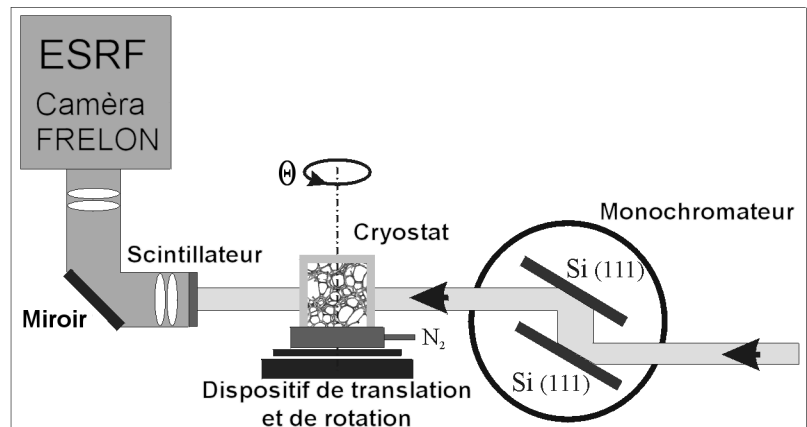
Le Synchrotron de Grenoble. (Photo ESRF)

L'imagerie par tomographie d'absorption X consiste à réaliser sous tous les angles un grand nombre de radiographies de l'objet à analyser, puis à reconstituer numériquement l'image volumique 3D de ce dernier.

Cette image est en fait la carte en niveaux de gris des absorptions X (variable selon l'énergie du rayonnement et le matériau, quasi-nulle dans l'air), qu'il faut ensuite pouvoir détourner correctement pour obtenir des données 3D.

L'emploi du rayonnement synchrotron, tel que celui produit à l'ESRF, bien plus intense et parallèle que celui des autres sources (comme les tomographes de laboratoire), permet d'obtenir une résolution bien supérieure (quelques microns) en moins d'une heure.

Schéma de principe de la tomographie d'absorption X.



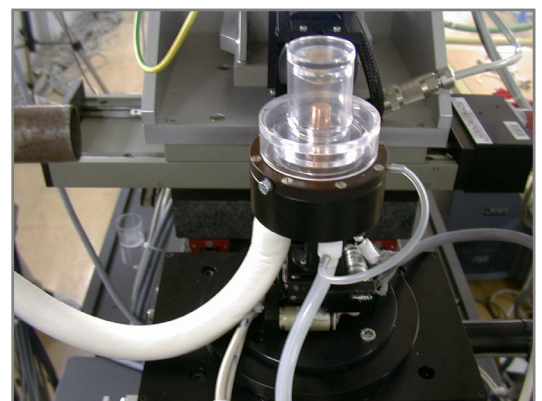
1.2.a. Dispositif expérimental à l'ESRF

Un montage spécifique (cryostat maintenu à -50°C) a été mis en œuvre pour prévenir à la fois la fonte et les métamorphoses pendant les acquisitions (Brzoska et al., 1999).

1500 images 2D (radiographies ou projections) ont été enregistrées à différentes positions angulaires de l'échantillon, balayant 180°. Ces images ont été captées par une camera CCD FRELON (Labiche et al., 1996). Leur taille est de 2048 x 2048 pixels de 4,91 µm de côté.

En plus de l'absorption, le passage des rayons X à travers un échantillon provoque un déplacement de phase du faisceau (Cloetens et al., 2001). Quand le capteur est très proche de l'échantillon (quelques mm), les images ne reflètent que l'absorption.

Les dimensions du cryostat conduisent à placer le capteur à environ 10 cm de l'échantillon, si bien que des lignes de contraste apparaissent entre les différentes phases, essentiellement l'air et la glace.

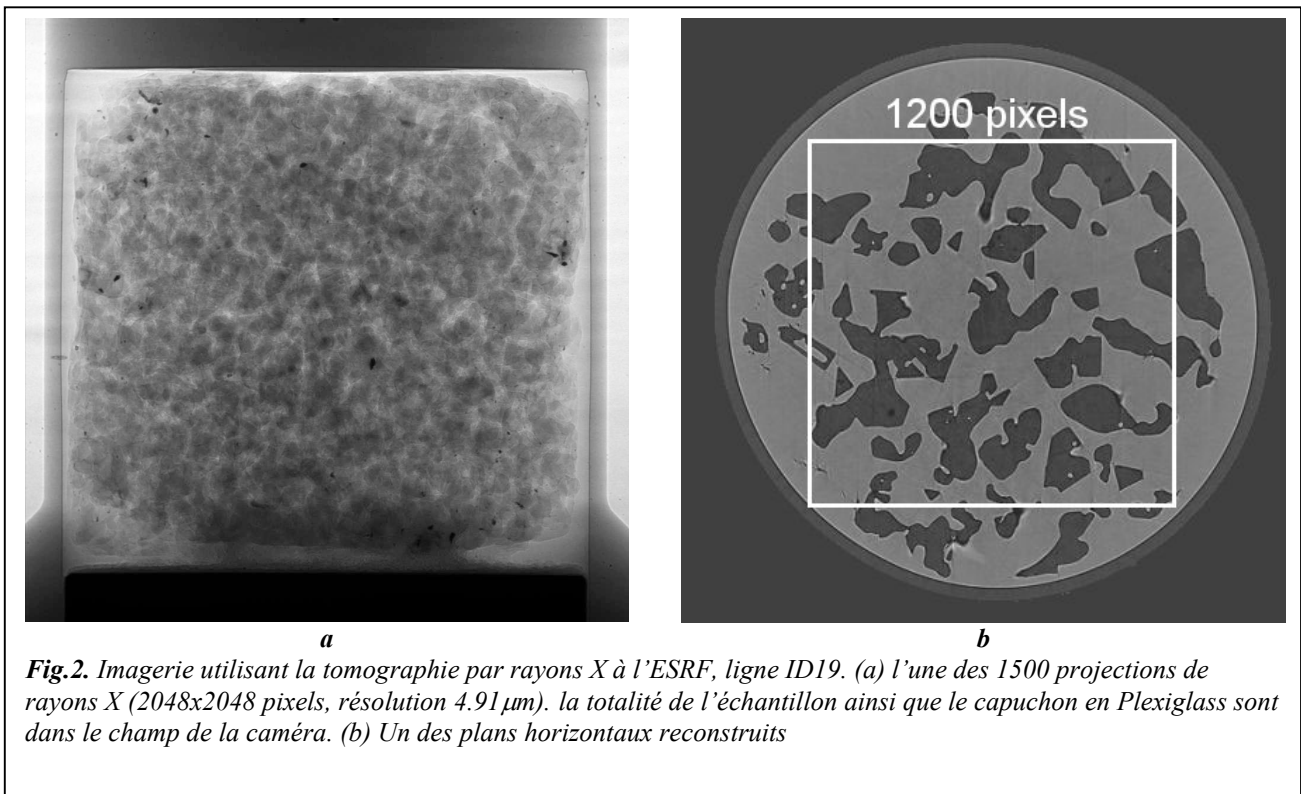


1.2.b. Reconstruction

Les reconstructions sont réalisées à l'ESRF grâce à un logiciel de rétro-projection filtrée standard. Les caractéristiques du rayonnement synchrotron (faisceau monochromatique parallèle, de forte intensité) permettent d'obtenir des images reconstruites de très bonne qualité, même si persistent quelques artefacts.

Des images cubiques de 2048^3 voxels peuvent être reconstruites à partir des projections ; elles représentent de très grosses quantités de données.

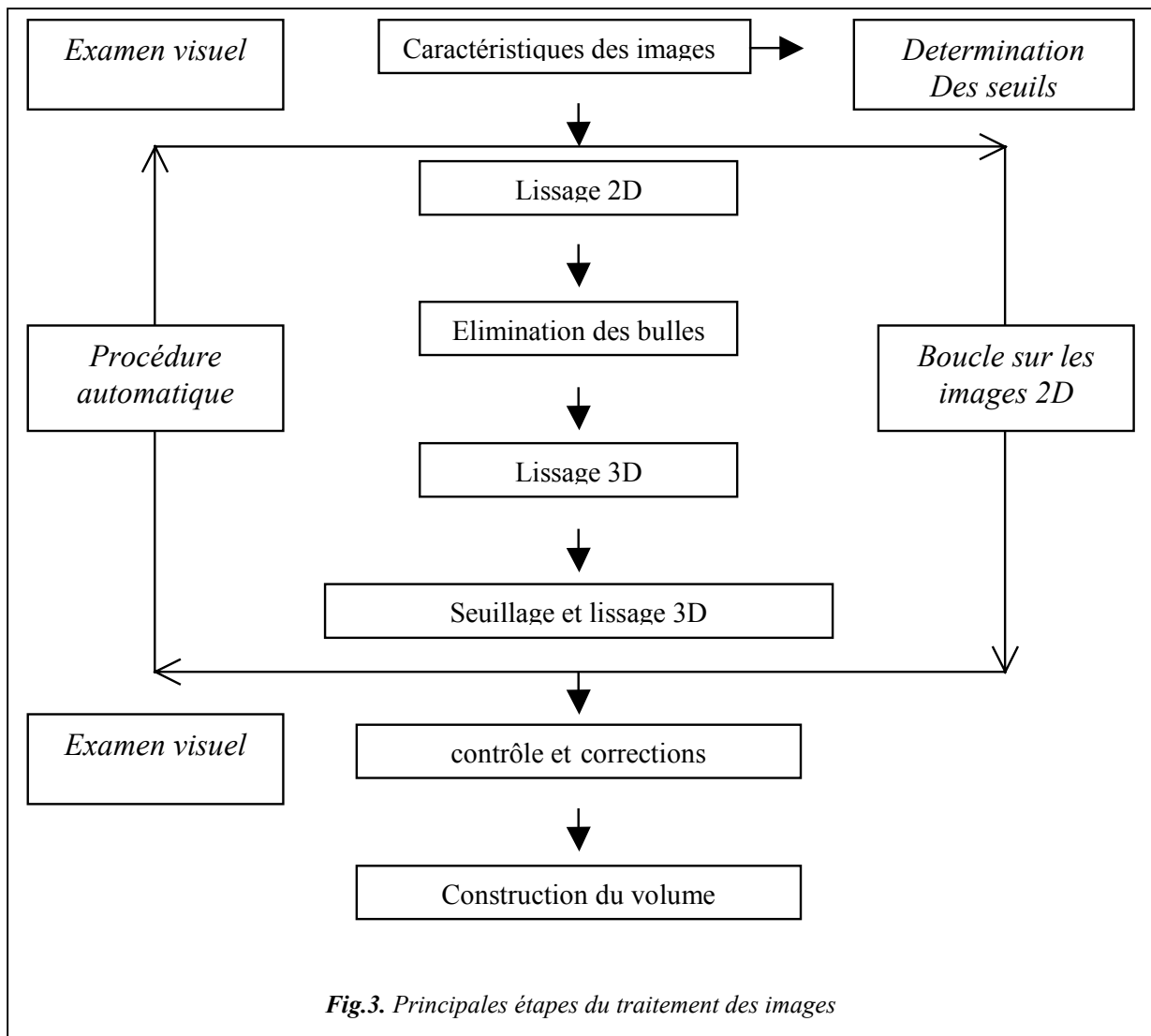
On s'est limité à des volumes de 1200^3 voxels, inclus dans le cylindre de neige (fig. 2b). Par ailleurs, le format des données, initialement en réels (16 bits), a été converti en entiers non signés (8bits) de valeurs comprises entre 0 et 255. Ceci représente tout de même 1.7 Go pour chaque échantillon !



1.3. Méthode de détourage

Le but de cette méthode est de transformer le jeu d'images 2D en niveau de gris, en une image binaire 3D dans laquelle la glace (valeur 1) est distinguée des pores (valeur 0).

Les principales étapes du traitement des images sont décrites dans la figure 3, puis détaillées dans les paragraphes suivants.

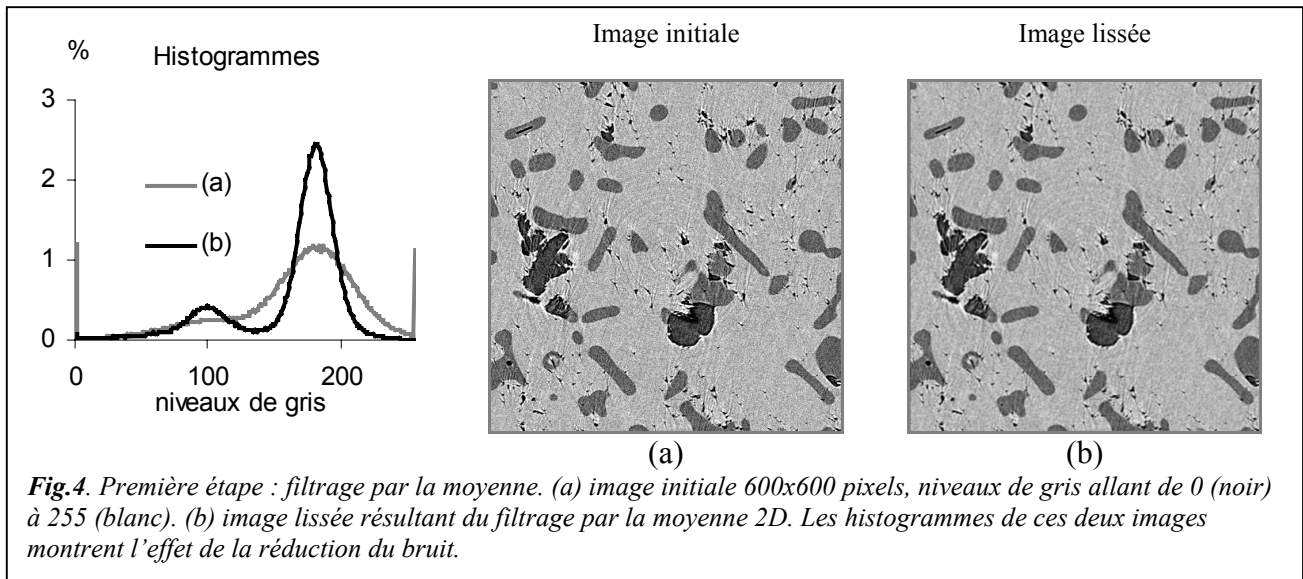


1.3.a. Caractéristiques des images

Les images comportent trois phases (glace, chloronaphtalène et air) et parfois des artefacts de reconstruction. Les plages de niveaux de gris des différentes phases se répartissent de la façon suivante :

Air :	de 0 à 110	moyenne	60
Glace :	de 60 à 160	moyenne	100
Chloronaphtalène :	de 80 à 250	moyenne	180

Un simple seuillage n'est pas opérant, pour des plages de niveaux de gris comportant une large zone commune, surtout pour la glace et l'air. C'est pourquoi une procédure spécifique a été développée. La première opération consiste en une réduction du bruit par un filtre moyenne (3 x 3) (fig.4).

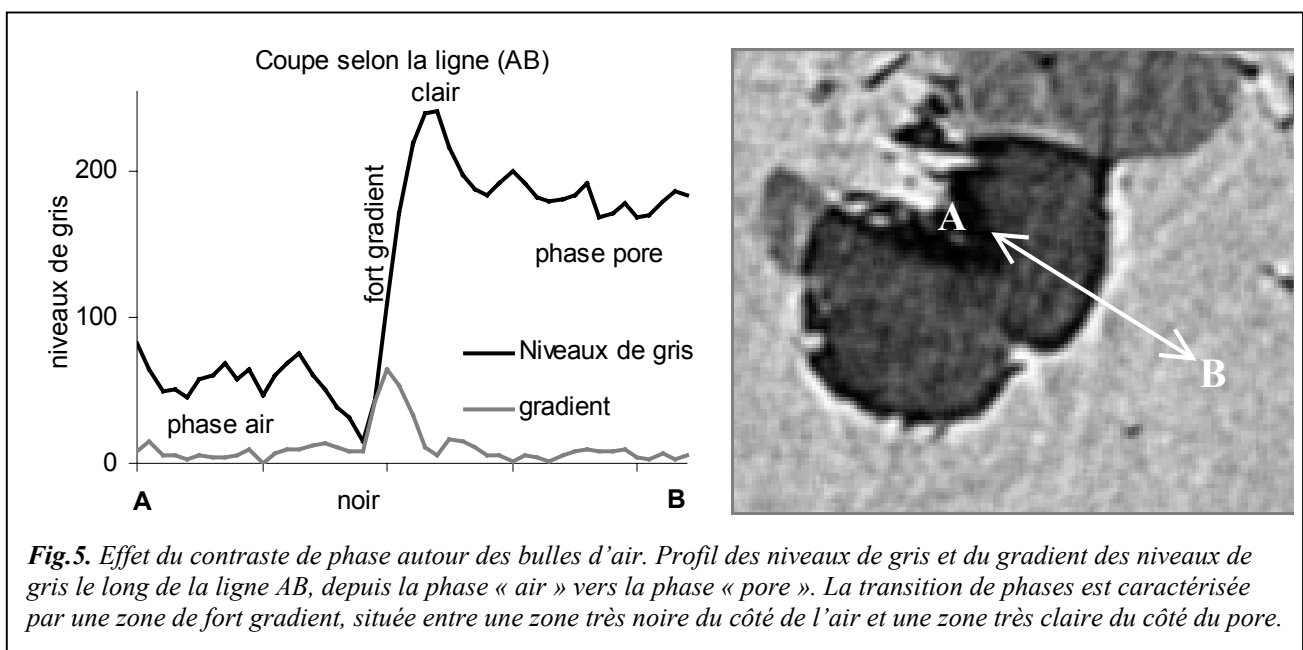


1.3.b. Traitement des bulles d'air

Avant la procédure de seuillage proprement dite, les zones de bulles d'air sont détectées sur chaque plan et le niveau de gris moyen des pores (chloronaphtalène) leur est affecté.

Les conséquences du déplacement de phase des rayons X à travers l'échantillon sont utilisées pour marquer ces zones d'air.

Le détail des lignes de contraste entre l'air et le chloronaphtalène met en évidence successivement une zone très sombre, une zone de fort gradient puis une zone très claire (fig.5).



Les seuils « noir », « blanc », « fort gradient », ainsi que la valeur moyenne dans le chloronaphtalène ont été déterminés par l'examen des histogrammes, sur une image lissée et sur celle des amplitudes de gradients, en utilisant le masque de Prewitt (fig. 6b).

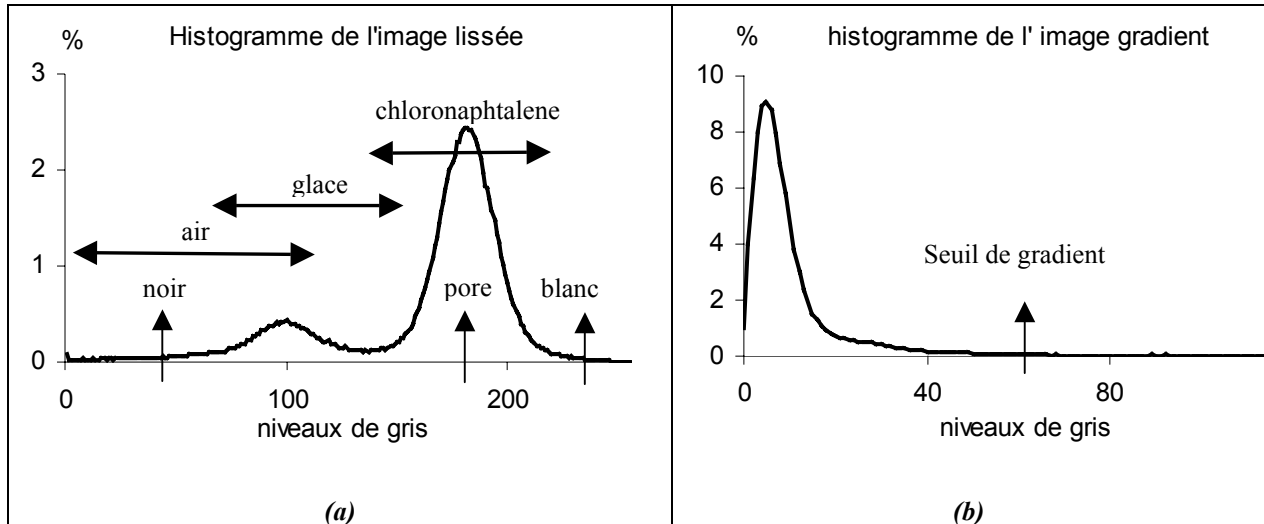


Fig.6. (a) Histogramme des niveaux de gris de l'image 2D lissée et plages de valeurs des différentes phases. Les seuils noir et blanc ainsi que le niveau de gris moyen des pores (chloronaphtalène) sont déterminés visuellement à partir de cet histogramme. (b) Le seuil de fort gradient est tiré de l'histogramme de l'image des amplitudes de gradient.

Une procédure automatique crée les trois images binaires résultant du seuillage par les trois seuils décrits ci-dessus. L'union logique de ces trois images marque les bulles d'air (fig. 7a). Ensuite, une fermeture de taille 2 ou 3 en accord avec le stade de métamorphose de la neige (taille des grains) suivie d'un remplissage des trous ont permis de compléter, dans la majorité des cas, la surface de ces zones d'air (fig. 7b.)

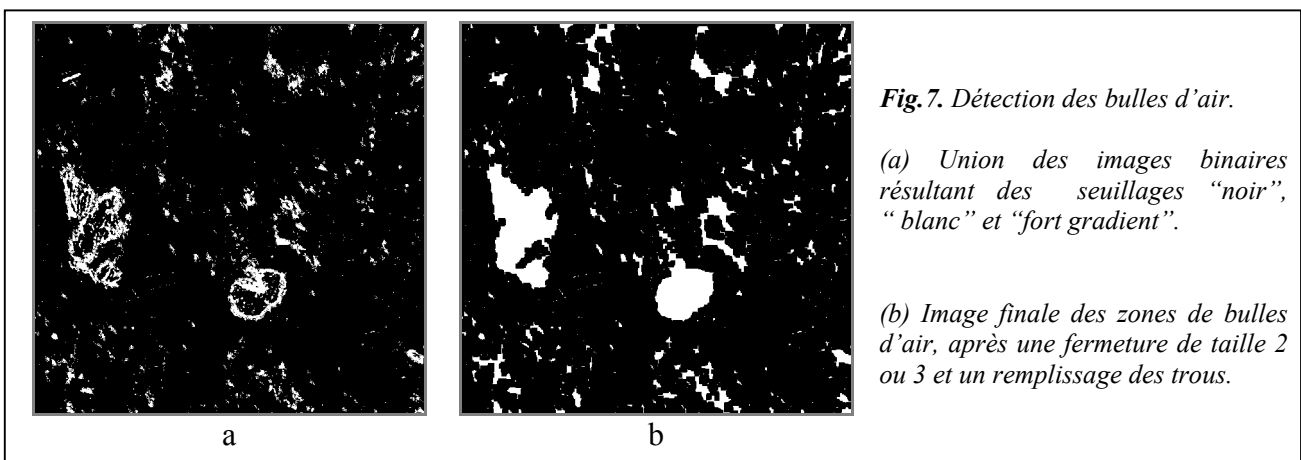


Fig.7. Détection des bulles d'air.

(a) Union des images binaires résultant des seuillages "noir", "blanc" et "fort gradient".

(b) Image finale des zones de bulles d'air, après une fermeture de taille 2 ou 3 et un remplissage des trous.

1.3.c. Seuillage

Le masque binaire précédemment obtenu, affecté de la valeur moyenne du niveau de gris du chloronaphtalène, est ensuite inséré dans l'image initiale (fig. 8a). Les « mouchetures » de bruit sont éliminées en appliquant un filtre morphologique médian (fig. 8b).

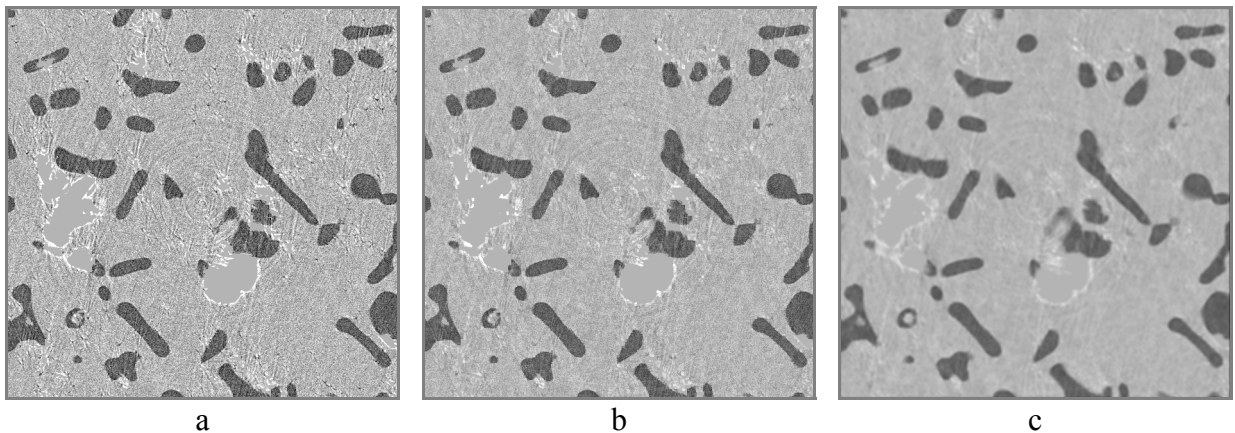


Fig 8 (a) Affectation de la valeur moyenne du niveau de gris du chloronaphtalène aux zones d'air détectées.
(b) Résultat du filtre médian.
(c) image lissée par une moyenne 3D (5x5x5), utilisant les homologues de (b) sur les plans voisins.

Ce filtre, basé sur une combinaison d'ouvertures et de fermetures, opère de la façon suivante sur chaque plan : $g = \max[\min(f, \text{COC}(f)), \text{OCO}(f)]$

où f et g désignent respectivement l'image initiale et l'image filtrée, C et O les opérateurs de fermeture et d'ouverture de taille 1.

Un filtrage par moyenne 3D (5x5x5) est ensuite appliqué (fig. 8c). L'image est maintenant prête pour un seuillage automatique par la méthode de factorisation.

Cet algorithme trouve la valeur de seuil minimisant la somme des variances de niveaux de gris dans les deux régions délimitées par ce seuil (Coster M. et Chermant J.L., 1989). Une moyenne 3D (3x3x3) est enfin appliquée sur les images binaires.

Le résultat est montré sur un plan dans la figure 9.

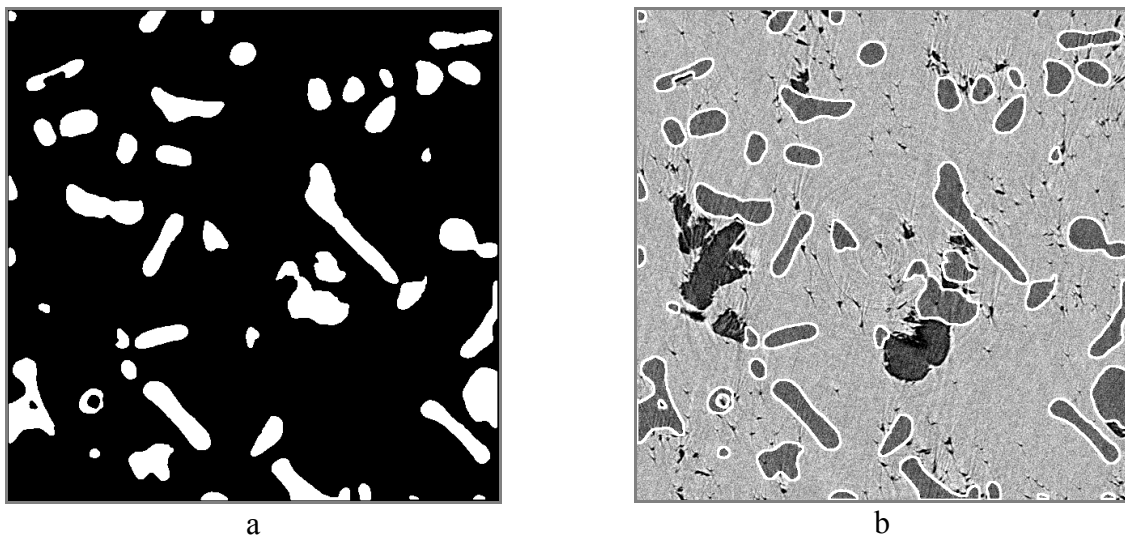


Fig 9 Détermination des contours des grains.
(a) Image binaire résultant du seuillage automatique suivi d'un lissage 3D (3x3x3).
(b) Les contours des grains sont superposés à l'image initiale brute..

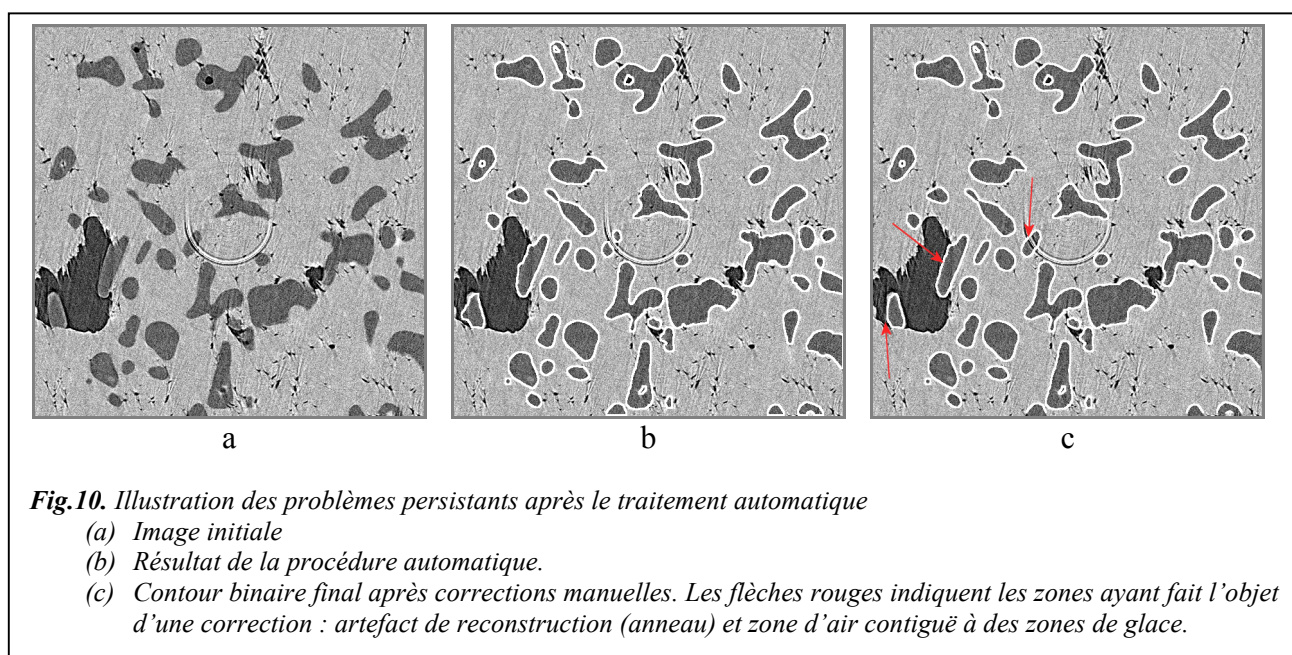
1.3.d. Vérifications et corrections manuelles

La similarité de l'image binaire superposée avec l'image initiale en niveaux de gris est visuellement contrôlée pour chaque plan. Cet examen a montré que la qualité des images résultats était correcte pour environ 80 à 85% des plans. Les problèmes encore présents sont de deux natures :

Artefacts de reconstruction (anneaux) : une partie de l'information est perdue lorsqu'un de ces anneaux traverse une zone de glace.

Zones d'air contiguës avec de la glace : une part de la zone d'air est confondue avec la glace par le fait de l'absence de très fort gradient entre ces deux phases.

Dans ces deux cas de figure, on a procédé à des corrections manuelles. La figure 10 montre un plan où sont présents les deux types de problèmes (fig. 10a), le résultat du traitement automatique (fig.10b) et l'image corrigée, avec les corrections marquées par des flèches rouges (fig. 10c)

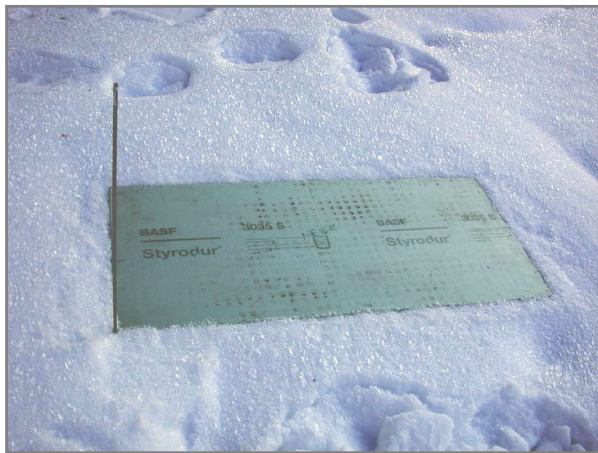


2. APPLICATION A UNE EXPERIENCE DE METAMORPHOSE

A température négative, la neige se transforme continuellement par des mécanismes de sublimation/condensation. La transformation de la morphologie des grains en condition d'isothermie a été étudiée depuis longtemps. La tomographie permet d'observer le changement de structure de la neige, arrondissement et grossissement des grains, mais également l'évolution des ponts et de l'arrangement des grains entre eux.

La méthode décrite dans la deuxième partie a été appliquée à des échantillons de neige prélevés à différents stades de cette métamorphose. Nous avons étudié la métamorphose d'une couche de neige déposée naturellement au cours d'une chute, non tamisée et installée en chambre froide, dans un caisson de manière à contrôler aisément les conditions de température.

La neige fût collectée après une chute de neige au Col de Porte, à 1325 mètres d'altitude, dans le massif de la Chartreuse (Alpes Françaises). Une plaque de polystyrène (120x60 cm²) fût insérée le 15 janvier 2002 et mise à niveau avec le manteau neigeux. Une chute de neige se



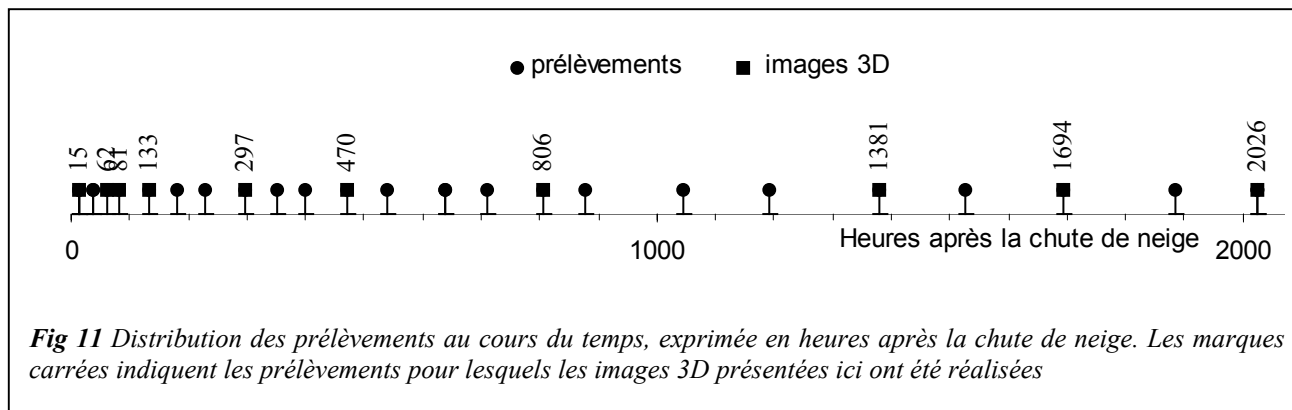
produisit dans la nuit du 15 au 16 janvier 2002, sans vent significatif et avec une température proche de -1°C . 15 heures plus tard, la plaque a été installée dans la chambre froide toute



proche, maintenue plusieurs semaines à une température de -2°C . Les températures au sommet, à la base et au milieu de la couche de neige ont été enregistrées toutes les 10 minutes pendant les 84 jours suivants. Ceci a permis de contrôler la continuité des conditions d'isothermie dans la couche de neige.

2.1. Conditions de prélèvements

23 carottes ont été prélevées durant l'expérience, l'intervalle de prélèvement croissant avec le temps (fig. 11), quotidien au début, hebdomadaire à la fin.



Les premiers centimètres de la couche de neige ont été enlevés de manière à prélever une carotte verticale à mi-hauteur dans la couche. Le carottier était un cylindre métallique de 4 cm de diamètre dont la fine épaisseur et la base affûtée minimisaient les effets de bords. La carotte de neige, placée dans un flacon, était alors prête pour la préparation décrite auparavant.

Simultanément, des grains étaient prélevés de la couche de neige, déposés sur une lame de verre et observés à travers une loupe binoculaire. Leurs silhouettes étaient enregistrées. Un système d'analyse d'images développé au Centre d'Etudes de la Neige (Brun et al., 1987, Lesaffre et al., 1998), fût mis en œuvre pour caractériser la morphologie de la neige, en 2D, à partir d'une quarantaine de contours de grains.

2.2. Les images de neige

Pour le moment, des images de 600^3 voxels (environ $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$) ont été réalisées sur 10 échantillons régulièrement répartis au cours de l'expérience. La figure 12 montre les 10 images volumiques depuis le début (15 heures) jusqu'à la fin (2026 heures).

Des vues plus classiques de quelques grains collectés aux mêmes moments sont également présentées.

Ces images illustrent clairement la métamorphose d'isothermie.

La neige initiale, 15 heures après la chute de neige, est constituée d'un mélange d'étoiles plutôt planes, plaquettes et colonnes. La finesse des cristaux, visible sur l'image 3D, n'atteint parfois que 20 à 30 μm .

Les premiers stades montrent à la fois un lissage des contours des cristaux et leur épaissement. Ensuite, les grains semblent se ramasser sur eux-mêmes, devenir de plus en plus arrondis, leurs tailles ainsi que la densité de la couche s'accroissent.

Finalement, la neige est constituée de particules arrondies, soudées entre elles, sans que l'on puisse reconnaître les cristaux initiaux.

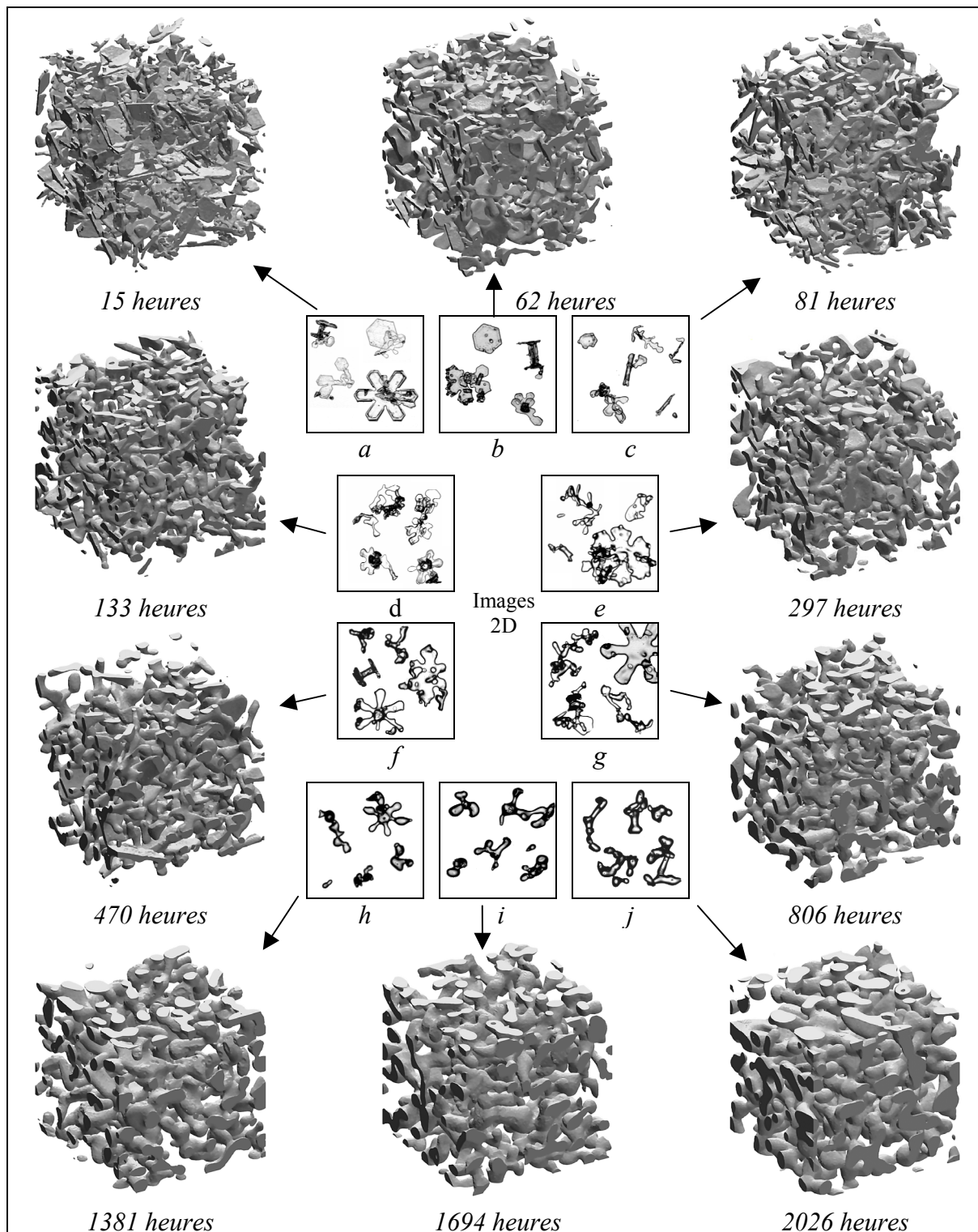


Fig. 12. Les dix volumes (600x600 voxels) de neige traités, de 15 à 2026 heures après la chute de neige. La taille du côté de chaque cube est de 2.95 mm. Les encadrés de (a) à (j), de 4mm de côté, représentent les silhouettes de quelques grains prélevés simultanément.

2.3. Quelques caractéristiques de la métamorphose d'isothermie

Le tassement de la neige durant cette métamorphose conduit à une consolidation de la couche. Dans cette expérience, la masse volumique, mesurée sur les images, évolue de 100 au début à 260 kg/m³ à la fin (fig. 13). L'épaisseur de la couche décroît de 12 cm à 5 cm.

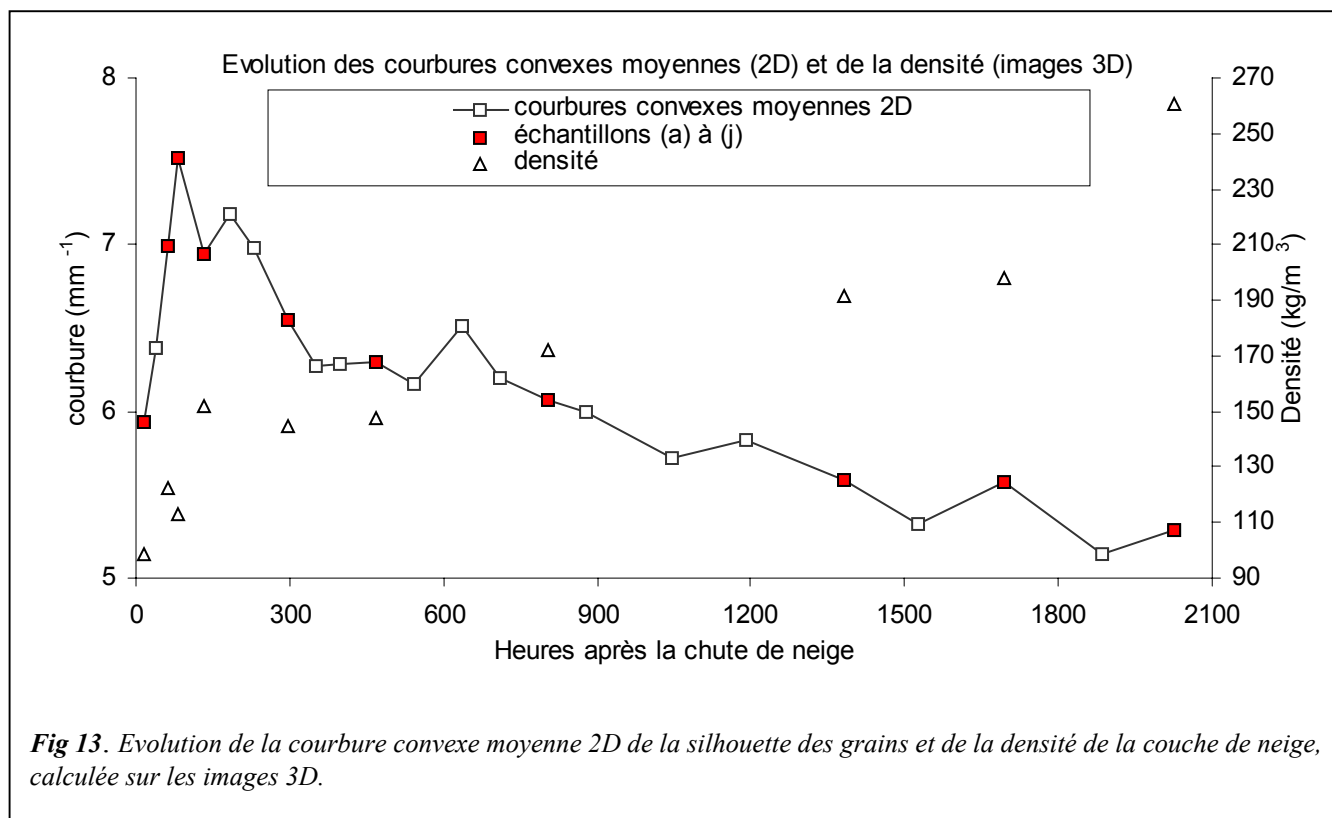


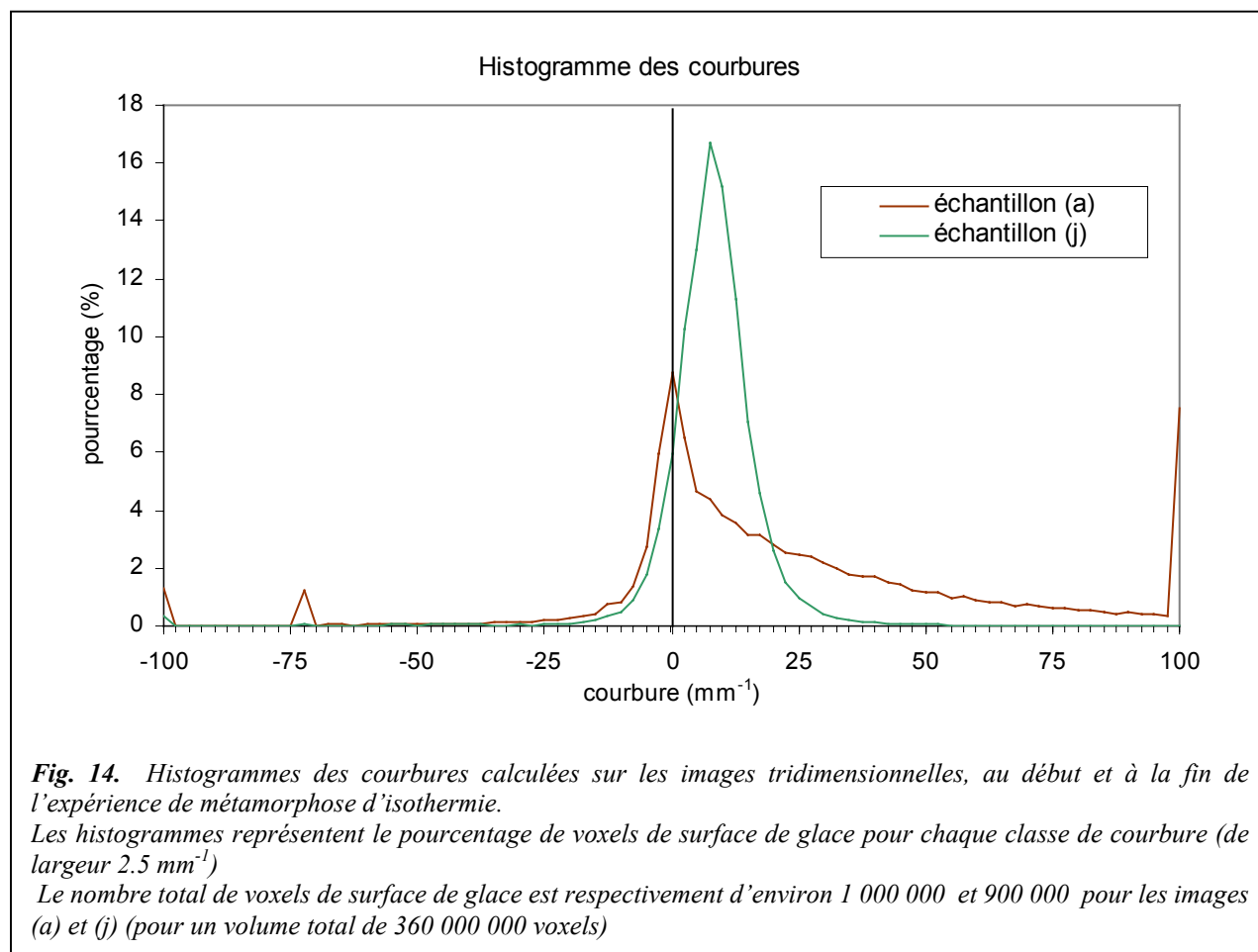
Fig 13. Evolution de la courbure convexe moyenne 2D de la silhouette des grains et de la densité de la couche de neige, calculée sur les images 3D.

La figure 13 présente également la courbure convexe moyenne des grains, calculée sur leurs silhouettes 2D. Ce paramètre donne une information sur la taille des grains.

Excepté au début de la métamorphose, les grains étant trop dendritiques, l'accroissement de leurs tailles moyennes est visible.

Sur les images 3D, la courbure locale a été calculée sur chaque voxel composant la surface des grains.

La figure 14 montre la distribution des courbures pour le premier et le dernier échantillon de l'expérience.



L'histogramme correspondant à la neige initiale présente un pic dans les petites valeurs, en raison des nombreuses zones plates à la surface des grains. Puis il décroît lentement dans les valeurs positives, indiquant les fortes courbures des parties aiguës de la neige fraîche.

Pour le dernier échantillon, l'histogramme se resserre et le pic est décalé vers la droite. Il présente une forme quasi symétrique centrée dans les valeurs de courbures positives.

CONCLUSION

La méthode décrite pour obtenir des images 3D de neige par tomographie montre l'importance de la phase de préparation des échantillons et comment celle-ci affecte la qualité des images.

L'utilisation du chloronaphtalène comme produit d'imprégnation conduit à un contraste satisfaisant dans les images, permettant la distinction entre la glace et les pores. Le principal problème restant lié à l'inclusion de bulles d'air.

La méthode expérimentale ayant été inefficace pour les éviter, nous avons dû développer une procédure spécifique pour les éliminer des images. Une technique d'imprégnation capable d'éviter leur présence permettrait de mettre au point une procédure entièrement automatique et rendrait possible le traitement des volumes entiers (1200^3 voxels).

L'application à une expérience de métamorphose en isothermie a montré que la technique de la microtomographie par rayons X en absorption fournissait des images de haute qualité.

Ce jeu de données constitue un nouveau type de documentation, exploitable pour l'analyse de l'évolution de la microstructure de la neige durant une métamorphose d'isothermie.

Il sera également utilisé pour initier et valider un modèle de métamorphose. En outre, de telles images permettront d'aller plus loin dans les investigations sur d'autres caractéristiques de la microstructure de la neige, spécialement dans le domaine de la mécanique, utilisant des simulations par éléments finis.

REMERCIEMENTS

Nous remercions toute l'équipe de la ligne ID19 à l'ESRF, et en particulier Elodie Boller, Peter Cloetens et José Baruchel pour les fructueux échanges et leur aide constante au cours des expériences.

REFERENCES

- Adams, E. E., D. A. Miller and R. L. Brown, 2001. Grain boundary ridge on sintered bonds between ice crystals. *J. Appl. Physics*, **90**(11), 5782-5785.
- Bartelt, P.B. and M. Lehning, 2001. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning services. Part I: numerical model. *J. Glaciol.*, submitted.
- Baruchel, J., J-Y. Buffière, E. Maire, P. Merle, G. Peix, X-Ray Tomography in Material Science, Hermes (2000).
- Brown, R. L., M. Q. Edens and A. Sato. 1994. Metamorphism of fine-grained snow due to surface curvature differences. *Ann. Glaciol.*, **19**, 69-76.
- Brun, E., F. Touvier and G. Brunot. 1987. Experimental study on thermal convection and grains picture analysis. In Jones H. G. and W. J. Orville-Thomas eds. *Seasonal Snowcovers: Physics, Chemistry, Hydrology*, 75-94.
- Brun, E., P. David, M. Sudul and G. Brunot. 1992. A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting. *J. Glaciol.* **38**(128), 13-22.
- Brzoska, J.B., C. Coléou, B. Lesaffre ; S. Borel, O. Brissaud, W. Ludwig, E. Boller and J. Baruchel. ESRF Newsletter p.22, April 1999.
- Cloetens, P., E. Boller, W. Ludwig; J. Baruchel and M. Schlenker. 2001. Absorption and phase imaging with synchrotron radiation. *Europhysics News*, 46-50.
- Colbeck, S. C. 1980. Thermodynamics of snow metamorphism due to variations in curvature. *J. Glaciol.* **26**(94), 291-301.
- Colbeck, S.C. 1998. A review of sintering in seasonal snow. *C.R.R.E.L. Special report* 97-10.
- Coléou, C., B. Lesaffre, J.B Brzoska, W. Ludwig, E. Boller. 2001. Three-dimensional snow images by X-ray microtomography. *Ann. Glaciol.*, **32**,75-81.
- Coster, M. et J.L. Chermant. 1989. Précis d'analyse d'images. *Presses du CNRS*, 391.
- Good, W. 1987. Thin sections serial cuts and 3-D analysis of snow. Publ 162 IAHS. *Proc. Symp. Davos Avalanche formation, movement and effects*, 35-48.
- Jordan, R., 1991. A one-dimensional temperature model for a snow cover: Technical documentation for SN THERM.89. Special report 91-16, US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, NH.
- Labiche, J.C., J. Segura Puchades, D. Van Brussel and J.P. Moy, ESRF Newsletter p. 41, March 1996.
- Lesaffre, B., E. Pougatch and E. Martin. 1998. Objective determination of snow grain characteristics from images. *Ann. Glaciol.* **26**, 112-118.
- Ozeki, T., K. Kose, T. Haishi, S. Hashimoto, S. Nakatsubo and K. Nishimura. 2002. Three-dimensional MR microscopy of snowpack structures. *Proceedings of the ISSW 2002*.
- Schneebeli, M. 2000. Three-dimensional snow : How snow really looks like. *Proceedings of ISSW 2000, Big Sky, Montana*, 407-408.