

**Série II a - Sciences de la Terre et des planètes**

**High crystalline quality of large single crystals of subglacial ice above Lake Vostok (Antarctica) revealed by hard X-ray diffraction**

**Mise en évidence de cristaux d'une grande qualité structurale dans la glace d'accrétion du lac Vostok (Antarctique) par diffraction aux rayons X durs.**

Maurine Montagnat<sup>a</sup>, Paul Duval<sup>a</sup>, Pierre Bastie<sup>b</sup>, Bernard Hamelin<sup>c</sup>, Olivier Brissaud<sup>a</sup>, Martine de Angelis<sup>a</sup>, Jean-Robert Petit<sup>a</sup>, Vladimir Ya. Lipenkov<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, CNRS, BP 96, 38402 St Martin d'Hères cedex, France.

<sup>b</sup> Laboratoire de Spectrométrie Physique, CNRS, BP 87, 38402 St Martin d'Hères cedex, France.

<sup>c</sup> Institute Laue Langevin, BP 156X, 38042 Grenoble Cedex 9, France.

<sup>d</sup> Arctic and Antarctic Research Institute, St Petersburg 199397, Russia.

Correspondant : Maurine Montagnat  
tel : 33 (0)4 76 82 42 18  
fx : 33 (0)4 76 82 42 01  
maurine@glaciog.ujf-grenoble.fr

**Abstract.** X-ray diffraction experiments were carried out on large ice crystals from accreted ice above Lake Vostok, a subglacial lake lying beneath the East Antarctic ice sheet. Results indicate a surprisingly very low lattice distortion. This crystalline quality does not seem to be affected by impurities. Abnormal grain growth should occur and could explain both the large grain size and the low lattice distortion. Accreted ice is therefore supposed to be non plastically deforming. These results should be taken into account for further studies of the permeability of accreted ice to drilling fluid present in the borehole.

**X-ray diffraction / ice monocrystals /Lake Vostok, Antarctica/ abnormal grain growth**

**Résumé.** Des expériences de diffraction aux rayons X durs ont été réalisées sur des gros cristaux de glace d'accrétion du lac Vostok, un lac sous-glaciaire qui se situe sous la calotte de l'Antarctique de l'Est. Les résultats indiquent une distorsion du réseau particulièrement faible attestant d'une très bonne qualité cristalline qui ne semble pas être affectée par la présence d'impuretés. Le processus de grossissement anormal des grains devrait être à l'origine de la surprenante grande taille et de la qualité cristalline des cristaux de cette glace d'accrétion. Les résultats obtenus nous permettent de supposer que cette glace est très peu déformée plastiquement. Ces résultats devront être pris en compte dans les études sur la perméabilité de la glace d'accrétion au liquide contenu dans le trou de forage.

**Diffraction X / monocristaux de glace / Lac Vostok, Antarctique/ grossissement anormal des grains**

## **Version française abrégée**

### **1. Introduction**

Le Lac Vostok est le plus grand des lacs sous-glaciaires connus ( $\approx 250 \times 50 \text{ km}^2$ ). Il se situe sous la calotte de l'Antarctique de l'Est [10], sous environ 3750 m de glace. L'étude de la carotte de Vostok longue de 3623 m a permis de révéler quatre cycles climatiques sur environ 420 000 ans et la présence de glace de regel du lac à partir de 3539 m de profondeur [9,16] (*figure 1*). Ce lac suscite de nombreuses questions tenant à son histoire glaciologique et son évolution biologique.

Cette glace d'accrétion, caractérisée par des grains de très grande taille (10 à 100 cm) [11] a été analysée par une technique originale de diffraction aux rayons X durs, dans le but de déterminer la distorsion cristalline des monocristaux. En parallèle, une analyse de la teneur en impuretés a été réalisée en portant une attention particulière à leur localisation, dans les cristaux ou aux joints de grain. Les résultats sont analysés afin de déterminer les mécanismes de formation et de croissance de ces cristaux qui se caractérisent par une grande qualité cristalline.

### **2. Les analyses de diffraction X.**

La technique utilisée est celle de la diffraction de Laue par des rayons X durs, c'est à dire en utilisant un faisceau divergent dont le domaine d'énergie est compris entre 100 et 400 keV [5]. Grâce aux faibles longueurs d'onde, il est possible d'étudier des échantillons assez épais (quelques cm), tout en obtenant l'ensemble des informations pour de petits angles de diffraction. Un schéma de principe de la technique est représenté sur la *figure 2* [6]. La divergence du faisceau nous permet d'éclairer des surfaces de l'ordre de  $15 \times 15 \text{ mm}^2$ , proches de la section des échantillons.

L'élargissement des pics de diffraction est directement relié à la distorsion du réseau cristallin. Si cet élargissement est homogène sur toute la tâche de diffraction alors la distorsion observée est une mosaïcité, caractéristique d'une répartition aléatoire des défauts responsables de la distorsion cristalline. On peut aussi observer une inclinaison continue des tâches de diffraction, de part et d'autre de l'échantillon, qui traduit une distorsion continue du réseau produite par un arrangement de dislocations dites géométriquement nécessaires [2].

La *figure 3* représente les clichés de diffraction de deux échantillons de glace d'accrétion prélevés à 3553 et 3610 m de profondeur le long de la carotte de Vostok. On remarque que l'élargissement des tâches de diffraction est très faible, proche de la limite de détection de l'appareil utilisé (de l'ordre de la minute d'arc) et comparable à la mosaïcité de monocristaux fabriqués en laboratoire [12]. La densité de dislocations associée à cette mosaïcité devrait être inférieure à  $10^8 \text{ m}^{-2}$ , une borne supérieure pour les monocristaux fabriqués en laboratoire [6]. L'inclinaison des tâches de diffraction qui résulte d'une distorsion continue du réseau est elle même très faible ( $\Delta\theta \approx 1 \text{ mn d'arc}$ ).

A titre de comparaison, la *figure 4* montre un diagramme de diffraction obtenu sur un monocristal de glace de glacier prélevé à 3493 mètres le long de la carotte de Vostok (zone de gros grains, section  $> 300 \text{ mm}^2$ ). La désorientation continue est très élevée ( $\Delta\theta \approx 45'$  sur la tâche basale) par rapport à celle observée sur les cristaux de glace d'accrétion.

### **3. Teneur en impuretés**

La teneur en impuretés a été déterminée sur des échantillons prélevés à 3553, 3609 et 3611 m de profondeur. La concentration des ions  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$  est beaucoup plus importante dans l'échantillon 3553 m que dans les deux autres (*figure 5a*), ce qui est en accord avec la présence d'inclusions minérales à cette profondeur [16]. Une analyse de la

répartition des impuretés effectuée sur un autre échantillon prélevé à 3553 m (*figure 5b*) indique que les ions  $\text{Cl}^-$  et  $\text{Na}^+$  sont répartis de manière relativement homogène dans le volume, ceci même en présence d'un joint de grain (*figure 5a*) alors que les autres ions semblent concentrés dans des zones restreintes qui pourraient correspondre à des inclusions. Ces observations indiquent que toutes les impuretés ne sont pas localisées aux joints de grain, ceci malgré leur forte concentration ( $\approx 1000$  ppb pour  $\text{Cl}^-$ ).

#### **4. Mécanisme de formation des cristaux de glace d'accrétion.**

Les résultats tirés des mesures de diffraction X et des analyses chimiques indiquent que les glaces d'accrétion entre 3539 et 3623 m de profondeur présentent une très faible distorsion du réseau cristallin et ceci malgré les fortes teneurs en impuretés réparties uniformément dans le réseau cristallin. Les mécanismes de formation et de croissance de ces glaces sont analysés à la lumière de ces résultats.

Des mesures isotopiques ( $\text{O}_{18}$  et deuterium) ont montré que la glace d'accrétion se formait en emprisonnant des poches d'eau du lac par un mécanisme similaire à la formation de glace de frazil dans les "ice shelves" [16]. Ce mécanisme devrait induire des grains de taille de l'ordre de quelques millimètres. Aussi, un mécanisme de grossissement doit-il intervenir pour expliquer les tailles importantes (10 à 100 cm) observées [11].

Les mécanismes de grossissement des grains de glace polycristalline pouvant conduire à de telles tailles de grains sont la *recristallisation par migration*, le *grossissement dit normal* ou le *grossissement dit anormal* [8]. Le premier de ces mécanismes requiert le stockage d'une énergie de déformation sous forme de dislocations pour créer la force motrice de la germination et du grossissement. Or les résultats des expériences de diffraction X révélant une très faible densité de dislocations confirment l'hypothèse faite par Lipenkov [11] selon laquelle cette glace d'accrétion

serait quasi-stagnante. Le *grossissement normal des grains* dont la force motrice est liée à la courbure des joints de grain ne peut donner des grains aussi gros si l'on tient compte de forces d'épinglage des joints par les microparticules ou de l'effet des impuretés solubles sur la mobilité des joints [1]. Le *grossissement anormal* est initié par une instabilité de certains grains, qui sous la force motrice liée à l'énergie de joint de grain, vont grossir anormalement. Cette instabilité est initiée si certains grains, généralement les plus gros, sont limités par des joints à faible énergie et à grande mobilité [7].

Ce grossissement anormal pouvant produire des grains de taille dépassant 30 à 100 fois la taille moyenne initiale [7] semble le mécanisme le plus probable pour expliquer d'une part la grande taille des grains et d'autre part la très grande qualité cristalline de ces cristaux de glace d'accrétion. Une croissance très lente associée à ce mécanisme est compatible avec des vitesses d'accrétion estimées à quelques millimètres par an [14].

L'eau du lac est isolée de l'atmosphère depuis plusieurs centaines de milliers d'années. La possibilité de sa contamination par le liquide de forage situé à plus de 120 m au dessus de la surface du lac fait actuellement l'objet de nombreuses discussions. Ces résultats sur la structure cristalline de ces glaces d'accrétion devraient contribuer à une meilleure estimation de la perméabilité de la glace d'accrétion au liquide de forage.

## **1. Introduction**

Lake Vostok, the largest known subglacial lake ( $\approx 250 \times 50 \text{ km}^2$ ), lies beneath the East Antarctic ice sheet [10] under about 3750 m of ice. Freezing of the lake water occurs in its southern end beneath Vostok Station [15]. A study of the 3623 m long Vostok ice core has revealed four glacial-interglacial climatic cycles down to a depth of 3310 m. A thickness of about 210 m of accreted ice from Lake Vostok is expected below 3539 m depth from isotopic studies [9] (*figure 1*). An ice accretion rate of several millimeters per year is reported [9,14]. From isotopic signature, lake ice is shown to form by the freezing and consolidation of water pockets surrounded by frazil ice [16] and is characterized by exceptionally large crystals (10 to 100 cm) [11].

We present here X-ray diffraction analyses to evaluate the crystalline quality of these large crystals. Impurity content was also determined with a special attention to the localisation within crystals or at grain boundaries. Emphasis is placed on the physical growth mechanism for the formation of such large ice crystals in accreted ice above Lake Vostok

## **2. X-ray diffraction analysis of lake ice monocrystals.**

### **2.1. The hard X-ray diffraction technique.**

The X-ray diffraction experiments were carried out at the Institute Laue Langevin (ILL) in Grenoble using a laboratory X-ray tube and the original Laue hard X-ray technique which allows the in situ observation of bulk samples of more than one centimeter thick [5] (*figure 2*). The energy range for the white divergent beam is between 100 and 400 keV giving wave lengths between 0.03 and 0.12 Å. Bragg angles being low, the diffraction peaks are located close to the

direct beam, allowing the observation of peaks from several crystallographic planes. The observations were done thanks to a CCD camera allowing a fast acquisition of the diffraction patterns.

The width of the diffraction peaks is directly related to the lattice distortion [5]. Angular lattice distortion from 10 sec up to a few degrees can be determined with this technique depending on the sample - beam source distance. The device used for the present study allows a limit of accuracy close to 1 mn of arc, taking into account the other broadening effects as explained in *figure 3*.

The lattice distortion can be due to randomly localized dislocations, creating mosaïcicity; this distortion is uniform in the sample and creates a homogeneous enlargement of the diffracted lines. Dislocations can also be arranged continuously over the crystal, creating distortions over the sample (such as bending) that are observed by a continuous inclination of the line (*figure 3*). Both diffraction line characteristics (mosaïcicity and inclination) can be analyzed in terms of dislocation density in the single crystal. But, in the case of mosaïcicity, the random character of the dislocations arrangement prevents from finding a simple direct relation [3].

## **2.2. Diffraction patterns of Lake Vostok ice crystals.**

Two samples of accreted ice from 3553 m and 3610 m depth respectively (*figure 1*) were studied. These samples were chosen because of their various impurity contents as shown below. The different diffraction images correspond to reflections on different crystallographic planes (*figure 3*). The illuminated area of the sample ( $15 \times 15 \text{ mm}^2$ ) was chosen close to the sample size.

The width of the diffraction peaks and their inclination correspond almost to the limit of accuracy of the device used. The two samples therefore appear to present a very high crystalline

quality similar to that found on carefully laboratory grown single crystals [12]. A dislocation density lower than  $10^8 \text{ m}^{-2}$  is then expected for these crystals [6].

A slight continuous lattice distortion over the sample ( $\Delta\theta \approx 1 \text{ mn of arc}$ ) can however be observed on the basal reflection of the 3610 m sample and on the prismatic reflection of the 3553 m sample (*figure 3*). *Figure 4* shows, by comparison, results obtained on a glacier ice crystal (of about  $300 \text{ mm}^2$  section) from the same core at 3493 m depth (*figure 1*). The continuous crystalline distortion of the basal plane is about  $45 \text{ mn of arc}$  which is much larger than the one observed in accreted ice.

To summarize, these accreted ice crystals present a very high crystalline quality as shown by the low mosaïcicity and the slight continuous lattice distortion.

### **3. Impurity content in accreted ice.**

Eye-visible mineral inclusions are observed in the upper part of accreted ice [9], until 3609 m depth (*figure 1*). From Souchez et al [16] these mineral inclusions should come from lake water which is mainly constituted of melt glacier ice.

We measured the chemical content of three samples at 3553 m (adjacent to the X-ray analysed sample), 3609 m, and 3611 m depth (*figure 5a*). The 3553 m depth sample was cut into two parts : the first contained a grain boundary with two visible inclusions along it, while the second had no grain boundary and only a few small visible inclusions. Samples at 3609 m and 3611 m did not contain visible inclusions.

The concentration of major ions ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) are about two orders of magnitude higher in the sample from 3553 m than in the 3609 m and 3611 m samples (*figure 5a*). This difference could be related to the presence of visible inclusions in the 3553 m sample. From Petit

et al. [13], the average  $\text{Na}^+$  concentration in the 3553 m sample ( $\approx 1000$  ppb) is one order of magnitude higher than in Vostok ice from glacial periods ( $\approx 100$  ppb), while it is far higher than the concentration observed in the two other samples free of visible inclusions ( $\approx 10$  ppb).

It is worth noting that  $\text{Cl}^-$  and  $\text{Na}^+$  concentrations do not change significantly along the 3553 m sample in the presence of a grain boundary. Another 20 cm long single crystal from the 3553 m interval was analyzed every 3 cm for  $\text{Cl}^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  (*figure 5b*). While  $\text{Cl}^-$  concentration shows very slight changes,  $\text{SO}_4^{2-}$  depicts strong variations inside the crystal. Both observations show that grain boundaries are not gathering all the impurities and that  $\text{Cl}^-$  is homogeneously distributed in the ice lattice, in spite of the high concentration ( $\approx 1000$  ppb). A similar result was found for  $\text{Na}^+$ .

#### **4. Growth mechanisms of accreted ice.**

To summarize, the high crystalline quality, as revealed by X-ray diffraction measurements on accreted ice, indicates that lake ice can be considered as a not plastically deforming material under in-situ conditions. Another significant point is that impurities do not seem to affect this crystalline quality and a relatively high concentration of impurities such as  $\text{Cl}^-$  can be included within the crystal without lattice distortion, in the meantime grain boundaries are not gathering all the impurities.

These assessments are key points to understanding the formation mechanism of large non-distorted crystals in accreted ice. Assuming that this accretion results from the slow freezing of the mixture frazil ice (ice crystals resulting from freezing of supercooled water) plus trapped water pockets [16], we expect to get polycrystalline ice with crystal size not exceeding some millimeters during the initial freezing [17]. The formation of columnar lake ice cannot be put

forward from isotopic measurements [9]. Crystal growth should therefore occur after initial freezing and during the long annealing time while lake ice remains at a temperature close to the melting point.

The growth to very large crystal size within an ice polycrystalline matrix can result from three processes : *recrystallization*, *normal grain growth* or *abnormal grain growth* [8].

*Recrystallization* driven by the stored deformation energy within grains involves the formation of nuclei and their growth into a deformed polycrystalline matrix. This phenomenon requires a high dislocation density resulting from deformation [8]. For instance, a dislocation density of about  $5 \times 10^{11} \text{ m}^{-2}$  is required to initiate the nucleation of an ice grain of 1 mm of radius [4]. Recrystallization could occur in the early stage of growth of accreted ice, but it is not compatible with the grain size and the low lattice distortion revealed by X-ray diffraction.

The *normal grain growth* process driven by the reduction of the grain boundary area probably occurs after the formation of accreted ice [17]. This mechanism stops as soon as any pinning pressure is high enough to counteract the driving force associated with the free energy of grain boundary [8]. From Alley et al. [1], the effect of soluble impurities as found in accreted ice would prevent normal grain growth from leading to grain sizes exceeding a few centimeters.

The driving force for the *abnormal grain growth* process is, as for normal grain growth, the reduction in grain boundary energy. The abnormal growth is associated with the instability of a specific grain and so enhanced by a high boundary mobility, a large size and a small boundary energy. *Special boundaries*, which have a high density of coincidence sites (good fit between grains from certain orientations), have a low energy and exhibit fast rates of growth [7]. Depending on the relative values of the grain boundary mobility and energy, the abnormal grain growth can produce grains with size exceeding 30 to 100 times the mean grain size [7]. The

*abnormal grain growth* process is probably at the origin of the structure of lake ice with exceptionally large and high crystalline quality grains.

Moreover, considering the long annealing time, we expect pure and ordered grain boundaries to dominate, which is in accordance with results shown on *figure 5* and the occurrence of such a process.

## **5. Conclusions.**

These results on the crystalline quality of lake ice crystals provide new information on the structural changes and the dynamics of Vostok accreted ice. It is clear that accreted ice must be considered as a non-plastically deforming material regarding of the very low lattice distortion. The relatively high concentration of impurities within ice crystals does not appear to affect the crystalline quality. The abnormal grain growth seems to be the likely mechanism to explain both the large crystal sizes and the low lattice distortion.

Contamination of the lake water by the drilling fluid present in the borehole at about 120 m above Lake Vostok surface is a subject of interest as lake water is isolated from atmosphere since several hundred of thousand years. Results presented in this paper concerning the crystalline quality and the energy of grain boundaries should be analysed in relation to the possible permeability of accreted ice to drilling fluid.

**Acknowledgments.** This work is part of the joint Vostok ice core project between Russia, the USA and France. We are indebted to the Russian drillers from the St. Petersburg Mining Institute and we thank J.L. Tison and R. Souchez for very helpful discussions.

## References

- [1] Alley R. B., Perepezko J. H., Bentley C. R., Grain growth in polar ice : II. Application, *J. Glaciol.* 32 (1986) 425-433.
- [2] Ashby M. F., The deformation of plastically non-homogeneous alloys, *Phil. Mag.* 21 (1970) 399-424.
- [3] Borbély A., Driver H., Ungar T., An X-ray method for the determination of stored energies in texture components of deformed metals : application to cold worked ultra high purity iron, *Acta. Mater.* 48 (2000) 2005-2016.
- [4] De La Chapelle S., Castelnau O., Lipenkov V., Duval P., Dynamic recrystallization and texture development in ice as revealed by the study of deep ice cores in Antarctica and Greenland, *J. Geophys. Res.* 103 (1998) 5091-5105.
- [5] Hamelin B., Bastie P., Méthode de Laue refocalisée à haute énergie : développements récents, *J. Phys. IV France* 8 (1998) 3-8.
- [6] Higashi A., Lattice defects in ice crystals, Hokkaido University Press, Sapporo, Japan, 1988, pp.28-47.
- [7] Humphreys F. J., A unified theory of recovery, recrystallization and grain growth, based on the stability and growth of cellular microstructures- I. The basic model, *Acta. Mater.* 45 (1997) 4231-4240.
- [8] Humphreys F.J., Haterly M., Recrystallization and related annealing phenomena, Pergamon, Tarrytown, New York, 1995.
- [9] Jouzel J., Petit J. R., Souchez R., Barkov N., Lipenkov V., Raynaud D., Stievenard M., Vassiliev N., Verbeke V., Vimeux F., More than 200 meters of lake ice above subglacial Lake Vostok, Antarctica, *Science* 286 (1999) 2138-2141.

- [10] Kapista A.P., Ridley J.K., De Q. Robin G., Siegert M.J., Zotikov I.A., A large deep freshwater lake beneath the ice of central East Antarctica, *Nature* 381 (1996) 684-686.
- [11] Lipenkov V.Ya., Barkov N., Internal structure of the Antarctic ice sheet as revealed by deep core drilling at Vostok Station. *Proceeding of the International Workshop on Lake Vostok. Lake Vostok Study : Scientific Objectives and Technical Requirement*, St Petersburg, 31 (1998).
- [12] Mansuy P. Contribution à l'étude du comportement viscoplastique d'un multicristal de glace : hétérogénéité de la déformation et localisation, expériences et modèles, Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier, Grenoble. 2001.
- [13] Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N. I., Barnola J. M., Basile I., Benders M., Chapellaz J., Davis M., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V. M., Legrand M., Lipenkov V. Y., Lorius C., Pépin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M., Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, *Antarctica, Nature* 399 (1999) 429-436.
- [14] Salamatin A.N., Vostretsov R.N., Petit J.R., Lipenkov V.Ya., Barkov N.I., Geophysical and paleoclimatic implications of the stacked temperature profile from the deep bore hole at Vostok Station (Antarctica), *Data of Glaciological studies* 85 (1998) 233-240.
- [15] Siegert M.J., Kwok R., Mayer C., Hubbard B., Water exchange between the subglacial Lake Vostok and the overlying ice sheet, *Nature* 403 (2000) 643-646.
- [16] Souchez R., Petit J.R., Tison J.L., Jouzel J., Verbeke V., Ice formation in subglacial Lake Vostok, Central Antarctica, *Earth Planet. Sci. Lett.* 181 (2000) 529-538.
- [17] Tison J.L., Lorrain R. D., Bouzette A., Dini M., Bondesan A., Stievenard M., Linking landfast sea ice variability to marine ice accretion at Hells Gate ice shelf, Ross sea, *Antarctic Research Series* 74 (1998) 375-407.

**Figure 1** : Simplified view of the bottom part of the Vostok ice core showing the localization of the samples analyzed by X-ray diffraction (from Souchez et al. [16]).

**Figure 1** : Représentation simplifiée de la partie basse de la carotte de Vostok montrant la localisation des échantillons analysés par diffraction X (d'après Souchez et al. [16]).

**Figure 2** : Schematic diagram of the diffracted lines observed in the focal plane. The sample is illuminated by a divergent X-ray beam from a X-ray tube with a white spectrum (over the energy range considered) and the diffracted beam is focused in a line at a distance from the source of twice the source-sample distance. Several reflections can occur at the same time for different crystallographic plane families.

**Figure 2** : Diagramme schématisant les lignes de diffraction observées dans le plan focal. Les échantillons sont illuminés par un faisceau blanc (dans la plage d'énergie considérée) de rayons X divergent, provenant d'un tube de rayons X. La distance entre la zone de focalisation du faisceau diffracté et l'échantillon est égale à la distance entre ce dernier et la source. Plusieurs réflexions peuvent se produire en même temps, pour différentes familles cristallographiques.

**Figure 3** : Diffraction patterns for a) the 3610 m and b) the 3553 m depth samples. Several crystallographic orientations are observed : the basal (002), prismatic (100), and several pyramidal planes. Uniform broadening of the lines is related to different parameters : the size of the filament of the X-ray tube, the thickness of the sample, and the lattice distortion due to dislocations in the sample [5]. In the case of an imperfect crystal, the last contribution is the more important.

**Figure 3** : Diagrammes de diffraction pour les échantillons a) 3610 m et b) 3553 m. On observe plusieurs orientations cristallographiques : basale (002), prismatique (100) et plusieurs pyramidales. L'élargissement uniforme des tâches est lié à différents paramètres : la taille du filament du tube à rayons X, l'épaisseur de l'échantillon et la distorsion du réseau créée par les dislocations dans le cristal [5]. Dans le cas d'un cristal imparfait, la dernière contribution est la plus importante.

**Figure 4** : Diffraction pattern for a glacier ice crystal found at 3493 m depth in the Vostok core (crystal size of about 300 mm<sup>2</sup>).

**Figure 4** : Diagramme de diffraction pour un cristal de glace de glacier prélevé à 3493 m de profondeur le long de la carotte de Vostok (taille du cristal d'environ 300 mm<sup>2</sup>).

**Figure 5** : a) Ion concentration in three samples of accreted ice from different depths. "gb" stands for "grain boundary". b) Ion concentration distributions in a 20 cm long crystal from 3553 m depth (without grain boundary).

**Figure 5** : a) Concentration ionique dans trois échantillons de glace d'accrétion prélevés à différentes profondeurs. "gb" correspond à "joint de grain". b) Distribution de la concentration dans un cristal de 20 cm de long (sans joint de grain) prélevé à 3553 m de profondeur.

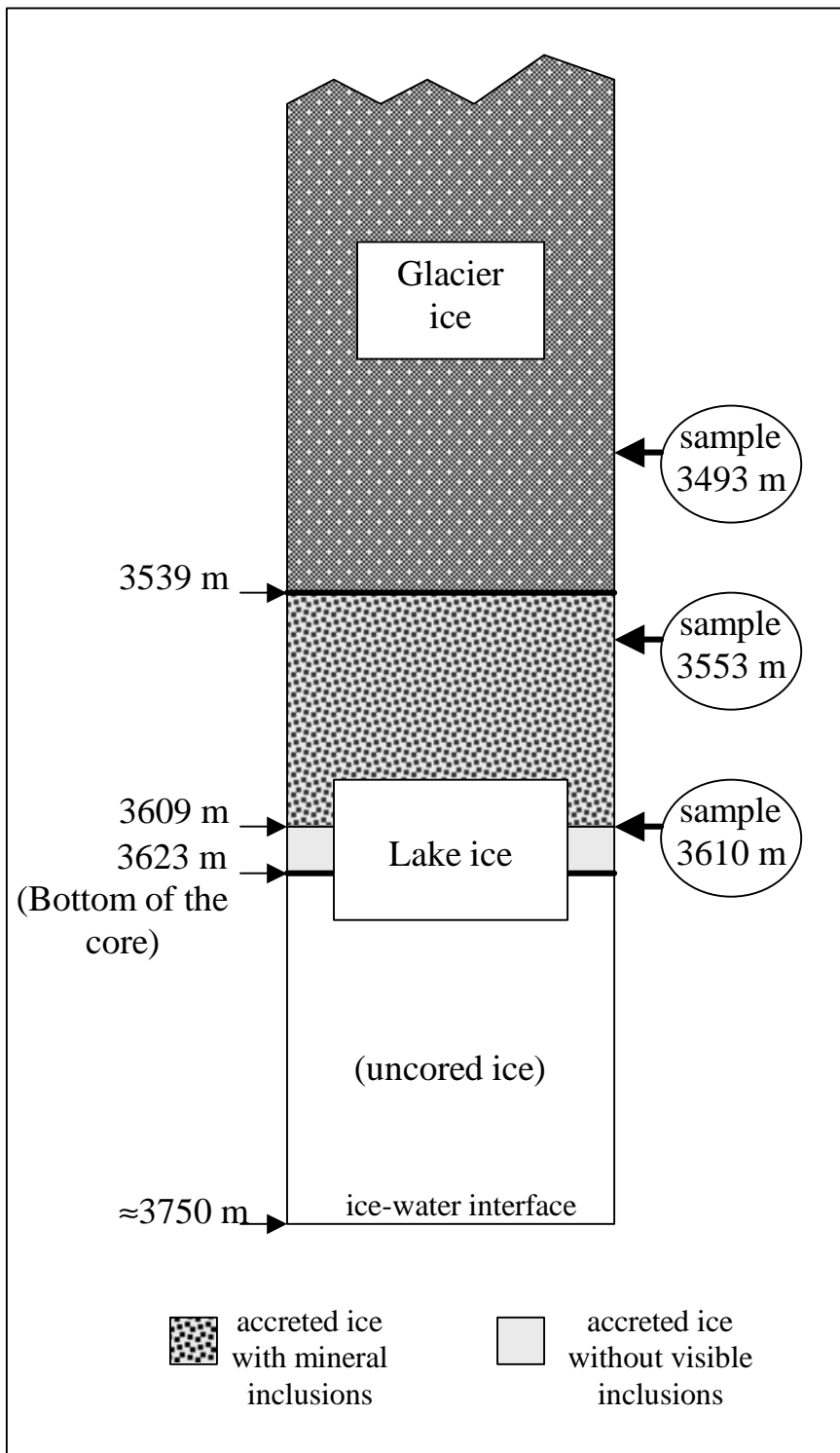


figure 1

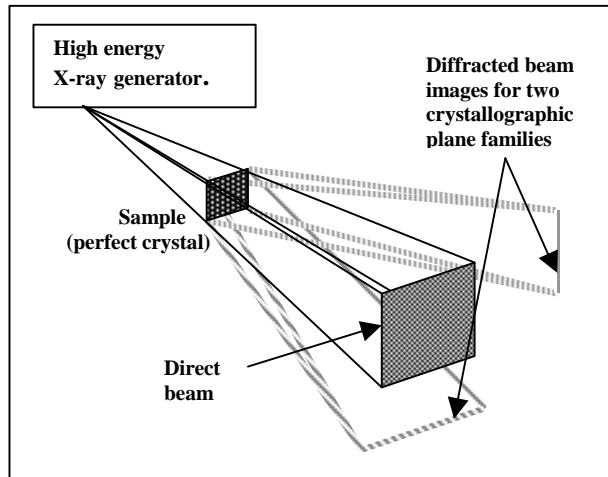


figure 2

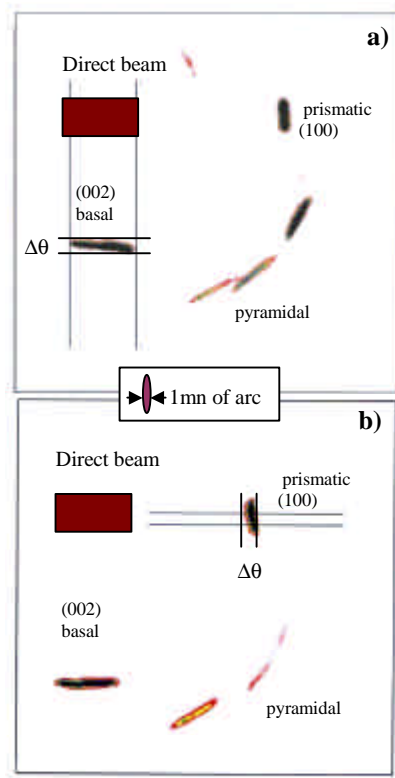


figure 3

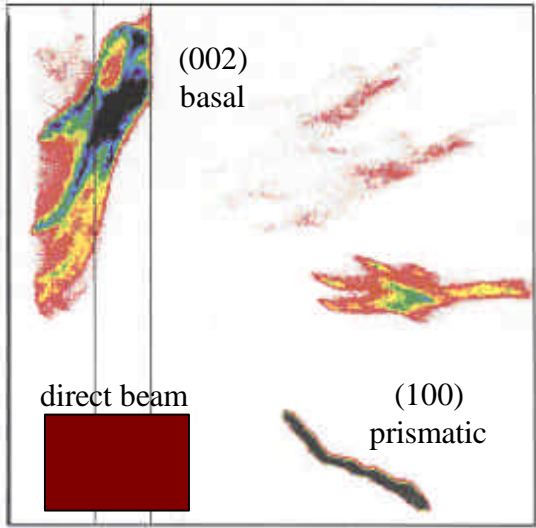


figure 4

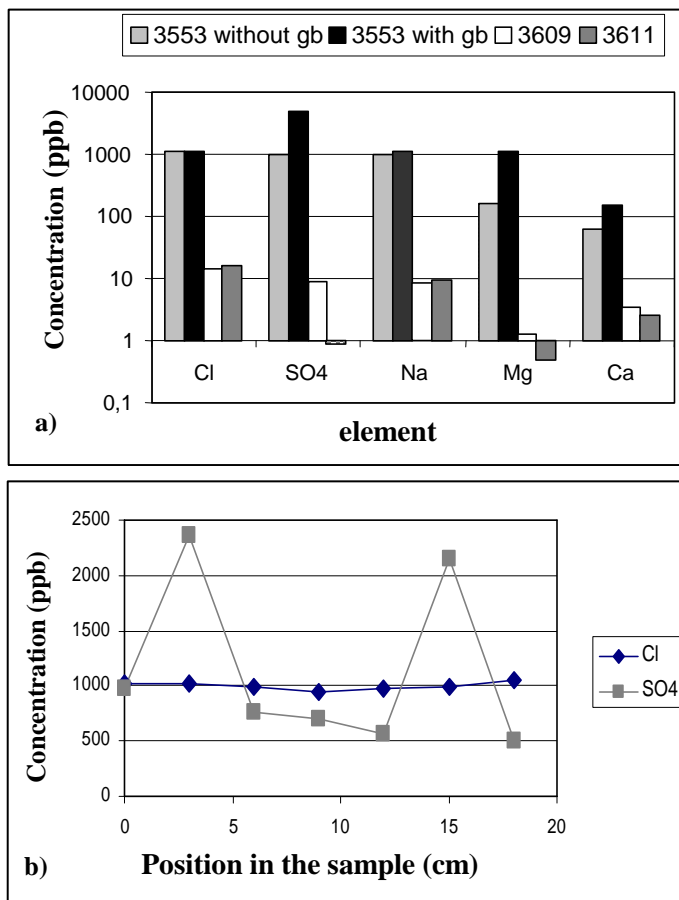


figure 5