

Densité de la glace et étude des gaz en profondeur dans un glacier antarctique

C. LORIUS¹, D. RAYNAUD¹ et L. DOLLE², *Centre d'Etudes Glaciologiques des Régions Arctiques et Antarctiques, Saint-Cloud, France*

(Manuscript received August 7, 1967)

ABSTRACT

Different measurements have been performed on ice samples taken from a drilling about 100 meters deep in the coastal region of Terre Adelie (Antarctica); the mean temperature in the hole was approximately -10°C . The results show that the pressure of gaz inclusions and the density of the ice increase with the depth. The values of the density increase from 0.880 g/cm^3 to 0.918 g/cm^3 while the total volume of air decreases from $10\text{ cm}^3/100\text{ g}$ of ice for the samples taken from the surface to $6\text{ cm}^3/100\text{ g}$ at a depth of about 80 meters. At a greater depth, in the section of the drilling containing morainic debris, values of approximately $4\text{ cm}^3/100\text{ g}$ have been found. Lastly, in the blue ice which exists in contact with rock sediments, the volume of air becomes practically nil; this observation confirms that the blue ice has been formed through freezing. The gaz inclusions that are generally spherical show a definite lengthening in the samples taken from a depth of approximately 30 to 50 meters. This is in accordance with the appearance in the drilling of ice from a far-off origin characterized by its deuterium content. The total volume of gaz depends on the place where the ice was formed and the shape of the inclusions is linked to deformations due to ice flow phenomena.

The concentrations of carbonic anhydride and argon found in the gaz contained within the ice approach the concentrations found in atmospheric air. The steady variations of about 1% observed for oxygen proportions (decreasing with the depth) and nitrogen proportions (increasing with the depth) suggest that the composition of the gaz contained within the ice could depend on the conditions prevalent during the formation of this ice, even in the absence of fusion, through adsorption phenomena. Knowledge of the fundamental processes which take part in the formation of gaz inclusions is thus necessary in order to undertake the study of the ancient atmosphere through the gaz contained within the ice.

Introduction

La glace peut présenter différents aspects selon sa teneur en inclusions gazeuses : blanchâtre lorsqu'elles sont nombreuses, bleue et transparente dans le cas contraire. Ces inclusions se forment à partir de l'air atmosphérique qui peut être directement emprisonné dans la neige se transformant en glace par tassement ou, en cas de fusion, dissous puis occlus sous forme de bulles lors du regel de l'eau. La composition initiale des gaz peut se trouver modifiée au cours du temps par des processus physiques ou chimiques tels l'adsorption, la diffusion, l'oxydation de poussières, la décomposition de matières organiques et autres ... Enfin, les

inclusions gazeuses suivent l'évolution du milieu dans lequel elles sont emprisonnées : elles subissent des pressions et des déplacements.

L'étude des gaz contenus dans la glace peut permettre d'aborder différents problèmes tels :

— la caractérisation du mode de formation de la glace. Cette caractérisation est basée sur le fait que l'air dissous dans l'eau représente moins de 2,9% du volume de cette eau (TPN) et qu'il est enrichi en oxygène, argon et anhydride carbonique; par opposition, l'air emprisonné dans la glace formée par tassement des couches de névé peut atteindre jusqu'à 13% du volume de la glace et sa composition est voisine de celle de l'air atmosphérique.

— la recherche de données sur l'écoulement de la glace. Lors de l'évolution des masses de glace, les inclusions se déforment dans les zones

¹ Centre d'Etudes Glaciologiques des Régions Arctiques et Antarctiques.

² Service des Isotopes Stables — C. E. N. Saclay.

soumises à des déplacements différentiels, et l'étude de leur orientation renseigne sur la direction des contraintes existant dans le milieu. De plus, leur pression peut être liée aux profondeurs atteintes par la glace dans son déplacement;

— l'étude de la variation de composition de l'atmosphère. Dans la mesure où les gaz emprisonnés dans la glace des calottes polaires au cours des derniers millénaires ne sont soumis à aucune altération par des processus physiques ou chimiques, on peut espérer observer l'évolution de la composition de l'atmosphère dans le temps;

— la datation de la glace. Pour la glace ancienne, on mesure l'activité du carbone-14 contenu dans l'anhydride carbonique des inclusions gazeuses; la teneur globale et la composition de l'air déterminent les quantités de glace nécessaires à ces études et peuvent permettre de déceler une pollution naturelle éventuelle.

1. Prélèvements

Les échantillons utilisés pour le présent travail ont été prélevés entre décembre 1964 et mars 1966 à proximité de la base Dumont d'Urville (66°40' S-140°01' E) en Antarctique.

1.1. PRÉLÈVEMENTS DE GLACE

Ceux-ci proviennent essentiellement d'un carottage (G1) de 97,8 m de profondeur réalisé à environ 500 m de la côte et à proximité d'une moraine. En cette station, l'accumulation et l'ablation sont pratiquement nulles; on a rencontré, lors du carottage, de la glace blanche à l'exception d'une couche de 11 m d'épaisseur située entre 83,3 et 94,3 m de profondeur qui contient des poussières morainiques et d'une couche d'environ 2 m de glace bleue située au contact du socle rocheux. La température s'élève de la surface (-11°C) vers le fond (-8°C). Des blocs de surface ont aussi été prélevés entre la côte et le point de forage G1 (stations AOA et AOB); tous ces échantillons ont été conservés sous forme solide jusqu'à leur étude en laboratoire.

Les méthodes de prélèvement, la description et la conservation des échantillons ont été décrites précédemment (Lorius, Ricou et Rosello, 1967, Raynaud, 1966). Une synthèse des différents résultats obtenus pour G1 sera publiée par ailleurs (Lorius, 1967) mais il est

pendant intéressant de rappeler ici les conclusions principalement basées sur la mesure de la concentration en isotopes stables (Merlivat, Lorius et Nief, 1966; — Merlivat, Lorius, Majzoub, Nief et Roth, 1966) :

— à partir de la surface on rencontre une couche de glace de 32 m d'épaisseur isotopiquement homogène dont la teneur en deutérium est de l'ordre de 139 p.p.m.; cette glace provient de la transformation de précipitations déposées jusqu'à une distance de 100 km environ;

— puis, sur environ 20 m de profondeur, la teneur isotopique décroît de façon très rapide pour atteindre et conserver la valeur moyenne de 105 p.p.m. On peut estimer que la glace qui se trouve entre 52 et 96 m de profondeur provient d'un lieu distant d'au moins 900 km de la côte (température moyenne : -47°C); la valeur extrême mesurée repousse cette origine à environ 1000 km;

— enfin, dans la glace bleue, au contact du socle rocheux, la teneur en deutérium croît brutalement jusqu'à une valeur de 156 p.p.m. ce qui montre qu'elle a été formée par congélation d'eau de mer.

1.2. PRÉLÈVEMENTS GAZEUX

Ils ont été opérés sur l'air atmosphérique et celui contenu dans le névé à la balise A3 située à 2,8 km de la côte, à une altitude de 220 m. Les prélèvements d'air atmosphérique ont été faits directement dans des ampoules de verre. Ceux dans le névé ont été obtenus par pompage au moyen d'un tube métallique dont l'extrémité est taillée en biseau et que l'on enfonce de 30 à 40 cm dans le névé à la base d'un trou foré jusqu'à la profondeur désirée. Une pompe aspire l'air parasite qui se trouve à la fois dans le tuyau à vide reliant le dispositif de prélèvement au tube métallique et dans la partie creuse de ce dernier. Lorsque la pression lue sur un manomètre à mercure s'est stabilisée, on relie ce tube aux ampoules de prélèvement dans lesquelles on a fait le vide; elles se remplissent ainsi de gaz prélevés directement dans le névé.

2. Densité et teneur en gaz de la glace, répartition, forme et pression des inclusions gazeuses

2.1. MÉTHODES DE MESURE

Les échantillons prélevés en janvier 1965 ont été étudiés au cours de la même année; ils

étaient préalablement nettoyés et ceux présentant des fissures apparentes écartés.

La détermination de la densité de la glace a été effectuée par la méthode hydrostatique décrite dans le détail par Langway (1958). Dans le cas de la glace contenant des inclusions solides, nous avons tenu compte du poids et du volume de ces inclusions (Shumskiy, 1957). Pour cela, le poids des poussières pour les huit échantillons qui sont dans ce cas, a été déterminé par pesée après filtration de l'eau de fusion; pour quatre de ces échantillons, la densité des poussières mesurée à l'aide de pycnomètres a donné comme valeur moyenne 2,73 g/cm³.

La mesure du volume global des gaz recueillis dans une burette lors des déterminations de densité est entachée d'erreur car une fraction des gaz reste en solution dans l'eau de fusion. Pour cette raison, les mesures ont été complétées par l'analyse des gaz retenus dans l'eau; on procède par introduction directe de l'eau de fusion dans un dispositif de dégazage inséré dans le trajet du gaz vecteur (hélium) d'un chromatographe Perkin Elmer F63. On trouve ainsi que l'eau de fusion retient des quantités de gaz qui correspondent à 85 % des teneurs de saturation (les valeurs extrêmes se situant vers 75 et 90 %) et semblent indépendantes de la quantité de gaz contenue dans la glace pour des teneurs comprises entre 4 et 10 cm³ d'air par 100 g de glace. Le volume global des gaz contenus dans la glace a donc été finalement calculé en ajoutant à la quantité d'air recueillie dans la burette celle de l'air retenu dans l'eau de fusion.

Le nombre et les dimensions des inclusions gazeuses ont été déterminés par examen à la loupe de photographies agrandies de lames minces de glace. Sur une surface de 2 cm², on a procédé à deux déterminations indépendantes du nombre de bulles; de plus, le diamètre moyen (dans le cas d'inclusions sphériques) et le rapport grande dimension sur petite dimension (dans le cas d'inclusions allongées) a été déterminé.

La précision des mesures dépend des conditions de manipulation autant que de la qualité des instruments utilisés. La détermination de la densité (généralement effectuée à -5°C) est ainsi influencée par une légère dérive que nous avons parfois notée sur la balance lors des pesées dans le 2.2.4. triméthyl-pentane. Ceci

pourrait être dû à un mauvais équilibre de température mais peut-être aussi à l'existence de micro-fractures dans les échantillons de glace qui n'apparaissent pas à l'observation visuelle. Compte tenu des différents tests de reproductibilité, on peut estimer la précision des mesures de densité à mieux que 1·10⁻³ g/cm³. L'erreur est par contre plus importante pour la glace contenant des inclusions solides, le poids et la densité de ces inclusions étant connus avec une précision beaucoup moins bonne. La principale source d'erreur dans la détermination du volume global des gaz est due à la solubilité de l'air dans l'eau de fusion. On peut estimer à 0,2 cm³ l'erreur maximale commise compte tenu des corrections de solubilité apportées.

2.2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

2.2.1. Variation de la densité en fonction de la profondeur (fig. 1).

Alors que les échantillons de surface ont une densité voisine de 0,88 g/cm³, celle de la glace ramenée aux conditions de température *in situ* croît en fonction de la profondeur pour atteindre asymptotiquement la densité de la glace pure (0,9179 à -8°C) dans une zone où la teneur en air des échantillons est sensiblement nulle. Deux points s'écartent notablement de la courbe moyenne; ils sont situés à 93,3 et 94,4 m et la présence d'inclusions solides pourrait expliquer ces résultats apparemment incohérents. La croissance de la densité ainsi observée est à rapprocher des mesures obtenues dans différents secteurs de l'Antarctique (cf. GOW, 1964, pour la comparaison des différents résultats).

2.2.2. Nombre et forme des inclusions gazeuses

Bien que la répartition des bulles et leurs dimensions ne soient pas homogènes, sur une même lame mince, l'examen des photographies met en évidence les caractères suivants :

— sur l'ensemble du forage G1 et des blocs de surface, les inclusions sont généralement sphériques; leur diamètre décroît d'environ 0,7 mm vers la surface jusqu'à 0,2 et même 0,1 mm vers le fond du forage. Une seule partie du carottage présente des inclusions allongées; l'allongement a une direction uniforme et le rapport des axes varie entre 2 et 3. Les déformations se trouvent à partir de 37 m jusqu'à une profondeur comprise entre 50 et 55 m;

— les bulles sont relativement peu nombreu-

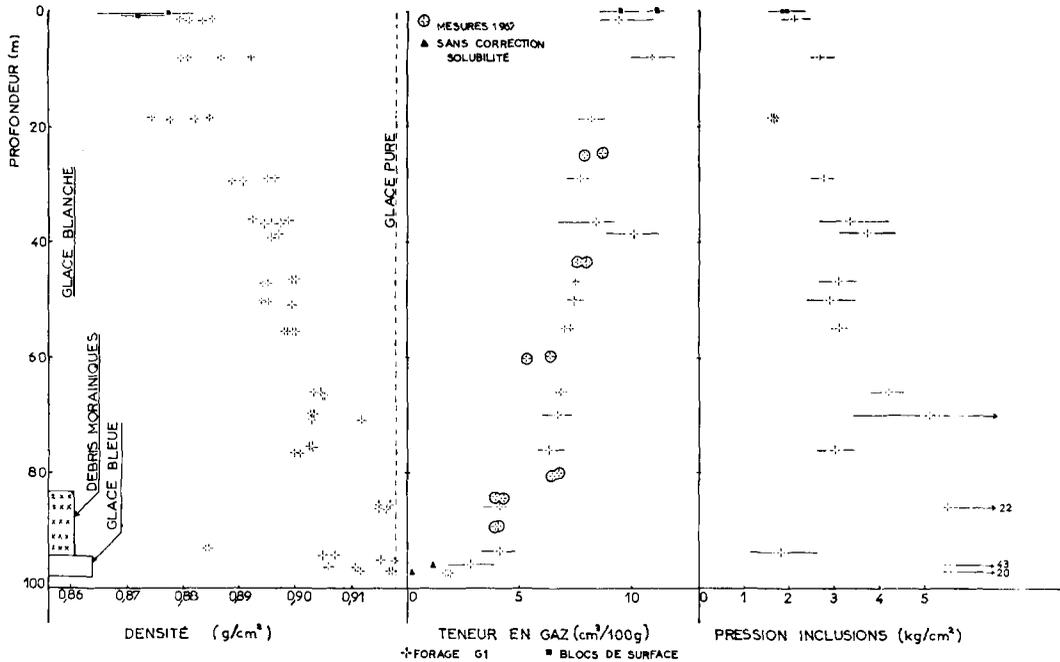


Fig. 1. Densité de la glace, teneur en gaz et pression des inclusions en fonction de la profondeur.

ses en surface (quelques unes par cm^2 de section). Leur nombre croît de façon nette à partir d'une profondeur de 30 m, certaines sections pouvant avoir jusqu'à 30 bulles par cm^2 . La glace au contact du sédiment rocheux est transparente et sur certaines lames, on n'observe pratiquement aucune bulle. Notons qu'il n'a pas été possible de repérer les bulles dans la portion du forage qui contient des inclusions solides, la surface des grains étant alors de l'ordre de 1 mm^2 ;

— les inclusions gazeuses ne sont pas situées à la limite des cristaux, mais bien dans leur sein même.

Ces différentes observations se recourent avec celles publiées par Schytt (1958), Mellor (1961 et 1964), Gow (1963). Il semble intéressant de signaler que la zone de déformation des inclusions gazeuses (entre 37 et 50 ou 55 mètres de profondeur) correspond à la décroissance rapide des teneurs isotopiques attribuée à l'apparition de la glace d'origine lointaine. Ce phénomène doit évidemment s'accompagner d'un écoulement différentiel marqué. Dans les blocs de surface, il est de plus à remarquer que, pour le point AOA, les bulles d'abord sphériques et peu nombreuses en surface sont

déformées et de plus en plus nombreuses vers 90 cm de profondeur; des bulles allongées sont également visibles au point AOB vers 50 cm (rappelons que cette glace est supposée provenir des couches profondes d'après l'interprétation des mesures d'isotopes stables).

2.2.3. Volume global des gaz contenus dans la glace

Les volumes globaux (TPN) contenus dans 100 g de glace sont portés sur la fig. 1, la dispersion des mesures effectuées à un même niveau étant donnée par la barre tracée de part et d'autre de la valeur moyenne. Le volume de gaz qui est de l'ordre de $10 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ de glace pour les couches de surface diminue en fonction de la profondeur pour atteindre environ $6 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ de glace vers 80 m. La teneur en air décroît ensuite de façon très nette d'abord dans la zone renfermant les inclusions solides (environ $4 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$) puis dans la zone en contact avec les sédiments rocheux. Dans ce dernier cas, les valeurs inférieures des quantités de gaz récupérées dans la burette sont de l'ordre de $0,2 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$, sans que l'on sache si la correction de solubilité de l'air dans l'eau peut encore s'appliquer à des quantités de gaz aussi faibles. Sur la figure 1 sont aussi représentés les résultats

obtenus sur des prélèvements de surface aux points AOA et AOB qui sont en accord avec les valeurs trouvées dans les glaces de surface du forage, bien que ces prélèvements soient constitués de glace provenant des couches profondes d'après leur teneur isotopique.

Dans l'ensemble, les valeurs obtenues sont du même ordre que celles données par Shumskiy (1960), Bader (1961) et Langway (1962), bien que dans le cas de mesures en profondeur, la décroissance des teneurs en gaz ne semble pas apparaître dans ces travaux.

Pour expliquer ce phénomène, on peut penser à la diffusion des gaz dans la glace, hypothèse qui sera discutée plus loin (cf. 3.4); il ne semble pas que cette variation puisse être liée aux microfractures qui pourraient exister dans les carottes car les déterminations de volumes globaux effectuées deux ans après les premières mesures (mesures indiquées 1967 sur la figure 1) s'insèrent parfaitement dans l'ensemble des résultats, bien que les inclusions soient sous une pression supérieure à la pression atmosphérique. Mais si on se reporte à l'interprétation des mesures d'isotopes stables, cette décroissance pourrait être liée aux conditions de formation de la glace. En effet, si on admet comme Bader (1965) que la densité de la glace au moment de la fermeture des pores (γ_c = densité au « close off ») est relativement constante dans le cas de glaciers froids, la teneur en air de la glace varie en fonction de son lieu de formation, les deux paramètres importants étant la température et la pression atmosphérique. A partir du volume des vides

$$\varepsilon_c = \frac{\gamma_i - \gamma_c}{\gamma_i}$$

(γ_i = densité de la glace pure à la température du lieu) on connaît le volume de gaz emprisonné à la pression atmosphérique et à la température du lieu. On calcule ainsi qu'une glace se formant à une altitude de 3100 m (distance à la côte d'environ 1000 km, température -50°C , pression atmosphérique de l'ordre de 650 mb) ne contiendra environ que 80 % de l'air d'une glace se formant dans la région côtière. Cette différence n'explique pourtant que partiellement la variation observée entre 0 et 80 m de profondeur, c'est-à-dire sans tenir compte de la partie contenant les inclusions solides.

Par ailleurs, les faibles teneurs trouvées pour la glace au contact du socle sont en bon accord

avec l'interprétation d'une origine marine de cette glace déterminée à partir des teneurs en isotopes stables.

2.2.4. Pression des inclusions gazeuses

Elle a été calculée à partir des mesures de densité et de teneur en gaz suivant la méthode décrite par Langway (1958). Les résultats représentés sur la figure 1 montrent que la pression croît avec la profondeur, les valeurs à chaque niveau étant relativement bien groupées jusque vers 80 m, à l'exception d'un échantillon pour lequel on a d'ailleurs une valeur de densité anormalement élevée. Par contre, la dispersion des mesures devient considérable dans la dernière partie du forage et pour trois niveaux, on s'est contenté d'indiquer les valeurs moyennes sur la figure 1. Il est vrai que la précision de la détermination de densité (pour la partie renfermant des inclusions solides) et de la teneur en gaz (partie constituée par la glace bleue) est ici nettement moins bonne et doit influencer ces valeurs, autant que l'hétérogénéité des conditions naturelles. Différentes comparaisons ont été effectuées à partir des données concernant les 80 premiers mètres; ainsi pour les échantillons de surface et la couche intéressant les dix premiers mètres environ, la pression des bulles est supérieure à la pression *in situ* (pression atmosphérique locale + pression due au poids des couches supérieures de glace) d'environ 1 kg/cm^2 . Plus en profondeur, la pression *in situ* devient supérieure à la pression des bulles, la différence croissant de façon relativement régulière pour atteindre entre 3 et 4 kg/cm^2 lorsque la pression *in situ* vaut de 7 à 8 kg/cm^2 .

3. Composition des gaz

3.1. EXTRACTION

En dehors des prélèvements de bulles localisées à l'aide de seringues (Scholander, Kanwisher et Nutt, 1956; Scholander, Hemmingsen, Coachman et Nutt, 1961), on peut procéder à une extraction sèche des gaz (Coachman, Hemmingsen et Scholander, 1956) ou à une récupération après fusion sous vide. Nous avons utilisé cette dernière technique (Raynaud, 1966), plus simple et qui évite l'adsorption des gaz et notamment du CO_2 constatée sur des échantillons finement abrasés (Alder, Geiss, Grogler et Renaud, sous presse).

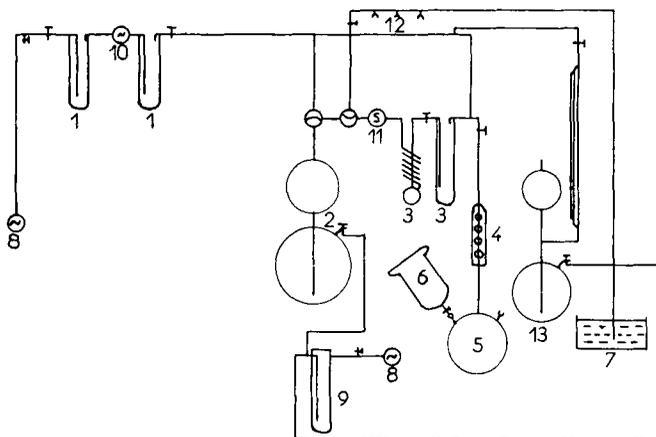


Fig. 2. Ligne de dégazage. 1, pièges à azote liquide; 2, pompe de Toeppler; 3, pièges pour vapeur d'eau; 4, réfrigérant; 5, ballon de dégazage; 6, gamelle; 7, manomètre à mercure; 8, pompe primaire; 9, piège pour mercure; 10, pompe secondaire principale; 11, pompe d'extraction à diffusion de vapeur de mercure; 12, rodages pour cellules d'analyse; 13, jauge de MacLeod.

L'ensemble de la ligne de dégazage (fig. 2) est mis préalablement sous vide à la pression de 10^{-5} mm Hg. Puis l'échantillon de glace placé dans la gamelle est fondu sous vide; les gaz contenus dans la carotte s'échappent et se dissolvent en partie dans l'eau de fusion. Celle-ci est alors introduite dans le ballon de dégazage, la pompe d'extraction étant en fonctionnement; l'eau dégaze ainsi complètement. Puis les gaz sont récupérés au moyen de la pompe de Toeppler et leur volume total mesuré dans une burette. Une fraction est transférée sous pression connue dans les cellules d'analyse par une nouvelle opération de la pompe de Toeppler. Après l'extraction nous avons généralement mesuré la pression résiduelle des gaz secs; les valeurs obtenues sont inférieures à 10^{-3} mm Hg et la loi de Henry permet alors de calculer la quantité de gaz qui demeure dissous dans l'eau de fusion. Cette quantité varie entre $0,30 \cdot 10^{-6}$ cm³ (argon) et $10,5 \cdot 10^{-6}$ cm³ (azote). Pour tous les constituants, l'erreur introduite est inférieure à celle due aux appareils d'analyse.

3.2. MÉTHODES D'ANALYSE

L'azote, l'oxygène et l'argon sont analysés par spectrométrie de masse et le CO₂ par chromatographie en phase gazeuse. L'analyse quantitative du gaz carbonique a constitué jusqu'à présent une difficulté particulière; les teneurs de gaz carbonique dans la glace étudiée auparavant varient entre un maximum de l'ordre

de 20 % en volume et un minimum de l'ordre de la teneur atmosphérique (300 vpm). Les analyses antérieures avaient été faites soit au moyen de l'analyseur de Scholander (Scholander, 1947) soit par spectrométrie de masse. L'appareil de Scholander permettant de doser les gaz de l'atmosphère avec une précision de $\pm 0,015$ % en volume se prête mal à une mesure précise directe des constituants en très faibles teneurs sans séparation préalable. Nous avons d'autre part remarqué que l'analyse directe sans séparation préalable du gaz carbonique à l'état de trace dans un mélange gazeux n'était pas reproductible avec le spectromètre de masse que nous avons utilisé. Ceci pourrait être du soit à une oxydation du filament lorsqu'on introduit de l'oxygène, soit à une désorption de CO₂ au moment de la circulation des autres constituants. La chromatographie en phase gazeuse par contre permet l'analyse du gaz carbonique dans les gaz de la glace sans séparation préalable. La précision obtenue est de $\pm 0,005$ % (Raynaud, 1966).

3.3. RÉSULTATS

3.3.1. Air atmosphérique

Les teneurs mesurées sur 4 échantillons sont les suivantes : azote $78,37 \pm 0,02$ %; oxygène $20,72 \pm 0,02$ %; argon $0,914 \pm 0,003$ %.

3.3.2. Prélèvement de gaz dans le névé

Les valeurs obtenues sont données dans le tableau suivant:

Echantillons	Profondeur du prélèvement en mètres	N ₂ %	O ₂ %	A %
A3 N1	1	78,40 ± 0,05	20,69 ± 0,04	0,92 ± 0,01
A3 N2	5,3	78,39 ± 0,03	20,69 ± 0,03	0,918 ± 0,005
A3 N3	9	78,37 ± 0,01	20,73 ± 0,01	0,912 ± 0,003
A3 N4	13	78,39 ± 0,04	20,70 ± 0,03	0,915 ± 0,005

3.3.3. Composition des gaz contenus dans la glace

Les teneurs en N₂, O₂ et A obtenues le long du forage G1 et comparées à une composition de référence constituée par les valeurs atmosphériques (cf. 3.3.1) sont portées sur les figures 3 et 4. Les teneurs en CO₂ relatives à ce même forage (fig. 4) ont été calculées par rapport au volume total de gaz envoyé dans le chromatographe. Les précisions obtenues sont indiquées sur ces deux figures.

3.4. DISCUSSION

3.4.1. Etudes antérieures

Pour le glacier tempéré du Storbreen (Norvège) les résultats obtenus par Coachman, Hemmingsen et Scholander (1956) font appa-

raître, lorsqu'on se déplace progressivement de la ligne de névé vers la partie terminale du glacier, une décroissance de la proportion d'oxygène sans augmentation parallèle de celle du gaz carbonique, les teneurs maximales en oxygène étant de l'ordre de la proportion atmosphérique. La décroissance de la proportion d'oxygène est attribuée à une perte préférentielle de ce gaz soit par diffusion à travers les films salins intercristallins, soit par oxydation de poussières à l'intérieur de chaque bulle. Des pertes d'argon ayant été mises en évidence, cette étude a été reprise par la suite (Coachman, Enns et Scholander, 1958). On conclut qu'il y aurait légère fusion autour des bulles en été dans le cas d'un glacier tempéré. Les gaz se dissoudraient dans la phase liquide et cette

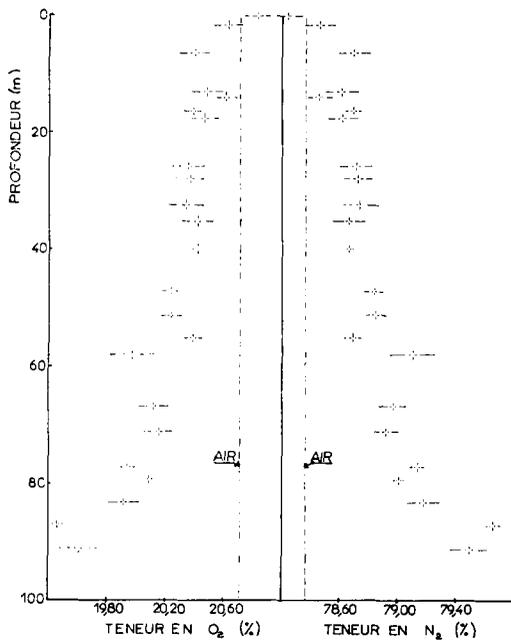


Fig. 3. Teneurs en oxygène et en azote en fonction de la profondeur.

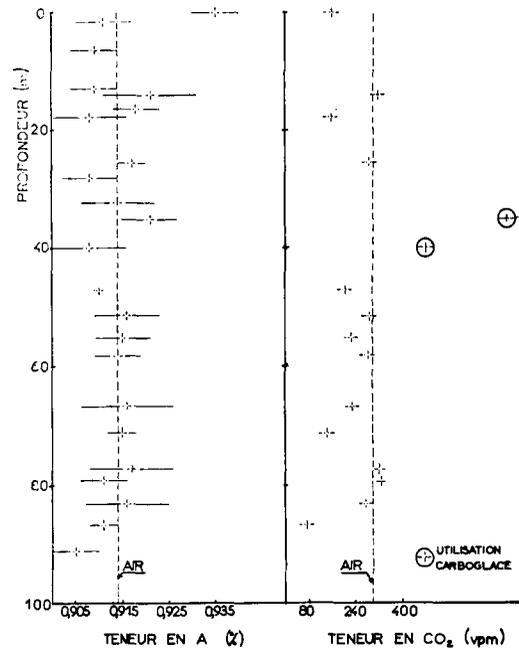


Fig. 4. Teneurs en argon et en gaz carbonique en fonction de la profondeur.

dernière remonterait jusqu'à la surface, à travers les canaux capillaires intercrystallins, les gaz dissous ne pouvant eux-mêmes s'échapper en raison de la force capillaire. Les « pertes » préférentielles de O_2 , A et CO_2 seraient ainsi expliquées.

En ce qui concerne le Groenland, un premier travail (Scholander, Kanwisher et Nutt, 1956) sur de la glace d'icebergs a révélé, pour certains d'entre eux, de faibles teneurs en oxygène. Il a été supposé qu'au moment de la formation de cette glace, un climat généralement froid aurait freiné l'activité photosynthétique des plantes vertes sur une grande partie de la terre. D'autres déterminations (Scholander, Hemmingsen, Coachman et Nutt, 1961) ont montré des variations importantes de la composition des gaz contenus dans de la glace d'icebergs et de glaciers (région de Thule). Les teneurs en oxygène ont été trouvées généralement plus faibles que la teneur atmosphérique dans le cas des icebergs et plus fortes dans celui des glaciers. Dans le premier cas, les auteurs s'en tiennent à la dernière explication donnée au sujet des pertes d'oxygène pour le Storbreen. Dans le second, ils expliquent l'élévation de la proportion d'oxygène par un enrichissement dû à la dissolution de l'air atmosphérique dans l'eau de fusion en surface au cours du réchauffement de la glace, ces gaz préférentiellement dissous se trouvant occlus sous forme de bulles au moment du regel. En concordance avec cette explication, les gaz analysés se trouvaient enrichis parallèlement en argon et en gaz carbonique par rapport aux teneurs atmosphériques. Afin d'obtenir des informations complémentaires à ce sujet, Alder, Geiss, Grogler et Renaud (sous presse) ont analysé des échantillons de glace prélevés au camp III. Ils ont généralement observé des teneurs en oxygène et des rapports A/N_2 et O_2/N_2 inférieurs à ceux de l'air et ont pu établir une nette corrélation entre ces rapports qui suggère que la solubilité des gaz dans l'eau est un facteur déterminant. Les teneurs en CO_2 sont à considérer avec prudence en raison de l'utilisation de carboglace pour la conservation des échantillons. Enfin, Langway (1962) a étudié des prélèvements provenant d'un forage profond de 411 m pratiqué sur l'inlandsis groenlandais. Il trouve des rapports entre l'azote, l'oxygène et l'argon équivalents à ceux de l'air et des teneurs en gaz carbonique relativement élevées, mais les

échantillons ont été mis aussi en présence de carboglace pendant leur transport.

Le seul travail concernant l'Antarctique a été publié récemment par Matsuo et Miyake (1966); les auteurs ont analysé les gaz contenus dans des échantillons de surface provenant de glaciers et d'icebergs au voisinage de la base Showa ($69^\circ S$, $39^\circ 35' E$); les teneurs en azote varient entre 73,2 % et 78,3 %, celles en oxygène entre 20,7 % et 25,3 %, celles en CO_2 entre 0,028 % et 0,29 % et celles en argon entre 0,93 % et 1,22 %. Suivant les résultats obtenus, les auteurs classent leurs échantillons en différentes catégories :

— glace formée à partir de la neige et ayant emprisonné au moment de sa transformation l'air atmosphérique; dans celle-ci on observe une proportion de CO_2 de 0,028 à 0,030 %, c'est-à-dire une teneur légèrement inférieure à celle de l'atmosphère;

— glace formée dans l'ensemble à partir de la neige mais dont une petite quantité a pour origine de la glace en surfusion constituant des noyaux de cristaux de neige;

— glace formée principalement à partir d'eau de fusion;

— glace formée à partir de la neige mais dont la teneur en CO_2 peut atteindre 0,1 % pour des raisons inconnues.

Parallèlement à ces différents travaux analytiques, Hemmingsen (1959) a étudié la perméabilité de la glace aux gaz en fonction de la température. La glace semble être particulièrement imperméable à l'oxygène. Par contre, pour le gaz carbonique, au voisinage de $0^\circ C$, la perméabilité augmenterait de façon hyperbolique. Les phénomènes de diffusion s'effectueraient donc plutôt à travers les films salins liquides intercrystallins par dissolution des gaz dans cette phase liquide, qu'à travers les espaces intercrystallins eux-mêmes.

3.4.2. Résultats concernant les gaz contenus dans un glacier de Terre Adélie

Notre étude a été effectuée sur un carottage continu de près de 100 m de profondeur, avec des conditions de température *in situ* excluant pratiquement toute fusion et à partir d'échantillons généralement conservés sans carboglace; elle inclut des prélèvements d'air atmosphérique et d'air contenu dans le névé. On observe des variations relatives des teneurs en oxygène, azote et argon beaucoup plus faibles que celles

généralement enregistrées jusqu'à présent. On constate pourtant que :

— les teneurs en azote, excepté dans l'échantillon G1-surface, sont supérieures à la proportion atmosphérique et augmentent avec la profondeur (fig. 3);

— les teneurs en oxygène, excepté dans l'échantillon G1-surface, sont inférieures à la proportion atmosphérique et décroissent avec la profondeur (fig. 3);

— les teneurs en argon sont de l'ordre de la proportion atmosphérique (0,914 %) excepté dans l'échantillon G1-surface (0,935 %) et dans l'échantillon le plus profond (0,905 %).

L'échantillon G1-surface est le seul à présenter une teneur enrichie en oxygène, il est aussi particulièrement riche en argon (0,935 %). Cet enrichissement s'explique du fait que G1 se trouve dans une zone d'ablation soumise à une légère fusion estivale en surface; l'eau de fusion dissout l'oxygène et l'argon atmosphérique préférentiellement à l'azote et lors du regel ces gaz restent occlus sous forme de bulles dans la glace.

Pour interpréter l'appauvrissement régulier de l'oxygène le long du forage G1, on peut envisager les hypothèses suivantes :

a) Processus chimique d'oxydation excluant tout phénomène de décomposition organique, car on n'observe pas d'augmentation parallèle de la teneur en CO_2 . Les poussières contenues dans la glace pourraient bien être oxydées mais une augmentation de leur concentration en fonction de la profondeur semble peu probable. Notons pourtant que deux échantillons de la partie inférieure contiennent de nombreuses inclusions d'origine morainique. Par ailleurs, on a aussi songé à la formation éventuelle d'ozone à partir de l'oxygène; ce phénomène serait dû à de petites étincelles créées dans la glace froide par suite de déformations et frottements (Fisher, 1964). En l'absence de toute mesure, nous ne discuterons pas ces hypothèses.

b) Formation de la glace à une époque d'activité photosynthétique ralentie par suite d'un climat généralement froid; il faudrait alors que depuis la formation de la glace d'origine lointaine (qui pourrait remonter à 50 000 ans; Shumskiy, communication personnelle) la teneur atmosphérique en oxygène ait lentement augmenté jusqu'à la valeur actuelle. Ceci semble aussi peu vraisemblable, la variation du climat n'ayant pas suivi une évolution de sens constant au cours de cette période (Lliboutry, 1964).

c) Diffusion intercrystalline dans une phase liquide; cette hypothèse est contredite par le fait que nous n'observons pas de diminution de la proportion d'argon avec la profondeur (seul l'échantillon le plus bas possède une teneur nettement faible de 0,905 % par rapport à celle dans l'air de référence qui est de 0,914%). De plus, la température dans le forage est comprise entre -11°C en surface et -8°C au fond, valeurs qui sont probablement les plus fortes atteintes par cette glace depuis sa formation. Dans ces conditions, il semble peu probable que puisse exister une phase liquide, l'existence de films intercrystallins étant d'ailleurs actuellement contestée (Lliboutry, 1964).

Aucune des hypothèses précédentes ne semble vraiment satisfaisante. Nous avons alors été amenés à envisager un autre processus physique pouvant altérer la composition gazeuse : la glace, plutôt que de perdre de l'oxygène, fixerait préférentiellement de l'azote par un phénomène d'adsorption.

D'après la théorie de Brunauer, Emmet et Teller (B.E.T.), le volume V de gaz adsorbé à la surface d'un solide est tel que :

$$V = Vm \frac{cP}{(P_0 - P)[1 + (c - 1)P/P_0]}$$

à température constante et pour un gaz donné (Vm est le volume de gaz qui serait adsorbé si toute la surface était recouverte d'une couche monomoléculaire, c est une constante qui dépend de la température et de la nature du gaz, P_0 est la pression de saturation du gaz à la température de l'expérience, P est la pression du gaz).

La formule de B.E.T. permet de tracer les isothermes d'adsorption pour un solide et un gaz donnés si l'on connaît Vm et c . Ces isothermes peuvent être de différents types, mais dans tous les cas, le volume de gaz adsorbé croît avec la pression. Au moment de la formation de la glace, l'azote qui a une pression partielle supérieure à celle de l'oxygène pourrait donc être préférentiellement adsorbé. D'autre part, de façon générale, l'adsorption décroît quand la température s'élève : ainsi plus la température du lieu d'origine de la glace est basse, plus l'adsorption est importante. Pourtant, seule la connaissance de la relation existant entre l'adsorption, la température et la pression peut permettre d'expliquer quantitativement les

variations de concentrations observées pour l'azote et l'oxygène en fonction de la profondeur. A notre connaissance, les isothermes d'adsorption de la glace n'ont pratiquement pas été étudiés à l'exception du travail effectué par Adamson et Dormant (1966) qui concerne l'adsorption d'azote par la glace à 78°K. Si on est réellement en présence d'un phénomène d'adsorption, il n'y a aucune raison d'observer des variations notables des teneurs d'argon et de gaz carbonique puisque leurs pressions partielles sont très faibles. Or, il n'a effectivement pas été possible d'établir une quelconque relation entre les concentrations en argon et en CO₂ et la profondeur (fig. 4). Enfin, nous devons ajouter que la composition des gaz prélevés dans le névé (cf. 3.3.2) est voisine de la composition atmosphérique avec, semble-t-il, une légère augmentation de la teneur en azote par rapport à la valeur moyenne dans l'air. Trois échantillons présentent, en effet, des teneurs supérieures à 78,37 % (A3 N1 : 78,40 %, A3 N2 : 78,39 %, A3 N4 : 78,39 %). En ce lieu dont la température moyenne annuelle est d'environ -15°C, il se pourrait que la composition des gaz contenus dans le névé soit le résultat d'un phénomène sélectif. Là aussi, toute conclusion catégorique nécessiterait naturellement de nouvelles déterminations.

Les teneurs en gaz carbonique sont de l'ordre ou inférieures à la proportion atmosphérique (300 vpm) excepté dans deux échantillons qui ont des teneurs de 760 et 480 vpm; ce sont les seuls prélèvements parmi ceux analysés, à avoir été refroidis à la carboglace. Afin de savoir si les échantillons sont effectivement contaminés dans ce cas, nous avons refroidi quelques carottes en présence de carboglace pendant une durée de l'ordre de 15 jours à un mois; leurs teneurs en CO₂ se sont révélées extrêmement importantes (de l'ordre de 20 %). Ces mesures confirment les observations effectuées par Alder, Geiss, Grogler et Renaud (sous presse) qui montrent que la conservation des échantillons avec la carboglace est un facteur de contamination très important. Les teneurs en CO₂ que nous avons mesurées ne confirment pas les fortes valeurs souvent trouvées dans la glace (cf. 3.4.1 et Langway, Oeschger Alder et Renaud, 1965).

Remerciements

Les travaux sur le terrain ont été réalisés au cours de la 15^e Expédition Antarctique

organisée par les Expéditions Polaires Françaises dans le cadre des Terres Australes et Antarctiques Françaises. Le carottage profond a été réalisé par une équipe composée de MM. Rossello, Bogey, Destruel, Helly et Peillet. Les déterminations de densité et de teneur globale en gaz ont été effectuées en Terre Adélie avec l'aide de M. Destruel et à Paris par MM. Lecomte et Ricoü. La composition des gaz a été étudiée dans les laboratoires du Service des isotopes stables dirigé par M. Roth. Nous en remercions très vivement M. Botter.

Résumé

On a effectué différentes mesures sur des échantillons de glace provenant d'un carottage d'environ 100 m de profondeur réalisé dans la région côtière de Terre Adélie (Antarctique), la température *in situ* étant de l'ordre de -10°C. On constate ainsi que la pression des inclusions en fonction de la profondeur; pour la densité, gazeuses et la densité de la glace augmentent les valeurs croissent de 0,880 g/cm³ jusqu'à 0,918 g/cm³. Parallèlement, la teneur globale en air décroît de 10 cm³/100 g de glace pour les échantillons de surface jusqu'à 6 cm³/100 g vers 80 m de profondeur; plus bas, dans la portion de carottage renfermant des débris morainiques, on atteint des valeurs de l'ordre de 4 cm³/100 g. Enfin, dans la glace bleue se trouvant au contact des sédiments rocheux, la teneur en air devient pratiquement nulle; ceci confirme qu'il s'agit d'une glace de congélation. Les inclusions gazeuses généralement sphériques présentent un net allongement dans les échantillons provenant de profondeurs comprises entre 30 et 50 m environ, ce qui est en accord avec l'apparition, dans le forage, de glace d'origine lointaine déjà caractérisée par sa teneur en deutérium. La teneur globale en gaz dépend du lieu de formation de la glace et la forme des inclusions est liée aux déformations dues aux phénomènes d'écoulement.

Les teneurs en anhydride carbonique et argon des gaz contenus dans la glace sont voisines de celles de l'air atmosphérique; les variations continues qui sont de l'ordre de 1 % observées pour les proportions d'oxygène (décroissance à partir de la surface) et d'azote (croissance à partir de la surface) suggèrent que la composition des gaz contenus dans la glace

pourrait dépendre des conditions de formation de celle-ci, même en l'absence de fusion, par suite de phénomènes d'adsorption. La connaissance des processus fondamentaux pouvant

intervenir dans la formation des inclusions gazeuses est ainsi nécessaire pour pouvoir aborder l'étude de l'atmosphère ancienne à partir des gaz contenus dans la glace.

RÉFÉRENCES

- Adamson, A. W., Dormant, L. M. 1966. Adsorption of nitrogen on ice at 78°K. *J. Am. Chem. Soc.* 88, n° 9, 2055-2057.
- Alder, B., Geiss, J., Grogler, N., Renaud, A. Gas composition in ice samples collected by E. G. I. G. dans Etudes physiques et chimiques sur la glace de l'Inlandsis du Groenland, par A. Renaud, *Medd. om. Grønland* (sous presse).
- Bader, H. 1961. The Greenland ice sheet. CREEL I, B2, 18 p.
- Bader, H. 1965. Theory of densification of dry bubbly glacier ice. CREEL research report 141, 16 p.
- Coachman, L. K., Hemmingsen, E., Scholander, P. F. 1956. Gas enclosure in a temperate glacier. *Tellus* 8, 415-423.
- Coachman, L. K., Enns, T., Scholander, P. F. 1958. Gas loss from a temperate glacier. *Tellus* 10, 493-495.
- Fisher, J. E. 1963. Two tunnels in cold ice at 4000 m on the Breithorn. *J. of Glaciology* 4, 35, 513-520.
- Gow, A. J. 1963. The inner structure of the Ross ice sheet at Little America V, Antarctica, as revealed by deep core drilling. AIHS Berkeley, n° 61, 272-284.
- Gow, A. J. 1964. dans Physical characteristics of the Antarctic Ice sheet (C. R. Bentley, R. L. Cameron, C. Bull, K. Kojima, A. J. Gow) *Antarctic Map Folio Series*, Am. Geogr. Soc.
- Hemmingsen, E. 1959. Permeation of gases through ice. *Tellus* 2, 355-359.
- Langway, C., Jr. 1958. Bubble pressures in Greenland glacier ice. AIHS, Chamonix, n° 47, 336-349.
- Langway, C., Jr. 1962. Some physical and chemical investigations of a 411 meters deep Greenland ice core and their relationship to accumulation. AIHS. Obergurgl, n° 58, 101-118.
- Langway, C. C., Oescher, H., Alder, B., Renaud, A. 1965. Sampling polar ice for radiocarbon dating. *Nature* 206, n° 4983, 500-501.
- Lliboutry, L. 1964. *Traité de glaciologie* (2 tomes). Paris, Masson et Cie.
- Lorius, C., Ricou, G., Rossello, B. 1967. Campagne de forages en Terre Adélie (1964-66). *Soc. Hydr. de France*, séance du 24 février
- Lorius, C. Etude physico-chimique de la glace côtière prélevée par carottage en Antarctique. AIHS, Berne 1967 (à paraître).
- Matsuo, S., Miyake, Y. 1966. Gas composition in ice samples from Antarctica. *Jour. Geophysical Research* 71, n° 22, 5235-5241.
- Mellor, M. 1961. The Antarctic ice sheet. CREEL I, B1, 50 p.
- Mellor, M. 1964. Snow and ice on the earth's surface. CREEL II, C1, 163 p.
- Merlivat, L., Lorius, C., Majzoub, M., Nief, G., Roth, E. Etudes isotopiques en profondeur d'un glacier en Antarctique. Colloque sur l'emploi des radioisotopes en hydrologie. A.I.E.A., Vienne (1966) sous presse.
- Merlivat, L., Lorius, C., Nief, G. 1966. Etude isotopique d'un glacier en Antarctique. *C. R. Acad. Sc. Paris*, 263, 414-416.
- Raynaud, D. 1966. Etude des gaz contenus dans un glacier antarctique. Thèse de 3° cycle, *Faculté des Sciences de l'Université de Paris*, 48 p.
- Scholander, P. F. 1947. Analyses for accurate estimation of respiratory gases in one-half cubic centimeter samples. *J. Biol. Chem.* 167, 235-250.
- Scholander, P. F., Kanwischer, J. W., Nutt, D. C. 1956. Gases in icebergs. *Science* 123, 104-105.
- Scholander, P. F., Hemmingsen, E., Coachman, L. K., Nutt, D. C. 1961. Composition of gas bubbles in Greenland icebergs. *J. of Glaciology*, 3, 29, 813-822.
- Schytt, V. 1958. Glaciology II, *Norwegian-British-Swedish Antarctic Expedition, 1949-52*; Scientific results, 4, 150 p.
- Shumskiy, P. A. 1957. Principes de glaciologie structurale. *Annales du Centre d'Etudes et de Documentation Paléontologiques* n° 22, 309 p.
- Shumskiy, P. A. 1960. Density of glacier ice. *J. of Glaciology* 13, 27, p. 568-573.

ПЛОТНОСТЬ ЛЬДА И ИЗУЧЕНИЕ ГАЗА В ТОЛЩЕ АНТАРКТИЧЕСКОГО
ЛЕДНИКА

Были выполнены различные измерения с образцами льда, добытыми путем бурения с глубин до 100 м в прибрежной части Земли Адели (Антарктика); средняя температура в скважине была приблизительно -10°C . Результаты показывают, что давление в газовых включениях и плотность льда растут с глубиной. Плотность растет от значений $0,880 \text{ г/см}^3$ до $0,918 \text{ г/см}^3$, в то время как полный объем воздуха уменьшается от $10 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ до $6 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ на глубинах порядка 80 м. На больших глубинах в скважине, содержащей моренные остатки, были найдены величины порядка $4 \text{ см}^3/100 \text{ г}$. Наконец, в голубом льду, находящемся в контакте со скальными осадочными породами, объем воздуха становится практически равным нулю; это наблюдение подтверждает, что голубой лед сформировался благодаря вымораживанию. Включения газа, которые обычно имеют сферическую форму, проявляют определенное уплощение в образцах, взятых с глубин приблизительно от 30 до 50 метров. Это находится в соответствии с формой включений

во льду, возникшем вдали от места бурения, что характеризуется содержанием в нем дейтерия. Общий объем газа зависит от места образования льда и форма включений зависит от деформаций, возникающих в процессе передвижения льда.

Концентрации угольного ангидрида и аргона, найденные в газовых включениях, приближаются к их концентрациям в атмосферном воздухе. Устойчивые изменения порядка 1%, найденные для концентрации кислорода (уменьшающейся с глубиной) и для концентрации азота (увеличивающейся с глубиной) указывают на то, что состав газа, содержащегося внутри льда, может зависеть от условий, существовавших во время его образования (даже в отсутствии прямого включения воздуха в состав льда) через явления адсорбции. Таким образом необходимо знать основные процессы при образовании газовых включений, прежде чем предпринимать исследование древней атмосферы путем изучения газовых включений внутри льда.