



HAL
open science

GÉOCHIMIE DES CALOTTES POLAIRES : ASPECTS ATMOSPHÉRIQUES ET CLIMATIQUES

C. Lorius, Robert Delmas

► **To cite this version:**

C. Lorius, Robert Delmas. GÉOCHIMIE DES CALOTTES POLAIRES : ASPECTS ATMOSPHÉRIQUES ET CLIMATIQUES. *Journal de Physique Colloques*, 1975, 36 (C8), pp.C8-37-C8-43. 10.1051/jphyscol:1975807 . jpa-00216427

HAL Id: jpa-00216427

<https://hal.science/jpa-00216427>

Submitted on 4 Feb 2008

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

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

GÉOCHIMIE DES CALOTTES POLAIRES : ASPECTS ATMOSPHÉRIQUES ET CLIMATIQUES

C. LORIUS et R. DELMAS

Laboratoire de Glaciologie
2, rue Très-Cloîtres, 38031 Grenoble Cedex, France

Résumé. — On rappelle sommairement les différentes méthodes utilisées pour la datation des couches de neige et de glace qui constituent les calottes de l'Antarctique et du Groenland. Les variations de composition isotopique (deutérium, oxygène 18) mesurées en profondeur sont un indicateur des variations climatiques (température); elles montrent que la fin de la dernière glaciation s'est produite simultanément dans les deux hémisphères. Les teneurs en gaz de la glace traduisent principalement les variations d'épaisseur des calottes; elles permettent de conclure que les effets isotopiques pour la dernière transition glaciaire-interglaciaire sont très voisins. Dans la neige de l'Antarctique, les teneurs des principaux constituants de l'eau de mer décroissent rapidement vers l'intérieur; en comparaison, les concentrations de l'ensemble des éléments demeurent ensuite relativement constantes et à un niveau très faible. Sur le plateau, on peut approximativement estimer les retombées des différentes origines: elles sont sensiblement équivalentes et de l'ordre de 10 à 20 kg. km⁻². an⁻¹ pour les sources terrigène et marine, et environ 100 fois plus petites pour l'extra-terrestre. Au Groenland, dans les couches récemment déposées, on note pour certains éléments (plomb, soufre) un accroissement sensible des teneurs attribué à l'activité industrielle.

Abstract. — The different methods for dating firn and ice layers which constitute the Antarctic and Greenland ice-caps are summarized. Isotopic (deuterium, oxygen 18) changes with depth are linked with climatic changes (temperature); they show that the end of the last glaciation occurred simultaneously in both hemispheres. The total gas content of the ice is mainly connected with the elevation of the formation site; this allowed to show that the isotopic changes between the glacial and interglacial periods are close for both ice-caps. In Antarctica, trace elements content of marine origin decreases sharply in the coastal area as the distance from the coast increases; inland all contents remain more or less constant around very low values. On the high plateau, fallout from marine and continental origin are comparable and of the order of 10-20 kg. km⁻². a⁻¹; extraterrestrial material fallout is 100 times lower. In Greenland, recent deposits indicate an important increase of the content of some elements (lead, sulphur) ascribed to industrial activity.

Les calottes glaciaires de l'Antarctique et du Groenland sont alimentées de façon continue par les précipitations qui se déposent à leur surface. Avec le temps, la neige se transforme en névé puis en glace mais les températures très généralement en dessous du point de fusion permettent la conservation de la succession non perturbée des strates. Associées à ces couches, on retrouve différentes « impuretés » déposées à partir de l'atmosphère.

La géochimie des calottes polaires s'est principalement développée au cours des dernières années, en liaison avec les possibilités d'exploration en surface, la mise au point d'appareils de prélèvements en profondeur utilisables dans la glace et le progrès des techniques de mesure. Les travaux poursuivis visent à déterminer la distribution géographique actuelle et les variations temporelles des paramètres géochimiques caractérisant la glace et les impuretés qu'elle renferme.

Les informations ainsi obtenues permettent une meilleure connaissance du bilan de masse et de l'évolution des calottes glaciaires, évolution qu'on sait étroitement associée (soit comme effet, soit peut-être comme cause) à l'histoire du climat terrestre. Mais nous nous intéresserons ici à un autre aspect, à savoir d'illustrer à partir de quelques exemples les apports directs de l'étude des dépôts à la reconstruction des variations climatiques et de certains paramètres géochimiques qui y sont liés.

1. **L'origine et l'âge des dépôts.** — En même temps qu'elles s'enfoncent, les couches de neige et de glace s'écoulent vers les bords de la calotte, la composante horizontale de la vitesse étant perpendiculaire aux courbes de niveau superficielles. L'âge des couches croît avec la profondeur et si l'on rencontre en surface des dépôts formés localement, les couches profondes proviennent de sites de plus en plus lointains situés en amont du lieu de prélèvement (Fig. 1, d'après [1]).

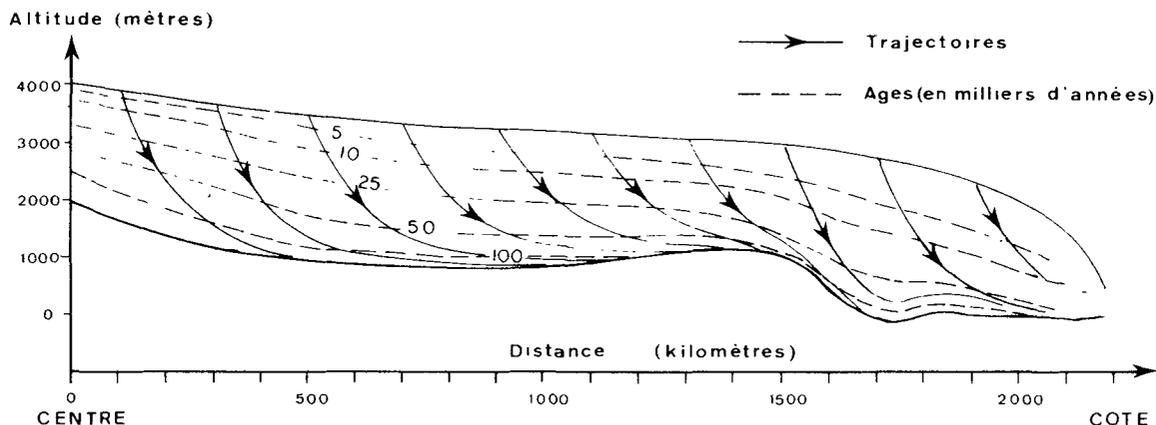


FIG. 1. — Trajectoires et isochrones de la glace (Antarctique), d'après [1].

Il s'agit donc de caractériser chaque couche étudiée par deux informations : site de formation et âge. Nous ne discuterons pas ici le premier aspect, les interprétations développées plus loin provenant de sites situés dans des régions centrales où les variations d'origine en fonction de la profondeur sont peu importantes.

Pour établir la chronologie des dépôts on peut utiliser les variations périodiques de certains paramètres; mais les différences de propriétés (stratigraphie) qui caractérisent les couches annuelles s'estompent rapidement avec la profondeur et ne sont utilisables que dans le cas d'une accumulation relativement importante et régulièrement distribuée dans le temps. Lorsque de telles conditions sont réunies, il est plus intéressant (malgré le nombre de mesures nécessaires) de suivre les variations saisonnières de composition isotopique (deuterium ou oxygène 18) qui ne disparaissent sous l'influence de différents facteurs (échanges en phase vapeur dans le névé, diffusion moléculaire dans la glace accentuée en profondeur par l'amincissement des couches) qu'après plusieurs milliers d'années [2].

Mais cette technique n'est pas applicable dans les zones à faible accumulation, et donc en particulier dans un large secteur de l'Antarctique, et pour les couches superficielles, la méthode la plus générale et la plus sûre consiste à repérer les horizons radioactifs nettement marqués qui se sont formés à la suite des explosions nucléaires. On mesure pour cela l'activité β globale [3] ou les teneurs en certains radioéléments; dans de bonnes conditions, on peut caractériser les différentes couches annuelles et obtenir une chronologie continue [4, 5]. La mesure des teneurs en tritium montre ainsi que le calendrier des explosions nucléaires est fidèlement enregistré dans les couches de neige du Groenland (Fig. 2, d'après [4]). Les repères 1, 2 et 3 indiquent successivement la suspension des essais nucléaires (novembre 1958), la reprise des explosions (novembre 1961) et enfin l'arrêt des tests importants après 1963. Cette méthode couvre les 20 dernières années et pour obtenir une datation moyenne à l'échelle du siècle on préfère généralement

mesurer la décroissance de l'activité spécifique du plomb 210 (origine naturelle T de l'ordre de 22 ans) (Fig. 3, d'après [6]), plutôt que celle du tritium naturel ($T = 12,3$ ans).

Au-delà, il faut avoir recours à des radioisotopes de périodes plus longues [7] pour lesquels on a besoin de quantités importantes d'échantillons que l'on

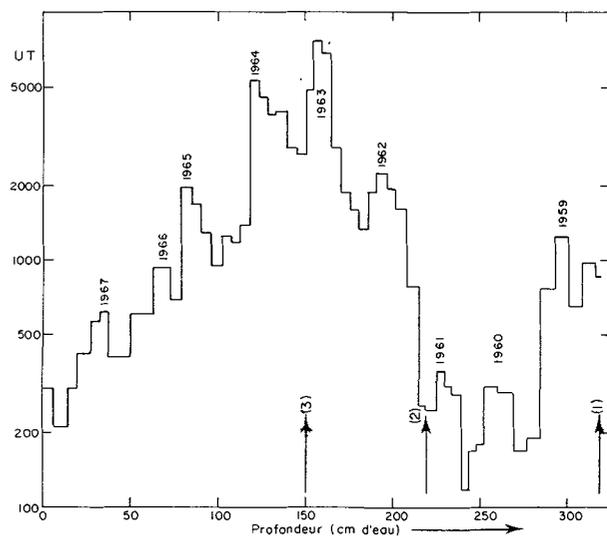


FIG. 2. — Station Centrale (Groenland). Teneur en tritium en fonction de la profondeur. D'après [4].

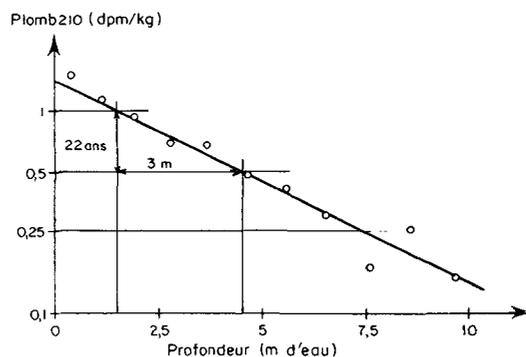


FIG. 3. — Station A5 (Antarctique). Datation par le plomb 210. D'après [6].

obtient par fusion de la glace *in situ*. Différents travaux portent actuellement sur le développement de méthodes difficiles à mettre en œuvre, utilisant le silicium 32 (T probable = 280 ans, quantité nécessaire : 1 t) et l'argon 39 (T = 270 ans, quantité nécessaire : 5 t) pour des datations allant jusqu'à 1 500 ans, ainsi que le carbone 14 (T = 5 730 ans, quantité nécessaire de 1 à 5 t) à partir duquel on devrait pouvoir obtenir des résultats jusqu'à 25 000 ans. Il faudra sans doute attendre de nombreuses années pour que des méthodes basées sur des radioisotopes cosmogéniques (chlore 36, krypton 81) permettent d'étendre l'échelle de temps couverte.

Actuellement, la datation des couches profondes n'est possible qu'à partir de modèles d'écoulement de la glace [8], lesquels sont basés sur un certain nombre d'hypothèses (état d'équilibre, accumulation et température constantes) d'autant plus incertaines que l'on remonte dans le temps. Les lois de déformation de la glace dépendent en outre de nombreux facteurs mal connus (structure et orientation des cristaux, teneurs en impuretés...) et principalement de la température. On dispose de peu d'informations en profondeur et notamment dans la couche basale, alors que les résultats obtenus sont très différents suivant que la glace se trouve ou non à son point de fusion au contact du socle rocheux. Si l'on peut estimer que l'âge des couches de glace dépasse vraisemblablement plusieurs centaines de milliers d'années (Fig. 1), en particulier dans l'Antarctique, on ne peut établir une chronologie raisonnable des couches anciennes que dans certains sites favorables (parties centrales, socle rocheux régulier...).

On sait donc bien dater les dépôts récents (1 siècle) et, sauf lorsque les variations saisonnières de composition isotopique sont conservées, on ne dispose que de ces seules informations pour estimer la chronologie des couches plus profondes à partir des lois de déformation de la glace, avec une précision qui devient (même dans des conditions glaciologiques favorables) incertaine au-delà de la dizaine de milliers d'années. Il apparaît pourtant que le développement de modèles d'écoulement *calés* sur certaines valeurs déterminées de façon indépendante (par des méthodes radioactives ou par repérage d'événements caractéristiques, et par exemple climatiques, dont l'âge est connu, ou enfin à partir de phénomènes périodiques naturels) devrait prochainement permettre une description chronologique satisfaisante des calottes polaires.

2. La composition isotopique de la glace en tant que témoin du climat. — La composition isotopique (δD ‰ ou δO ‰) des précipitations est influencée par de nombreux paramètres atmosphériques liés à l'origine et à l'histoire thermodynamique des masses d'air et en particulier par la différence entre la température de condensation en un site donné et celle du début des processus de précipitation [2, 9]. Empiriquement, il a été possible de déterminer aussi bien au Groenland [2] que dans certains secteurs de l'Antarctique (Fig. 4, d'après [10]) une relation pratiquement linéaire entre les teneurs isotopiques moyennes déterminées dans les couches de neige récentes et les températures moyennes annuelles mesurées à une dizaine de mètres de profondeur. Considérations théoriques et relations empiriques conduisent ainsi

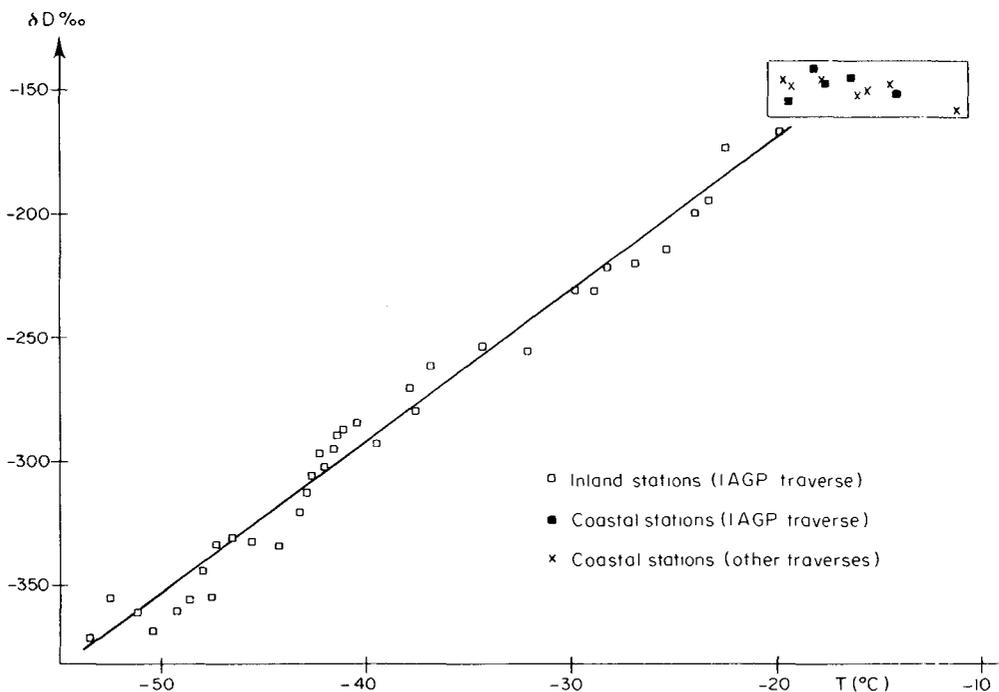


FIG. 4. — Teneurs superficielles moyennes en deutérium en fonction de la température (Antarctique). D'après [10].

à penser que la teneur en deutérium ou oxygène 18 mesurée en profondeur dans la glace est un indicateur des variations du climat terrestre.

Les résultats obtenus à Camp Century (Groenland) sont très largement connus [11] : ils représentent avec une très grande finesse un enregistrement climatique couvrant plus de 100 000 ans, dans lequel on retrouve toutes les principales fluctuations établies à partir d'autres études paléoclimatiques. Sur la figure 5 (d'après [11]), sont indiqués les âges obtenus à partir d'un modèle d'écoulement de la glace (échelle de gauche); en supposant la constance des périodes observées pour les variations isotopiques dans les couches supérieures dont la datation est relativement sûre, il a été possible d'obtenir une chronologie corrigée (échelle de droite).

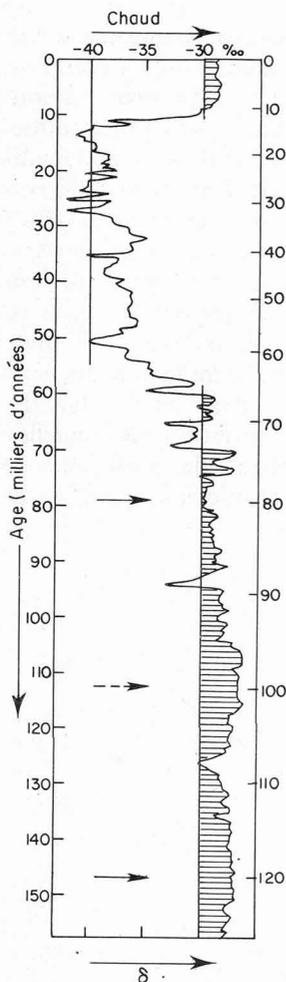


FIG. 5. — Camp Century (Groenland). Profil isotopique en fonction de l'âge. D'après [11].

On dispose maintenant de résultats provenant de deux carottages profonds réalisés dans l'Antarctique. Les conditions glaciologiques plus compliquées dans la région de Byrd et les informations trop fragmentaires provenant de Vostok ne permettent pas une reconstitution aussi fine du climat. Il apparaît néanmoins que les événements climatiques majeurs se

traduisent dans les différents profils isotopiques et que la transition glaciaire (Wisconsin)-interglaciaire (Holocène) s'est produite de façon simultanée dans les hautes latitudes des deux hémisphères (Fig. 6, d'après [12]).

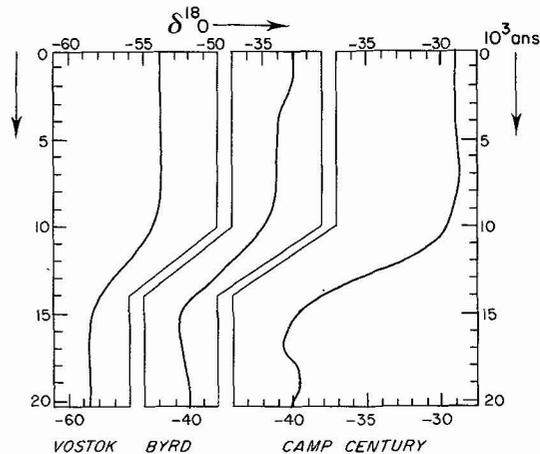


Fig. 6. — Profils isotopiques moyens depuis 20 000 ans. D'après [12].

On ne peut cependant convertir sans précaution les variations isotopiques observées en termes de température. Les relations actuellement établies en surface sont de l'ordre de $\delta O = 0,6 \text{ ‰}/^{\circ}\text{C}$ soit $\delta D = 5 \text{ ‰}/^{\circ}\text{C}$ au Groenland et de $\delta D = 6 \text{ ‰}/^{\circ}\text{C}$ soit $\delta O = 0,75 \text{ ‰}/^{\circ}\text{C}$ en Antarctique; mais on sait par exemple que cette relation établie dans un secteur de l'Antarctique ne peut se généraliser à l'ensemble du continent [13]. Les distributions isotopiques actuellement observées ont de plus pu être différentes dans d'autres conditions climatiques qui ont entraîné des variations de la composition isotopique de l'eau de mer, de la circulation atmosphérique, de l'importance relative des précipitations d'été et d'hiver, de l'écoulement de la glace et de l'altitude de la surface de la calotte. Il faut en particulier noter que les variations isotopiques entre période glaciaire et interglaciaire observées au Groenland ($\delta O = 11 \text{ ‰}$) sont nettement plus élevées que celles mesurées dans l'Antarctique (5 à 6 ‰). Cela est d'autant plus surprenant que ces variations sont elles aussi plus faibles [14] dans un forage réalisé à Devon Island, à 600 km de Camp Century, de l'autre côté de la mer de Baffin.

On a pu expliquer récemment de telles différences en mesurant les quantités de gaz contenues dans la glace [15]. Dans les glaciers froids, on constate que la densité de la glace au moment où elle se forme (*close-off*) est sensiblement constante ($\rho_c = 0,825$), ce qui implique un volume occupé par les occlusions gazeuses constant. Le volume de gaz (ramené aux conditions normales) dépend donc de la température et principalement de la pression (directement liée à l'altitude) du site de formation. A Camp Century (Fig. 7, d'après [15]), les volumes de gaz mesurés dans la glace formée au cours du Wisconsin sont en

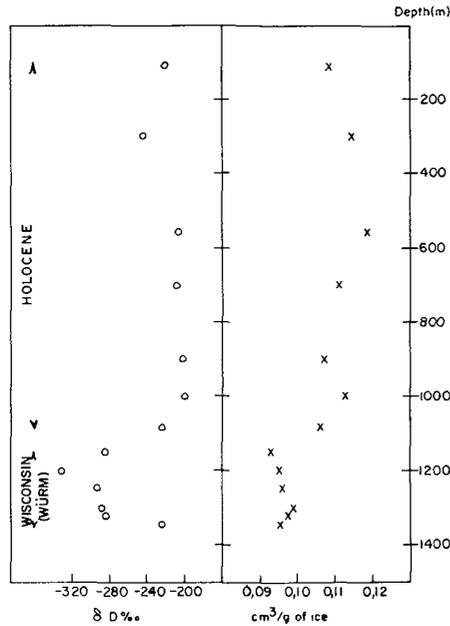


FIG. 7. — Camp Century (Groenland). Profil des teneurs en gaz. D'après [15].

moyenne de 12 % inférieurs à ceux mesurés dans la glace de l'Holocène, ce qui a conduit à proposer une variation d'épaisseur de la calotte de l'ordre de 1 000 m à Camp Century entre ces deux périodes. Les variations isotopiques observées en profondeur à cette station seraient alors dues pour plus de la moitié à cet effet d'altitude, le reste étant lié à une variation du climat.

Les lois d'écoulement de la glace, conditionnées par ses propriétés mécaniques, conduisent à admettre que le profil de surface d'une calotte est déterminé par les dimensions de sa base. Dans le cas de l'Antarctique et du Groenland cette limite est fixée par le plateau continental et l'on admet en général que ces deux formations n'ont pas varié sensiblement en surface et très peu en ce qui concerne l'altitude des régions centrales. Ceci est confirmé par le fait que les volumes de gaz mesurés en profondeur dans les deux forages de l'Antarctique ne montrent pas de variation systématique. Mais il semble [14] que la glace du Groenland Nord-Ouest ait fusionné lors de la dernière glaciation avec celle recouvrant Ellesmere Island, ce qui effectivement a pu entraîner une augmentation sensible des épaisseurs de glace à Camp Century. A la fin de la glaciation la remontée du niveau des mers a conduit, par suite de l'envahissement du chenal séparant Ellesmere Island du Groenland, à une brutale diminution de l'épaisseur de glace à Camp Century [2].

Il semble donc que les variations isotopiques observées dans les régions de haute latitude des hémisphères Nord et Sud aient été non seulement simultanées mais voisines en amplitude.

3. Les teneurs en éléments traces. — Les couches de neige successivement déposées renferment, à l'état de traces, certaines impuretés. Il est actuellement possible de donner une première image de la distri-

bution des teneurs dans les couches superficielles. Il semble ainsi que dans l'Antarctique, les concentrations mesurées décroissent (notamment pour les éléments dont on pense qu'ils sont d'origine marine) rapidement dans une bande côtière de quelques dizaines de km, jusqu'à une altitude de la surface de l'ordre de 1 000 m [16]. Les teneurs en chlore (qui est un élément très abondant) décroissent ainsi de 700 à 100 µg/kg de neige (Fig. 8); en comparaison, les concentrations mesurées sur le plateau demeurent sensiblement constantes (moins de 0,05 µg/kg pour le manganèse dont on peut penser qu'il est principalement terrigène [17]).

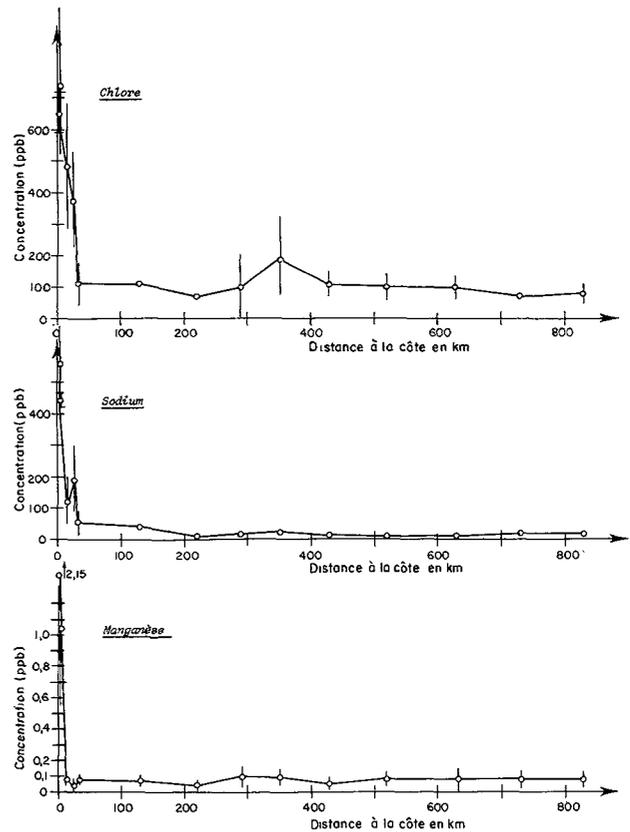


FIG. 8. — Concentrations en fonction de la distance à la côte (Antarctique). D'après [16].

Actuellement, la détermination de l'origine de ces éléments traces s'effectue essentiellement par comparaison des rapports de concentration mesurés dans la neige avec ceux existant en moyenne dans les différentes sources : croûte terrestre, océans, matière extra-terrestre. Il s'agit en fait d'une approche qui souffre de nombreuses limitations : composition complexe des aérosols terrigènes liée aux différents types de roches et sols, existence de phénomènes de fractionnement lors des processus d'érosion ou du passage dans l'atmosphère [18]. Ceci est particulièrement sensible pour les aérosols d'origine marine [19]. Si le rapport Cl/Na est de 1,8 dans les neiges à forte concentration des régions côtières de l'Antarctique,

il devient ensuite généralement plus élevé. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'après dépôt des *gros* aérosols marins les retombées présentent un caractère fractionné par rapport à l'eau de mer ; il semble en particulier dans ce cas que les fortes valeurs du rapport Cl/Na mesurées dans les régions centrales soient liées à l'existence d'un chlore gazeux [16].

Compte tenu de ces réserves et de la faible densité du réseau des stations échantillonnées on ne peut donner qu'une estimation approximative des retombées par source ; il est pour cela nécessaire de considérer séparément une zone côtière (correspondant à une profondeur d'environ 50 km) dans laquelle l'apport océanique est abondant ($180 \text{ kg.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ [20]) et l'apport terrigène fonction notamment des formations rocheuses existant localement. Sur le plateau antarctique, les retombées marines et terrigènes semblent sensiblement équivalentes (et de l'ordre de 10 à $20 \text{ kg.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ [20, 21]), ce qui donne une idée du *bruit de fond* existant vraisemblablement sur l'ensemble de la terre. La contribution extra-terrestre a pu être estimée à partir de la mesure des teneurs en ^{53}Mn (radioisotope caractéristique de cette matière) : $0,25 \text{ kg.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ [22].

Même s'il est difficile d'établir une relation quantitative entre les teneurs en éléments traces mesurées dans la neige et l'atmosphère, il est probable que certaines variations significatives observées dans la glace soient liées aux teneurs atmosphériques. On a ainsi constaté que les teneurs en éléments traces (Fig. 9, d'après [23]) et particules [24] dans la glace formée au cours de la dernière glaciation (et en particulier dans sa dernière phase) étaient sensiblement plus élevées que dans les interglaciaires, cet effet étant plus sensible au Groenland que dans l'Antarctique. A Camp Century [23], les concentrations en silicium indiquent pendant cette période un accroissement sensible des poussières terrigènes peut-être lié à un

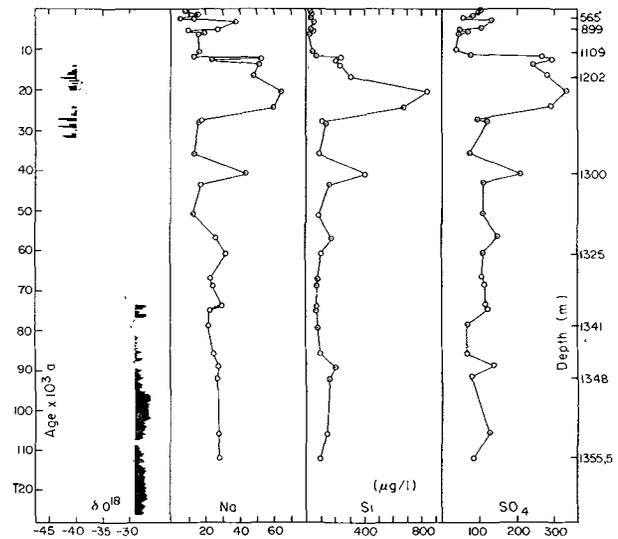


FIG. 9. — Camp Century (Groenland). Profil des teneurs en éléments traces. D'après [23].

renforcement de la circulation atmosphérique. Mise à part la dernière partie de la glaciation, les teneurs relativement stables en sulfates suggèrent que le déclenchement du refroidissement n'est pas dû à une activité volcanique particulièrement importante.

Plus récemment, on observe dans les couches de neige déposées au Groenland une augmentation sensible des teneurs d'éléments considérés comme polluants (Fig. 10, d'après [25, 27, 28]). Par rapport à la ligne de base, les concentrations peuvent être multipliées jusqu'à plus de 10 fois pour le plomb [25, 26], de l'ordre de 3 fois pour les sulfates [26, 27]. Ces effets sont attribués respectivement au plomb tétraéthyle contenu dans l'essence et à la combustion des carburants fossiles. Les résultats sont moins homogènes pour le mercure, puisque, à côté de valeurs fortes [28], les teneurs des couches récentes déposées

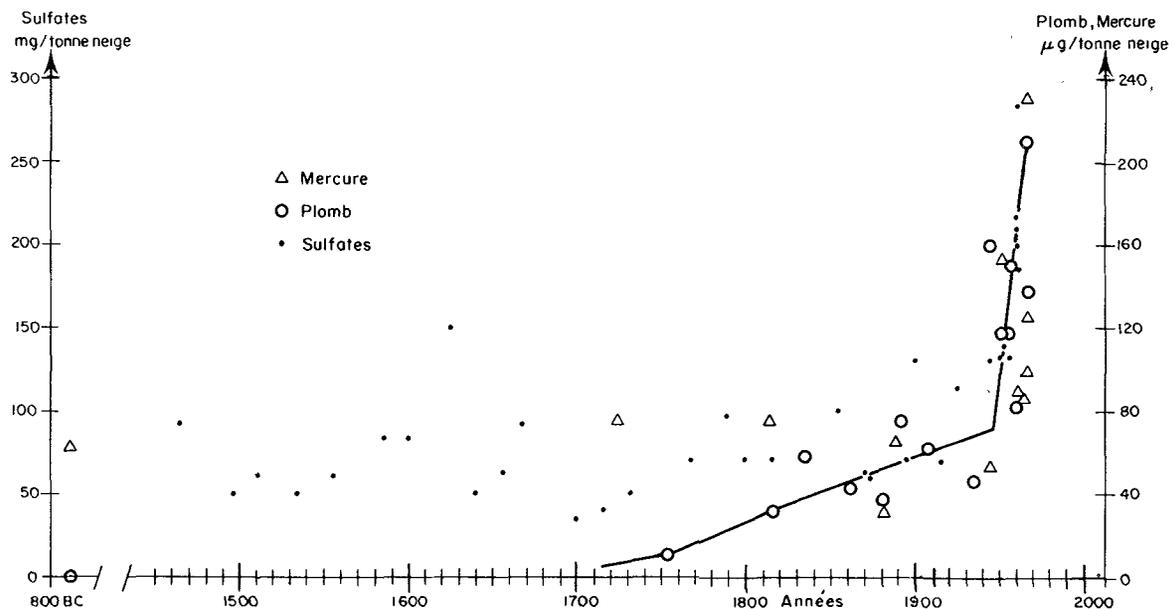


FIG. 10. — Camp Century (Groenland). Profil des teneurs en plomb (d'après [25]), sulfates (d'après [27]) et mercure (d'après [28]).

dans d'autres sites ne montrent aucun accroissement notable par rapport au niveau naturel [29].

Les teneurs en éléments polluants demeurent quantitativement peu importantes par rapport aux éléments d'origine naturelle; il n'en est pas de même pour les sulfates dont les concentrations qui sont de l'ordre de 200 µg/kg de neige (cette valeur inclut la contribution naturelle due aux gaz volcaniques et à l'oxydation de H₂S provenant des décompositions organiques) en font une des *impuretés* les plus abondantes dans la neige.

4. Conclusion. — Les calottes polaires constituent un outil potentiel d'étude des phénomènes atmosphériques au cours des dernières centaines de milliers d'années, d'une façon d'autant plus détaillée que les couches sont plus récentes. Elles permettent en particulier une reconstitution des variations climatiques terrestres et de certains paramètres qui y sont associés : températures; précipitations, volume des glaces, teneurs en éléments traces; loin des sources locales de contamination, elles ont enregistré certaines variations atmosphériques liées à l'activité humaine.

Bibliographie

- [1] BUDD, W. F., JENSSEN, D., RADOK, U., *Meteorology Department*, Melbourne **18** (1971).
- [2] DANSGAARD, W., JOHNSEN, S. J., CLAUSEN, H. B., GUNDESTRUP, N., *Medd. Groenl.* **197** (1973).
- [3] PICCIOTTO, E., CROZAZ, G., DE BREUCK, W., *Antarct. Res. Ser.* **16** (1971) 257.
- [4] MERLIVAT, L., RAVOIRE, J., VERGNAUD, J. P., LORius, C., *Earth Planet. Sci. Lett.* **19** (1973) 235.
- [5] LAMBERT, G., ARDOUIN, B., SANAK, J., LORius, C., POURCHET, M., *UGGI* 1975 à paraître.
- [6] NEZAMI, M., LAMBERT, G., LORius, C., LABEYRIE, J., *C. R. Hebd. Séan. Acad. Sci.* **259** (1964) 3319.
- [7] DANSGAARD, W., OESCHGER, H., *Geopaedia*, à paraître.
- [8] LLIBOUTRY, L., *Traité de Glaciologie* (Masson) 1965, Tome 2.
- [9] MERLIVAT, L., *J. Physique Colloq.* **36** (1975) C 8-11.
- [10] LORius, C., MERLIVAT, L., *UGGI* 1975 à paraître.
- [11] DANSGAARD, W., JOHNSEN, S. J., CLAUSEN, H. B., LANGWAY, C. C., *Late Cenozoic Ice Ages* (Yale University Press) 1971, 37.
- [12] BARKOV, N., GORDIENKO, F., KOROTKEVICH, E., KOTLYAKOV, V., *Sov. Antarct. Exped. Inf. Bull.* **90** (1975) 39.
- [13] LORius, C., *Cambridge Workshop on Isotopic and temperature profiles in ice-sheets* (1974) à paraître.
- [14] PATERSON, S., *Cambridge Workshop on Isotopic and temperature profiles in ice-sheets* (1974) à paraître.
- [15] RAYNAUD, D., LORius, C., *Nature* **5405** (1973) 283.
- [16] BRIAT, M., BOUTRON, C., LORius, C., *Symp. Int. échanges océan-atmosphère de matière à l'état particulière* (1973) à paraître.
- [17] BOUTRON, C., ECHEVIN, M., LORius, C., *Geochim. Cosmochim. Acta* **36** (1972) 1029.
- [18] DUCE, R. A., HOFFMANN, G. L., ZOLLER, W. H., *Science* **187** (1975) 59.
- [19] CHESSELET, R.
- [20] BRIAT, M., Thèse 3^e cycle, Laboratoire de Glaciologie 166 (1974).
- [21] VOSTERS, M., Thèse, Univ. Libre Bruxelles (1971).
- [22] BIBRON, R., CHESSELET, R., CROZAZ, G., LEGER, G., MENNESSIER, J. P., PICCIOTTO, E., *Earth Planet. Sci. Lett.* **21** (1974) 109.
- [23] CRAGIN, J. H., HERRON, M. M., LANGWAY, C. C., KLOUDA, G., SCOR-SCAR Polar Oceans Conference (1974) à paraître.
- [24] THOMPSON, L. G., HAMILTON, W. L., BULL, C., *Antarct. J. VIII* (1973) 340.
- [25] MUROZUMI, M., CHOW, T. J., PATTERSON, C., *Geochim. Cosmochim. Acta* **33** (1969) 1247.
- [26] CRAGIN, J. H., HERRON, M. M., LANGWAY, C. C., *Symp. Int. échanges océan-atmosphère de matière à l'état particulière* (1973) à paraître.
- [27] KOIDE, M., GOLDBERG, E. D., *J. Geophys. Res.* **76** (1971) 6589.
- [28] WEISS, H., KOIDE, M., GOLDBERG, E. D., *Science* **174** (1971) 692.
- [29] WEISS, H., BERTINE, K., KOIDE, M., GOLDBERG, E. D., *Geochim. Cosmochim. Acta* **39** (1975) 1.