



HAL
open science

Le deutérium, possibilités d'application aux problèmes de recherche concernant la neige, le névé et la glace dans l'Antarctique

Claude Lorius

► **To cite this version:**

Claude Lorius. Le deutérium, possibilités d'application aux problèmes de recherche concernant la neige, le névé et la glace dans l'Antarctique. Géochimie. Université de Paris, 1963. Français. NNT : . tel-00926566

HAL Id: tel-00926566

<https://theses.hal.science/tel-00926566>

Submitted on 9 Jan 2014

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

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

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

le Grade de Docteur ès Sciences Physiques

PAR

CLAUDE LORIUS

PREMIÈRE THÈSE

LE DEUTERIUM

*Possibilités d'application aux problèmes de recherche
concernant la neige, le névé et la glace dans l'Antarctique*

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

Soutenues le 21 Novembre 1963 devant la Commission d'examen

MM. COULOMB	<i>Président</i>
QUENEY	} <i>Examineurs</i>
LABEYRIE	
ROTH	<i>Membre invité</i>

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE I

LES ISOTOPIES STABLES — LE DEUTÉRIUM

1.1.	— EXISTENCE DU DEUTÉRIUM DANS LA NATURE — SON CYCLE	1
1.2.	— FRACTIONNEMENT ISOTOPIQUE NATUREL DANS LE CYCLE DE L'EAU.	1
1.2.1.	Facteurs de séparation.	2
1.2.2.	Différents modes possibles de fractionnement lors de la formation de la neige..	2
1.2.3.	Représentation schématique du fractionnement lors de la formation de la neige..	4
1.2.4.	Généralités sur la comparaison des variations de concentration du deutérium et de l'oxygène 18.. .. .	5
1.3.	— MESURE DES CONCENTRATIONS — PRÉLÈVEMENT ET CONSERVATION DES ÉCHANTILLONS ..	6
1.3.1.	Technique de mesure.. .. .	6
1.3.2.	Comparaison des différentes échelles utilisées pour le deutérium	6
1.3.3.	Comparaison avec les échelles utilisées pour l'oxygène 18.	7
1.3.4.	Prélèvement et conservation des échantillons.	7

CHAPITRE II

TENEUR EN DEUTÉRIUM DES PRÉCIPITATIONS SOUS FORME DE NEIGE

2.1.	— VARIATION DE LA CONCENTRATION EN FONCTION DES SAISONS.	9
2.1.1.	Échantillons	9
2.1.2.	Étude de la variation saisonnière	9
2.2.	— VARIATION DE LA STRUCTURE THERMIQUE DE LA TROPOSPHÈRE ANTARCTIQUE EN FONCTION DES SAISONS.	10
2.2.1.	Radiosondages moyens mensuels	10
2.2.2.	Radiosondages dans le cas de précipitations	10
2.3.	— RELATION ENTRE LA TENEUR EN DEUTÉRIUM ET LA STRUCTURE DE LA TROPOSPHÈRE.. ..	11
2.3.1.	Conditions limitatives.. .. .	11
2.3.2.	Variation comparée de la teneur isotopique et de la température à 850 mb.. ..	12
2.4.	— RELATION ENTRE LA TENEUR EN DEUTÉRIUM ET LA TEMPÉRATURE DANS LES NUAGES.. ..	12
2.4.1.	Utilisation des radiosondages	12
2.4.2.	Relation entre la teneur isotopique et la température dans les nuages.. .. .	12

CHAPITRE III

MESURE DE L'ACCUMULATION DE LA NEIGE

DATATION SAISONNIÈRE DES COUCHES DE NÉVÉ PAR LE DEUTÉRIUM

3.1.	— MÉTHODES DE MESURE DE L'ACCUMULATION.	15
3.1.1.	Utilisation des repères.	15
3.1.2.	Étude stratigraphique des couches de névé.. .. .	15
3.2.	— DATATION DES COUCHES DE NÉVÉ PAR LE DEUTÉRIUM	16
3.3.	— DÉTERMINATION DE L'ACCUMULATION : COMPARAISON DES RÉSULTATS OBTENUS A PARTIR DES DIFFÉRENTES MÉTHODES	17
3.3.1.	Stations d'études.. .. .	17
3.3.2.	Station A 3 (B 1).. .. .	17
3.3.3.	Station A 28 (B 7).	19
3.3.4.	Station B 61.. .. .	20
3.3.5.	Station NZGS 15.. .. .	20
3.3.6.	Station NZGS 16.. .. .	21

3.4. — VALIDITÉ DES DIFFÉRENTES MÉTHODES POUR LA DÉTERMINATION DE L'ACCUMULATION DE LA NEIGE	21
3.4.1. Principes	22
3.4.2. Répartition irrégulière de l'accumulation	22
3.4.3. Chasse-neige	23
3.4.4. Fusion	23
3.4.5. Autres formes de précipitations	23
3.4.6. Conclusion	23

CHAPITRE IV

RELATION ENTRE LES TEMPÉRATURES MOYENNES ANNUELLES AU SOL ET LES CONCENTRATIONS ISOTOPIQUES

4.1. — PRÉLÈVEMENTS	25
4.2. — VARIATION GÉOGRAPHIQUE	25
4.3. — RELATION ENTRE LES TEMPÉRATURES MOYENNES ANNUELLES AU SOL ET LES CONCENTRATIONS ISOTOPIQUES	26
4.3.1. Mesure des températures	26
4.3.2. Relation avec la concentration isotopique	26
4.4. — COMPARAISON DES RÉSULTATS OBTENUS DANS LES RÉGIONS POLAIRES	27
4.4.1. Antarctique	27
4.4.2. Groënland	27
4.5. — INFLUENCE DE LA RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE DE L'ACCUMULATION	28

CHAPITRE V

CARACTÉRISATION DE LA GLACE À PARTIR DU DEUTÉRIUM

5.1. — ÉTUDE DE LA GLACE DANS LA RÉGION CÔTIÈRE DE TERRE ADÉLIE	29
5.1.1. Description de la côte	29
5.1.2. Stations d'étude	29
5.1.3. Observations	30
5.2. — TENEUR EN DEUTÉRIUM DE LA GLACE	30
5.2.1. Résultats de la première série de prélèvements	30
5.2.2. Résultats de la deuxième série de prélèvements	30
5.3. — DÉTERMINATION DE L'ORIGINE DE LA GLACE CÔTIÈRE	31
5.3.1. Définition du bassin d'écoulement	31
5.3.2. Détermination de l'origine de la glace	31
5.4. — DONNÉES SUR L'ÉCOULEMENT DE LA GLACE EN TERRE ADÉLIE	32

CHAPITRE VI

L'UTILISATION DES ISOTOPES STABLES EN GLACIOLOGIE

6.1. — ÉTUDE DU BILAN DE MASSE ET DE SON ÉVOLUTION	35
6.2. — ÉTUDE DES VARIATIONS CLIMATIQUES	36
LISTE DES RÉFÉRENCES	39
LISTE DES TABLEAUX (1 à 26)	43
LISTE DES FIGURES (1 à 51)	73

AVANT-PROPOS

Les programmes de Recherche Scientifique en Terre Adélie sont élaborés par le Comité National Français des Recherches Antarctiques présidé par Monsieur l'Ingénieur Général G. LACLAVERÈ. Ils sont réalisés sur le terrain par les Expéditions Polaires Françaises, dont le Directeur est Monsieur P. E. VICTOR, dans le cadre des Terres Australes et Antarctiques Françaises administrées par Monsieur l'Administrateur Supérieur P. ROLLAND.

Le dépouillement des observations a été effectué au Laboratoire de Géologie du Collège de France dont la direction est assurée, depuis le décès de Monsieur le Professeur P. FALLOT, par Monsieur G. DUBOURDIEU. Sur le plan scientifique, ces travaux ont été dirigés par Monsieur le Professeur J. COULOMB, Membre de l'Institut, Monsieur le Professeur P. QUENEY et Monsieur J. LABEYRIE sous-directeur du Centre des faibles radioactivités.

Il nous est particulièrement agréable de remercier ici ces personnalités qui ont permis et favorisé le développement des études glaciologiques et de leur exprimer notre respectueuse reconnaissance.

C'est pour nous un devoir de dire que ce travail n'aurait pas été possible sans l'intérêt, l'aide constante et la compréhension de Messieurs E. ROTH et G. NIEF, grâce à qui des milliers d'analyses ont pu être effectuées au Laboratoire des Isotopes Stables de Saclay ; qu'ils veuillent bien trouver ici l'expression de notre gratitude.

C'est enfin à mes camarades qui ont participé à la réalisation du travail sur le terrain et à Paris que vont mes remerciements.

Les différentes observations et les échantillons qui ont servi de base à ce travail ont été recueillis au cours de différentes expéditions :

— en 1959-1960, au cours d'un raid en Terre de Victoria dans le cadre du programme de recherches antarctiques des États-Unis ;

— en 1961 et 1962, en Terre Adélie, à la Base Dumont d'Urville et au cours de raids sur le plateau antarctique.

INTRODUCTION

Depuis quelques années, l'utilisation des variations naturelles des proportions des isotopes dans les éléments s'est multipliée dans de nombreux domaines et en particulier dans celui de la Glaciologie, ouvrant un champ d'investigation nouveau.

Dans cette branche, les régions polaires et notamment l'Antarctique tiennent une place prépondérante qui s'explique aisément :

— par leur étendue et leur volume :

la répartition actuelle des surfaces et des volumes de glace est en effet la suivante (1) (A. BAUER, 1961):

Antarctique	: 12,8 . 10 ⁶ km ²	29,5 . 10 ⁶ km ³
Inlandsis Groenlandais	: 1,7 . »	2,6 . »
Autres Glaciers	0,5 . »	0,2 . »

99 % des glaces sont donc concentrés dans les Inlandsis polaires dont 91 % dans le seul Antarctique ; leur bilan de masse et leurs conditions d'équilibre thermique influencent l'ensemble de notre globe ;

— par leur intérêt :

en l'absence de fusion, les couches de neige qui se superposent jusqu'à atteindre une épaisseur de 4.000 m constituent des archives précieuses pour l'histoire de notre globe et son évolution (circulation atmosphérique, climatologie, retombées d'origine naturelle et artificielle) ;

— par leur position privilégiée :

l'Antarctique est éloigné des zones de l'activité industrielle humaine (source de pollution) et de production de produits artificiels (explosions nucléaires) ce qui permet d'étudier certains phénomènes naturels dans des conditions relativement pures. La proximité de la zone aurorale est en outre intéressante pour l'analyse de la radioactivité liée au rayonnement cosmique.

L'utilisation des isotopes dans le domaine de la glace peut apporter une contribution appréciable à l'étude de différents phénomènes concernant la météorologie, la climatologie, la haute atmosphère, l'océanographie par exemple ; mais les recherches à caractère purement glaciologique se développent actuellement autour de deux problèmes fondamentaux pour l'étude desquels les méthodes classiques semblent insuffisantes : la dynamique des inlandsis et l'accumulation de la neige.

La connaissance de la dynamique des inlandsis est basée sur des mesures de déplacement faites en surface et des expériences réalisées en laboratoire ; elle a conduit différents auteurs à des estimations allant de quelques milliers à plusieurs centaines de milliers d'années pour l'âge probable de la glace arrivant en bordure du Groënland. A l'aide des isotopes stables (D et O 18) on peut actuellement déterminer l'origine de la glace ; en procédant à sa datation absolue (notamment par la méthode utilisant le C 14) on déterminerait ainsi des vitesses moyennes d'écoulement bases essentielles pour l'étude de l'équilibre des inlandsis.

(1) Ces chiffres ne tiennent compte des étendues de glace de mer.

Pour l'établissement d'un bilan de masse, une connaissance précise de l'accumulation de neige est nécessaire. On cherche actuellement à la déterminer par la datation des couches de névé ; cette datation peut être relative (isotopes stables) ou absolue ; dans ce dernier cas, elle est faite à partir des isotopes radioactifs (H_3 , $Pb\ 210$, retombées radioactives d'origine artificielle caractérisant certaines années).

Le présent travail a pour but de montrer les possibilités actuellement offertes par l'utilisation des isotopes stables de l'hydrogène et de l'oxygène pour résoudre les problèmes de la glace, à partir d'observations glaciologiques et d'analyses d'échantillons provenant de l'Antarctique.

L'intérêt de ces isotopes tient au fait que les variations de leur concentration sont très grandes par rapport à la précision actuelle des déterminations effectuées en laboratoire. Leur teneur, largement influencée par les paramètres météorologiques et mesurée sur des quantités de quelques cm^3 , sert donc de traceur dans l'étude de nombreux phénomènes.

CHAPITRE I

LES ISOTOPES STABLES — LE DEUTÉRIUM

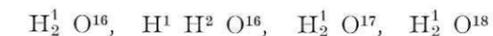
La plupart des éléments stables consistent en fait en un mélange d'isotopes ; caractérisés par le même nombre atomique, ils ont des propriétés chimiques pratiquement identiques. Ils se différencient par leur masse atomique et par un comportement différent lors de certains processus physico-chimiques.

C'est essentiellement la séparation isotopique effectuée lors des changements d'état de l'eau (évaporation et condensation) qui est la base des applications actuellement possibles dans le domaine de la Glaciologie.

1.1. — EXISTENCE DU DEUTÉRIUM DANS LA NATURE : SON CYCLE

Les différents isotopes de l'hydrogène et de l'oxygène, caractérisés par leur masse atomique et leur pourcentage par rapport au nombre total d'atomes existant dans la nature sont classés dans le tableau 1 ; les valeurs données pour l'oxygène sont celles publiées dans le Handbook of Chemistry and Physics, 1960. Pour l'hydrogène, nous avons modifié les concentrations données. En effet, la glace des calottes polaires représente un peu plus de 2 % du volume de l'eau à la surface terrestre ; si l'on admet pour l'Antarctique une température moyenne de $-45^\circ C$, la teneur correspondante est de 105 p. p. m. (chapitre 4). Comme la teneur des eaux océaniques est de 161 p. p. m. (E. ROTH, 1963) on obtient finalement une valeur moyenne de 160 p. p. m. pour le globe.

Le nombre de molécules d'eau contenant plus d'un isotope lourd est pratiquement négligeable, ce qui conduit à l'existence de 4 composés différents qui sont :



Le fractionnement isotopique de l'eau se produit dans la nature lors de différents phénomènes (biologiques, physiques...) conduisant à un cycle représenté sur la figure 1 (1). Ce graphique montre que la concentration en deutérium peut varier dans de très larges limites, bien que l'eau des océans contienne en moyenne toujours 161 atomes de deutérium par million d'atomes d'hydrogène. Notons que l'hydrogène atmosphérique naturel (δ SMOW ‰ (2) compris entre -10 et -16) que l'on suppose être produit par photodissociation de l'eau dans la haute atmosphère et qui s'échappe du champ de gravité terrestre, suggère un enrichissement progressif en deutérium de l'eau des océans (G. BOATO, 1960) ; des essais de mesure sur de l'eau juvénile provenant de sources thermales n'ont jusqu'à présent pas confirmé cette idée, alors que les teneurs obtenues pour de l'eau renfermée dans de la vieille roche semblent donner un δ SMOW négatif, en accord avec cette hypothèse (I. FRIEDMAN et R. L. SMITH, 1958).

1.2. — FRACTIONNEMENT ISOTOPIQUE NATUREL DANS LE CYCLE DE L'EAU

Les variations de concentration en deutérium ou oxygène 18 que l'on observe sur notre globe sont dues à des processus de fractionnement. Dans le cycle de l'eau, ce fractionnement provient du

(1) Ce diagramme est inspiré de celui de H. CRAIG publié par G. BOATO, 1960 ; il tient compte de certains résultats publiés par E. ROTH, 1963.

(2) Voir la définition de δ SMOW au par. 1.3.

fait que les tensions de vapeur des molécules isotopiques sont différentes ; la vapeur provenant d'un réservoir d'eau à une composition différente de celle du liquide d'origine.

1.2.1. Facteurs de séparation :

Le facteur de séparation de deux isotopes lors d'un phénomène physique ou chimique à l'équilibre est le rapport entre la concentration dans un composé ou phase et la concentration dans l'autre composé ou phase.

Dans le cas de processus cinétiques, il faudrait tenir compte lors du fractionnement isotopique, d'un facteur égal à la racine carrée du rapport des masses ; une telle séparation peut prendre place dans la nature, par exemple dans le cas d'une condensation très rapide de la vapeur sur une surface liquide, de la diffusion des gaz à travers des milieux poreux et dans les phénomènes d'évaporation.

Nous nous limiterons dans ce travail à des considérations portant sur des processus que l'on considère comme se produisant à l'équilibre.

Si n_1 et n_2 sont le nombre d'isotopes existant dans un composé ou phase et n'_1 et n'_2 le nombre d'isotopes existant dans l'autre composé ou phase, le facteur de séparation α s'exprime par la relation :

$$\alpha = \frac{n_1/n_2}{n'_1/n'_2} \text{ le coefficient de séparation étant égal à } \alpha - 1.$$

Au cours de la formation des précipitations à partir de l'eau des océans, différents processus peuvent intervenir : vaporisation, condensation, solidification, sublimation. Le facteur de séparation sera différent pour chacun de ces changements d'état :

— *Evaporation* : les mesures effectuées en laboratoire entre 0 et 350° C montrent que α (vapeur/liquide) est pratiquement égal au rapport des tensions de vapeur mesurées ou calculées (L. MERLIVAT, R. BOTTER et G. NIEF, 1962).

$$\alpha = \frac{(D/H) \text{ liquide}}{(D/H) \text{ vapeur}} = \frac{P_{H_2O}}{P_{HDO}}$$

— *Condensation* : le facteur de séparation est alors l'inverse :

$$\alpha = \frac{(D/H) \text{ vapeur}}{(D/H) \text{ liquide}} = \frac{P_{HDO}}{P_{H_2O}}$$

Il n'existe aucune mesure directe de ce facteur en-dessous de 0° C ; dans ce cas, les valeurs adoptées résultent de l'extrapolation de la courbe précédente (L. FACY et al., 1963).

— *Solidification* : dans le cas d'une congélation globale, le facteur de séparation est égal à l'unité ; le phénomène de congélation n'introduit pas alors de fractionnement. Dans le cas général, on calcule le facteur de séparation $\alpha = \frac{(D/H) \text{ liquide}}{(D/H) \text{ solide}}$ à partir des formules de THURCKAUF (1958).

— *Sublimation* : au point triple, le facteur de séparation est égal au produit du facteur de séparation vapeur/liquide par le facteur de séparation liquide/solide (à la même température) :

$$\alpha = \frac{(D/H) \text{ vapeur}}{(D/H) \text{ solide}} = \frac{(D/H) \text{ vapeur}}{(D/H) \text{ liquide}} \times \frac{(D/H) \text{ liquide}}{(D/H) \text{ solide}}$$

Les valeurs admises pour ces différents rapports sont données dans le tableau 2 ; malgré le manque de mesures directes en-dessous de 0° C, nous pensons que les chiffres adoptés sont valables à mieux de 1 % près. La variation du coefficient de séparation liquide/vapeur en fonction de la température est représentée fig. 2.

1.2.2. Différents modes possibles de fractionnement lors de la formation de la neige.

Le cycle des précipitations se produisant dans l'Antarctique peut être représenté schématiquement de la façon suivante :

- formation de la vapeur d'eau par évaporation à partir des océans ;
- formation des précipitations de neige par condensation puis solidification ou directement par sublimation.

Dès 1953, EPSTEIN et MAYEDA proposaient un modèle du cycle de l'eau dans la nature en comparant les phénomènes d'évaporation et condensation avec ceux se produisant dans une colonne de distillation à plusieurs étages, et dans laquelle la quantité de liquide contenu dans le réservoir est très grande comparée à celle du liquide contenu dans la colonne. L'analogie avec les étages divers signifie qu'évaporation et condensation prennent place dans la colonne, la phase condensée retournant au réservoir. Le mécanisme d'évaporation et condensation continus conduit à une vapeur s'échappant du système plus volatile que celle résultant d'une distillation simple ; la tension de vapeur de la molécule H₂O étant plus grande que celle de HDO, la vapeur d'eau résultante serait donc plus pauvre en deutérium que dans le cas d'un fractionnement simple (W. DANSGAARD, 1961, a d'ailleurs mesuré cette déficience dans le cas de l'oxygène 18).

Mais il nous semble difficile de représenter quantitativement les phénomènes pouvant se produire dans l'analogie avec une colonne de distillation à plusieurs étages ; nous nous contenterons, à partir d'un schéma extrêmement simplifié, de donner un ordre de grandeur des phénomènes naturels de fractionnement auxquels on peut s'attendre dans le cas des précipitations de neige.

— *Evaporation de l'eau des océans* :

Si n_1 et n_2 sont respectivement le nombre d'atomes D et H dans la vapeur et n'_1 et n'_2 les valeurs correspondantes dans l'eau, les concentrations dans les deux phases en équilibre sont liées par la relation :

$$\frac{C \text{ vapeur}}{C \text{ eau}} = \frac{n_1/n_2}{n'_1/n'_2} = \alpha \text{ (vapeur/liquide)}$$

En partant d'une concentration de deutérium dans l'eau égale à 161,7 · 10⁻⁶ et que l'on suppose demeurer constante, la composition de la vapeur dépend de la température. A partir des valeurs de α précédemment données, on obtient :

° C	0	5	10	15	20	25
$n_1/n_2 \cdot 10^6$	146,3	147,3	148,2	149,2	150,0	150,8

Notons que dans ce cas il est possible que le processus n'ait pas lieu complètement à l'équilibre par suite de la vitesse de diffusion par turbulence de la vapeur d'eau dans l'air.

— *Condensation de la vapeur d'eau* :

Il nous est nécessaire ici d'établir plusieurs hypothèses permettant de simplifier les calculs et qui ne nous semblent pas incompatibles avec la réalité :

- le volume d'air considéré ne subit pas d'échanges de masse avec d'autres masses d'air ;
- la phase condensée échappe à chaque instant au système ;
- le facteur de séparation α (liquide/vapeur) peut être considéré comme constant dans l'intervalle de température considéré.

Soit donc à un instant t_1 , n_1 et n_2 le nombre de molécules de HDO et H₂O dans la vapeur, N et p étant le nombre de molécules et la pression dans la masse d'air considérée, et e_w la tension de vapeur saturante par rapport à l'eau.

Si nous considérons la transformation élémentaire qui se produit à partir de cet instant et en désignant par dn_1 et dn_2 les molécules qui se condensent, nous pouvons écrire :

$$\frac{dn_1}{dn_2} = \alpha \frac{n_1}{n_2}, \text{ c'est-à-dire : } \frac{dn_1}{n_1} = \alpha \frac{dn_2}{n_2};$$

l'intégration de cette équation en tenant compte des hypothèses adoptées nous donne :

$$n_1 = k n_2^\alpha \quad \text{ou} \quad \frac{n_1}{n_2} = k n_2^{\alpha-1}$$

La constante k peut être calculée à partir des conditions régnant à l'origine dans la masse de vapeur d'eau ; si n_1^0 et n_2^0 sont le nombre de molécules HDO et H₂O au temps t^0 , nous avons :

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{n_1^0}{n_2^0} \left(\frac{n_2}{n_2^0} \right)^{\alpha-1}$$

relation qui s'écrit en utilisant les concentrations :

$$C = C_0 \left(\frac{n_2}{n_2^0} \right)^{\alpha-1}$$

Cette équation peut être transformée en utilisant les propriétés des gaz parfaits :

$$\frac{n_2}{N} = \frac{e_w}{p}, \quad \frac{n_2^0}{N_0} = \frac{e_w^0}{p_0}$$

D'après nos hypothèses $N = N_0$, ce qui nous donne pour la composition de la vapeur d'eau restante :

$$C_v = C_0 \left(\frac{e_w}{p} \right)^{\alpha-1} \cdot \left(\frac{p_0}{e_w^0} \right)^{\alpha-1} \quad (1)$$

A chaque instant le liquide qui se condense en équilibre avec cette vapeur a une composition donnée par :

$$C = \alpha C_v$$

Il est à noter que cette relation met en évidence l'influence de la pression sous laquelle se forment les précipitations.

— *Sublimation de la vapeur d'eau :*

Le calcul dans ce cas est exactement semblable à celui exposé précédemment, à la seule condition de remplacer e_w par e_i (tension de vapeur saturante au-dessus de la glace) et α (liquide/vapeur) par α (solide/vapeur) ; ceci conduit à :

$$C_v = C_0 \left(\frac{e_i}{p} \right)^{\alpha-1} \cdot \left(\frac{p_0}{e_i^0} \right)^{\alpha-1} \quad \text{et} \quad C = \alpha C_v$$

Notons que dans ce cas, l'hypothèse faite au sujet de la phase condensée échappant à chaque instant au système est tout-à-fait justifiée par suite du faible coefficient de diffusion dans la glace (de l'ordre de 10^{-10} cm² . sec⁻¹).

1.2.3. Représentation schématique du fractionnement lors de la formation de la neige.

— *Formation de la glace dans l'atmosphère.*

Nous nous contenterons de donner quelques considérations générales sur ce sujet encore mal connu (Physics of precipitations, 1960), une analyse exacte des phénomènes sortant du but de ce travail.

La glace peut se former dans l'atmosphère soit par congélation de la phase liquide, soit directement par sublimation de la vapeur, soit plus vraisemblablement à partir des deux phénomènes.

P. A. SHOUMSKY (1955) a fait une revue des différentes théories proposées, et il semble qu'à la suite de WICKMANN (1949), il faille admettre que la sublimation spontanée de la glace dans l'atmosphère n'a généralement pas lieu.

(1) Bien que donnée sous une forme différente cette formule est comparable à celle de R. BOTTER, C. LORIUS, G. NIEF (1960) et W. DANSGAARD (1961).

A — 40° C, en l'absence de noyaux de cristallisation, seule se produit la condensation ; en présence de noyaux, la formation de la glace à partir de la vapeur d'eau ne débute qu'une fois atteinte la sursaturation relative par rapport à l'eau, par congélation de gouttelettes. Il est vrai que dans de très rares cas la formation de la glace débute déjà dans la zone de sursaturation par rapport à la glace, mais ce fait peut s'expliquer par un phénomène de condensation capillaire.

La chute des cristaux de glace se produit dans l'atmosphère lorsqu'ils ont atteint une taille d'environ 50 μ ; au cours de leur descente, ils rencontrent des couches de température et d'humidité différentes : la composition finale des cristaux atteignant la terre constitue le résultat de l'intégration de toutes les conditions rencontrées. Ordinairement, la croissance des cristaux de neige s'effectue en même temps par sublimation de la vapeur d'eau et par congélation de gouttelettes d'eau (U. NAKAYA, 1954).

— *Fractionnement isotopique lors de la formation de la neige.*

Les phénomènes de condensation et sublimation sont essentiellement liés à un abaissement de la température ; les plus fréquents dans la nature se produisent à une pression constante ou par détente adiabatique. Nous avons calculé les teneurs en deutérium auxquelles on peut s'attendre à partir de différents processus.

Soit une masse d'air saturée à 0° C, ayant une teneur en deutérium de 140 p.p.m. sous une pression de 1 000 mb. La concentration des précipitations obtenues à partir de cette masse d'air est calculée pour une température variant de 0 à — 40° C, dans les cas suivants :

— refroidissement à pression constante, formation des précipitations par condensation puis congélation ;

— refroidissement à pression constante, formation des précipitations par sublimation ;

— refroidissement selon l'adiabatique humide, formation des précipitations par condensation puis congélation ;

— refroidissement selon l'adiabatique humide, formation des précipitations par sublimation.

On a utilisé pour cela les formules du paragraphe précédent ; les valeurs de α ont été calculées pour des intervalles de température de 2° C à partir du tableau 2, tandis que les tensions de vapeur au-dessus de l'eau et de la glace et la pression le long des pseudo-adiabatiques saturées étaient extraites des SMITHSONIAN METEOROLOGICAL TABLES. Pour chaque intervalle de température on part d'une vapeur en équilibre avec les précipitations qui se sont formées à cette température, c'est-à-dire que l'on suppose que la phase solide formée échappe à chaque instant au système. Les résultats sont résumés dans le tableau 3 et les figures 3 et 4.

1.2.4. Généralités sur la comparaison des variations de concentration du deutérium et de l'oxygène 18.

Le cycle du deutérium dans la nature met en évidence une variation relative autour de la teneur moyenne des océans qui peut atteindre plus de 40 % ; cette latitude de variation est nettement marquée dans le domaine des précipitations qui nous intéresse ici (de 171,6 à 94 p.p.m., limites qui ne sont que provisoires).

Pour l'oxygène, dont le cycle a été plus étudié (G. BOATO, 1960), à la suite notamment d'applications possibles dans le domaine des paléotempératures, la variation relative est bien moins importante.

En ce qui concerne l'eau, de nombreuses comparaisons ont permis de mettre en évidence un parallélisme de variation de concentration entre le deutérium et l'oxygène 18 (KIRSCHENBAUM 1951, FRIEDMAN 1953, DANSGAARD, NIEF, ROTH 1960, PICCIOTTO, X. DE MAERE, FRIEDMAN 1960, CRAIG 1961). Ce parallélisme est attribué au fait qu'en général les processus de fractionnement ont lieu à l'équilibre ; dans les phénomènes d'évaporation par exemple, le rapport des concentrations des deux isotopes est égal au rapport des tensions de vapeur, $\frac{P_{HDO}}{P_{H_2O^{18}}}$. A 20° C, le facteur de séparation en ce qui concerne le deutérium est de 1,08 alors qu'il est 1,009 pour l'oxygène 18 (1).

(1) Notons que les variations relatives faibles de teneur en oxygène 18 sont compensées par des techniques de mesure plus précises que dans le cas du deutérium ; la limite de sensibilité des deux méthodes est finalement pratiquement la même.

Des mesures combinées sur les deux isotopes ont par contre permis à G. BOATO (1960), de différencier des eaux d'origine différente ayant subi des fractionnements dans des processus non équilibrés. L'analyse simultanée en tritium (lorsqu'il ne provient pas d'explosions thermonucléaires) pourrait elle aussi apporter des renseignements sur les transformations subies.

Les fractionnements isotopiques naturels utilisés dans le cadre de ce travail ont vraisemblablement lieu à l'équilibre ; on peut donc s'attendre à ce que les informations apportées par l'un ou l'autre de ces isotopes conduisent à des résultats semblables.

1.3. — MESURE DES CONCENTRATIONS ; PRÉLÈVEMENT ET CONSERVATION DES ÉCHANTILLONS

Les mesures effectuées par les différentes laboratoires ne sont pas directement comparables entre elles ; après avoir rappelé le principe de la méthode de mesure utilisée au Laboratoire des Isotopes Stables de Saclay, nous verrons sur quelles bases peut se faire une transformation de résultats présentés dans d'autres échelles de mesure.

1.3.1. Méthode de mesure — précision relative des résultats.

L'analyse isotopique de l'hydrogène à l'état gazeux au moyen d'un spectromètre de masse est la méthode la plus précise pour déterminer les faibles teneurs en deutérium. L'ensemble des données contenues dans ce travail est le résultat de mesures effectuées au Laboratoire des Isotopes Stables de Saclay suivant une méthode mise au point depuis plusieurs années (G. NIEF et R. BOTTER 1958).

Une quantité d'environ 1 mg de l'échantillon à analyser est prélevée à l'aide d'une microseringue. Un bouchon est placé à l'extrémité d'un rodage de la ligne à gaz du spectromètre de masse et l'échantillon est vaporisé dans cette ligne dont les caractéristiques sont telles que toute condensation soit évitée. Un four à uranium réduit la vapeur au cours de son trajet vers la source d'ions et élimine l'air introduit en même temps que l'échantillon.

Les résultats sont donnés à partir de la mesure du rapport R des courants ioniques de masse 2 et 3 ; cette méthode nécessite un étalonnage de l'appareil qui a été effectué à l'aide de mélanges d'eau très appauvrie avec des quantités connues d'eau lourde pratiquement pure. Les concentrations sont ainsi connues en valeur absolue avec une précision de $\pm 0,4$ partie par million (en molécules), la précision relative étant de $\pm 0,1$.

1.3.2. Comparaison des différentes échelles de concentration utilisées pour le deutérium.

Les variations de concentration isotopique peuvent s'exprimer de différentes façons :

— valeur absolue $C = \frac{(D)}{(H)} \cdot 10^6$ (parties par million)

— variation de concentration : (parties par million)

$$\Delta C = \frac{(D)}{(H)} \cdot 10^6 \text{ (échantillon)} - \frac{(D)}{(H)} \cdot 10^6 \text{ (standard)}$$

— variation relative de concentration : (généralement exprimée en % ou ‰).

$$\rho C = \frac{(D/H) \text{ échantillon} - (D/H) \text{ standard}}{(D/H) \text{ standard}} \cdot 10^2 \text{ ou } 10^3$$

La méthode de mesure employée au Laboratoire des Isotopes Stables de Saclay permet de donner les résultats directement en valeur absolue ; ils expriment en parties par million le nombre de molécules HDO par rapport au nombre de molécules H₂O.

Un certain désaccord, dû aux procédés différents utilisés, existe entre les échelles obtenues par différents laboratoires. Pour faciliter la comparaison de nos mesures avec des données obtenues

par d'autres auteurs, nous donnerons dans ce travail, pour les principales conclusions obtenues, les concentrations absolues et leurs variations relatives.

Nous avons choisi de présenter ces dernières sous la forme ‰ SMOW. Le SMOW (échantillon moyen d'eau océanique) défini récemment par H. GRAIG (1961), a été rattaché à l'échantillon NBS-1 (fourni par le National Bureau of Standards) par la relation :

$$\frac{(D)}{(H)} \text{ SMOW} = 1,050 \frac{(D)}{(H)} \text{ NBS-1}$$

Au Laboratoire des Isotopes Stables de Saclay, la teneur mesurée pour le standard NBS — 1 est de $154 \pm 0,4$ p.p.m. (E. ROTH, 1963). A partir de la relation précédente, la teneur de l'échantillon SMOW serait de 161,7 p.p.m.

La moyenne de 14 échantillons recueillis dans l'Atlantique et le Pacifique a d'autre part conduit à une valeur de 161,4 p.p.m. accord qui peut être considéré comme excellent.

Les résultats que nous donnerons sous la forme ‰ SMOW seront donc établis à partir de la relation :

$$\rho \text{ ‰ SMOW} = \frac{(D/H) \text{ échantillon} - 161,7}{161,7} \cdot 1.000$$

Cette relation n'est évidemment qu'approximative et un travail d'uniformisation serait nécessaire pour permettre une comparaison plus précise des données publiées par les différents laboratoires.

1.3.3. Comparaison de l'échelle deutérium avec les échelles utilisées pour l'oxygène 18.

Une relation a été établie à partir d'échantillons prélevés sur un iceberg entre les concentrations en oxygène 18 et le deutérium. Cette relation s'exprime par :

$$\Delta O 18 = 1,53 D - 212,7 \text{ (W. DANSGAARD, G. NIEF et E. ROTH, 1960)}$$

$\Delta O 18$ étant obtenu par rapport au Danish Standard et D mesuré au Laboratoire des Isotopes Stables de Saclay.

Différents travaux (H. CRAIG, W. DANSGAARD) ont permis d'écrire la relation suivante :

$$\Delta O 18 = 1,9895 \rho O 18 \text{ ‰} + 34,5$$

ce qui conduit à l'équivalence :

$$D = 1,30 \rho O 18 \text{ ‰} + 161,5 \text{ (1)}$$

Cette équivalence est établie à partir d'analyses effectuées de façon parallèle par différents laboratoires ; des résultats obtenus dans d'autres cas ont conduit à une relation légèrement différente (E. PICCIOTTO et al, ... 1960, A. RENAUD communication personnelle, 1963).

1.3.4. Prélèvement et conservation des échantillons.

Les échantillons ont été directement introduits dans des flacons en polyéthylène propres, par grattage sur les parties à échantillonner.

Ces flacons peuvent ensuite être conservés en-dessous de 0° C de façon à éviter les phénomènes d'évaporation qui risquent d'être importants sur des récipients contenant de l'eau et insuffisamment remplis. Il est souvent plus pratique de laisser fondre la neige recueillie en réchauffant lentement jusqu'à une température à peine supérieure à 0° C ; on peut alors transvaser le contenu de différentes bouteilles dans une seule de façon à ce qu'elle soit bien pleine.

Le volume habituellement conservé est de l'ordre de 50 cm³ bien qu'une très faible quantité soit nécessaire pour une détermination, de façon à obtenir un échantillon représentatif et présentant de meilleures garanties quant à sa conservation.

Des déterminations effectuées à plus d'un an d'intervalle sur des échantillons stockés en France n'ont pas mis en évidence de variations de concentrations.

(1) Relation vérifiée directement pour une série d'échantillons analysés par R. GONFIANTINI (O 18) et à Saclay (D) en Juillet 1962.

CHAPITRE II

TENEUR EN DEUTÉRIUM DES PRÉCIPITATIONS SOUS FORME DE NEIGE

Dès 1936, RIESENFIELD et CHANG ont mis en évidence une variation saisonnière de teneur en isotopes lourds des précipitations à partir de mesures de densité ; mais ce n'est qu'à partir de 1956 (S. EPSTEIN) que des mesures de concentrations ont été effectuées de façon détaillée.

W. DANSGAARD (1961) a ainsi publié des données portant sur plusieurs années et, récemment G. BOATO et V. TOGLIATTI (1960) ont confirmé l'existence d'une variation saisonnière de la teneur en O 18 dans les régions tempérées, bien que des écarts très importants aient été notés lors de précipitations successives. Un travail concernant l'Antarctique a été publié en 1960 (E. PICCIOTTO et al...) ; il a permis de montrer l'existence d'une différence saisonnière confirmée en 1963 (R. GONFIANTINI et al...) et d'établir une relation entre la teneur en isotopes lourds des précipitations neigeuses et leur température de formation estimée à partir des radiosondages. Nos résultats publiés précédemment nous ont conduits à des conclusions voisines (R. BOTTER, C. LORTUS, G. NIEF, 1960).

Depuis, des prélèvements portant sur deux années ont été effectués à la base Dumont d'Urville ; ce sont les conclusions obtenues à partir de ces échantillons que nous exposons dans ce chapitre.

2.1. — VARIATION DE LA CONCENTRATION EN FONCTION DES SAISONS

2.1.1. Échantillons.

Les échantillons dont nous disposons ont été collectés au sol durant les années 1961 et 1962, en Terre Adélie, à la Base Dumont d'Urville (66°40' S, 140°01' E) ; les prélèvements effectués dans des dépôts propres nous font penser qu'ils sont caractéristiques des teneurs moyennes de chaque période de précipitation. Dans chaque cas, le jour et l'heure ont été indiqués, et la présence de chasse-neige caractérisée par de petits grains arrondis, notée.

— *Précipitations durant l'année 1961* : le tableau 4 résume les indications fournies par J. GARNIER, responsable de la section météo qui a assuré la prise des échantillons, et indique les résultats de l'analyse en deutérium. Les échantillons prélevés en deux emplacements différents dans les dépôts ont des teneurs dont l'écart est inférieur à 3, à l'exception des N° 83 et 84. Les flacons assez peu remplis nous ont fait craindre une évaporation possible, mais la valeur moyenne (136,7 p.p.m.) est exactement celle obtenue en 1962 (136,6 p.p.m.) ; elle est voisine de celle obtenue pour les échantillons de névé prélevés en bordure du continent (cf. chap. IV) ;

— *Précipitations durant l'année 1962* : le tableau 5 résume les indications fournies par G. RICOU, glaciologue hivernant qui a assuré la prise des échantillons et indique les résultats de l'analyse en deutérium.

2.1.2. Étude de la variation saisonnière.

Les valeurs individuelles obtenues en 1961 (fig. 5) et 1962 (fig. 6) ne la mettent pas en évidence même si l'on ne considère que les prélèvements effectués en l'absence de chasse-neige.

Un minimum très net existe au mois d'Avril en 1961 alors que les valeurs les plus faibles en 1962 se rencontrent au mois de Septembre. De plus, les courbes sont caractérisées par des variations brusques très importantes ; un exemple typique peut être cité en 1962 :

2	Septembre	129,2	p.p.m.
3	»	matin	137,9 »
3	»	soir	143,1 »

Pourtant une variation saisonnière apparaît lorsque l'on considère les valeurs moyennes mensuelles (tableaux 6 et 7, fig. 7 et 8). Bien que l'amplitude des variations soit sensiblement comparable, les minima sont là aussi très nettement décalés et l'absence d'échantillons à partir d'Octobre 1962 ne permet pas dans ce cas de constater le maximum qui devrait se placer durant la saison d'été.

A la base Roi Baudoin la courbe saisonnière qui était très marquée en 1958 (E. PICCIOTTO et al., 1960) apparaît beaucoup moins nettement en 1960 (R. GONFIANTINI et al., 1963) ce qui semble confirmer l'irrégularité de ce phénomène. Comme à la Base Dumont d'Urville, ces échantillons n'ont pas été collectés de façon systématique et W. DANSGAARD (1961) a constaté que dans ce cas la variation saisonnière n'apparaissait pas dans les précipitations analysées à Copenhague. Il semble que ceci puisse expliquer les valeurs dispersées que nous avons obtenues ; notons toutefois la difficulté d'obtenir un échantillonnage complet et représentatif avec les conditions de chasse-neige qui règnent le plus souvent dans l'Antarctique. Compte tenu de ces facteurs défavorables nous pouvons considérer la variation saisonnière obtenue à partir des valeurs moyennes comme satisfaisante.

2.2. — VARIATIONS DE LA STRUCTURE THERMIQUE DE LA TROPOSPHÈRE ANTARCTIQUE EN FONCTION DES SAISONS

Depuis l'Année Géophysique Internationale, les radiosondages régulièrement effectués dans les stations d'observations antarctique ont permis d'étudier les variations de température en altitude.

2.2.1. Radiosondages moyens mensuels.

Depuis les résultats publiés par H. WEXLER (1959), l'ensemble des données a confirmé la différence de température existant dans la troposphère antarctique entre les saisons d'été et d'hiver. En particulier, cette variation saisonnière a été observée pour différents niveaux à la Base Dumont d'Urville au cours de 4 années de mesures (1) (tableau 8, fig. 9 et 10). Les maxima d'été sont légèrement décalés (Janvier en 1958 et Février en 1962) mais il est surtout important de noter la croissance anormale de la température au cours du mois d'Août 1958, observable de façon atténuée vers la même période en 1962.

Les mesures effectuées par les Expéditions Russes dans l'Antarctique mettent aussi en évidence pour l'année 1958 un maximum secondaire au mois d'Août, (Résultats des Expéditions Soviétiques dans l'Antarctique, 1962), pour les stations de Mirny (alt. 30 m), Vostok (alt. 3 500 m) et Sovietskaya (alt. 3 570 m) (tableau 9, fig. 11).

2.2.2. Radiosondages dans le cas de précipitations.

Aucune étude systématique de la variation de température dans l'atmosphère antarctique pour les cas où l'on a noté des précipitations n'a encore été publiée ; c'est pourquoi il nous a semblé utile de vérifier que la variation notée dans le cas de sondages moyens existe également lors des chutes de neige. Là aussi le phénomène ne se manifeste nettement que lorsque l'on considère les valeurs mensuelles.

(1) Les données concernant les années 1957 et 1958 ont été publiées par B. VALTAT et J. GILBERT (1961) ; celles se rapportant à 1961 et 1962 nous ont été communiquées par J. ALT, Météorologie Nationale.

A Dumont d'Urville (1) (tableau 10, fig. 12), la variation saisonnière apparaît nettement mais le minimum d'hiver (Juin-Juillet) est décalé par rapport à celui observé pour les valeurs moyennes mensuelles calculées à partir de tous les radiosondages (Septembre). Dans les cas individuels le phénomène est masqué par la dispersion des points comme le montre la figure 13 (tableau 10) représentant la variation de température au niveau 2 000 m ; en particulier, les 2 seuls minima marqués ne sont caractérisés que par un point.

La même allure générale se retrouve à la base Mirny, la variation saisonnière n'apparaissant que de façon très discontinue dans le cas des points individuels (tab. 11, fig. 14) ; la moyenne mensuelle des radiosondages au niveau 2 000 m suit la même variation, qu'il s'agisse de tous les radiosondages ou de ceux effectués lors de précipitations, (fig. 11), mais dans ce cas, l'amplitude est plus faible.

La teneur isotopique des précipitations dépend notamment de la pression et de la température régnant dans les nuages. A un niveau donné, la variation saisonnière de la pression est négligeable. Celle de la température, difficile à mettre en évidence dans le cas des valeurs individuelles, apparaît lorsque l'on considère les valeurs moyennes mensuelles pour les journées de précipitations ; ces dernières sont d'ailleurs comparables aux valeurs moyennes obtenues à partir de tous les radiosondages.

Ces conclusions sont illustrées par la fig. 15 (tab. 12), (Expéditions Soviétiques dans l'Antarctique 1959), qui représente à Mirny (1956) les variations à 2 000 m d'altitude de la température moyenne générale et dans le cas de précipitations, ainsi que l'amplitude des variations.

2.3. — RELATION ENTRE LA TENEUR EN DEUTERIUM ET LA STRUCTURE DE LA TROPOSPHÈRE

2.3.1. Conditions limitatives.

W. DANSGAARD (1961) a résumé les différents paramètres qui peuvent influencer la teneur en deutérium des précipitations, en plus de leur température de formation :

- composition de l'eau à partir de laquelle a été formée la vapeur ;
- nombre et durée des processus de condensation et évaporation auxquels a été soumise la masse d'air avant la formation des précipitations considérées ;
- degré d'évaporation des précipitations durant leur chute au sol (effet sensible principalement dans les régions arides, D. ENHALT et al., 1962) ;
- quantité relative et composition isotopique du matériel réévaporé rentrant dans la masse d'air où se forment les précipitations (2) ;
- températures auxquelles se produisent les processus d'évaporation et de condensation ;
- précipitations provenant de parties différentes d'un nuage.

Il nous semble utile d'ajouter à cette liste les échanges de matière qui prennent place avec d'autres masses d'air et la pression à laquelle les différents processus envisagés se produisent (cf. § 1.2.2.). En ce qui concerne l'Antarctique deux influences sont de plus à considérer :

- présence de la glace de mer au cours de l'hiver, ce qui risque de modifier les conditions d'alimentation des masses d'air en vapeur d'eau puisque son étendue peut atteindre jusqu'à 1500 km (Oceanographic Atlas, 1957) ;
- présence de chasse-neige : les résultats que nous avons obtenus à la Base Dumont d'Urville (fig. 7) sont différents lorsque l'on considère les valeurs moyennes pour les cas de précipitations avec ou sans chasse-neige, bien que l'allure générale des phénomènes ne soit pas modifiée.

Il faut encore penser à différentes influences qui peuvent intervenir et qui sont liées au mode de formation et de circulation des précipitations. Citons par exemple :

(1) Valeurs calculées à partir des données qui nous ont été communiquées par la Météorologie Nationale.
(2) En passant sur le continent antarctique, les masses d'air sont probablement alimentées par de la vapeur provenant de la surface de neige, qui est caractérisée par une faible teneur en isotopes lourds.

- formation des précipitations dans des conditions de sursaturation ;
- variation irrégulière de la température, comme le réchauffement temporaire des masses d'air ;
- rééquilibrage des précipitations par diffusion ; une particule de 50μ de diamètre serait en équilibre isotopique avec la vapeur d'eau atmosphérique au bout d'environ 3 jours.

S. EPSTEIN et al signalent par exemple une différence notable des teneurs moyennes pour les stations de Petite Amérique et Ellsworth, alors que les conditions de température et d'environnement sont semblables ; ils attribuent ceci à la longueur très différente du trajet des dépressions qui atteignent ces stations.

2.3.2. Variation comparée de la teneur isotopique et de la température à 850 mb.

En dépit de ces conditions restrictives, la comparaison des figures 7, 8 et 10 montre un parallélisme dans les variations de la teneur en isotope et de la température au niveau 850 mb, bien qu'il existe un décalage entre les minima et le maximum (fig. 16).

Cette relation est précisée figure 17 ; les points relativement dispersés semblent tout de même s'aligner suivant la courbe théorique moyenne des processus de condensation et sublimation dont l'équation est donnée au paragraphe 1.2.2. dans le cas de transformations adiabatiques (tab. 3 et fig. 3, chap. I).

2.4. — RELATION ENTRE LA TENEUR EN DEUTÉRIUM ET LA TEMPÉRATURE DANS LES NUAGES

Comme nous l'avons vu déjà (cf. § 1.2.2.), la concentration en deutérium est liée à la pression et à la tension de vapeur au moment de la formation des précipitations. Malgré les nombreuses conditions limitatives, nous venons de montrer qu'il existe un certain parallélisme entre les variations des valeurs moyennes de la concentration et de la température au niveau 850 mb. A partir des précipitations recueillies en 1961 à la Base Dumont d'Urville, nous avons cherché à lier les teneurs mesurées aux conditions de température et de pression régnant dans les nuages.

2.4.1. Utilisation des radiosondages.

Avec les données des radiosondages réalisés à la Base Dumont d'Urville, il a été possible de caractériser (température, pression, humidité) les conditions probables régnant à la base et au sommet des nuages pour les journées durant lesquelles un prélèvement a été effectué ; ce travail a été réalisé par M. J. AIT, Ingénieur à la Météorologie Nationale. Les résultats, parmi lesquels figure la température à 800 mb, sont donnés tableau 13. Cette détermination n'est évidemment qu'approchée car il n'est pas possible de connaître la hauteur exacte des nuages ; celle-ci est estimée d'après l'allure des courbes représentant la température, l'humidité et les vents en altitude. A cette incertitude, s'ajoute le fait que l'heure de prélèvement ne coïncide pas en général avec celle du radiosondage qui était effectué quotidiennement à la Base Dumont d'Urville ; les conditions au sein des nuages produisant les précipitations ne sont donc connues que de façon approximative.

2.4.2. Relation entre la teneur isotopique et la température dans les nuages.

Malgré ces différentes causes d'erreurs auxquelles il faut ajouter celles examinées au par. 2.3.1. nous avons cherché la relation qui pouvait exister entre la concentration et la température. Sur les figures 18 et 19 on a représenté les concentrations ramenées à la pression de 1 000 mb en utilisant le facteur $\left(\frac{p}{1\ 000}\right)^{\alpha-1}$ (tab. 13). Les valeurs de α prises à chaque température sont les moyennes des facteurs de séparation liquide/vapeur et solide/vapeur calculés à partir du tableau 2.

Sur chacune de ces figures on a de plus tracé la courbe théorique moyenne des processus de

condensation et sublimation dont l'équation est donnée au paragraphe 1.2.2. dans le cas de transformations adiabatiques ; les concentrations ont naturellement été corrigées par le même facteur

$$\left(\frac{p}{1\ 000}\right)^{\alpha-1}$$

Malgré la dispersion assez considérable des points individuels, cette droite semble donner une représentation satisfaisante du phénomène. Il faut d'ailleurs noter que cette dispersion est du même ordre de grandeur si l'on se contente de prendre la température au niveau caractérisé par une pression constante (800 mb) comme le montre la figure 20.

— *Comparaison avec les résultats antérieurs* : deux séries de résultats concernant l'Antarctique ont été publiées sur le même sujet.

En Terre de Victoria (R. BOTTER, C. LORIUS et G. NIEF, 1960), la droite moyenne obtenue avec la température à la base des nuages est pratiquement parallèle à celle obtenue pour Dumont d'Urville, mais les précipitations sont bien plus pauvres en deutérium (fig. 19).

En Terre de la Reine Maud (E. PICCIOTTO et al., 1960), les résultats ont été présentés sans appliquer de correction de pression pour les températures. Les droites moyennes obtenues pour D et O¹⁸ en considérant les températures base-sommet ont été ramenées dans nos unités à partir des relations données au paragraphe 1.3.2. et 1.3.3. (fig. 21) ; nous avons porté sur la même figure les résultats de Dumont d'Urville et de la Terre Victoria sans correction de pression (base des nuages) ainsi que la courbe théorique moyenne dans le cas de processus adiabatique.

Bien que les pentes de ces différentes droites soient relativement comparables, leur décalage en teneur en deutérium suggère un effet géographique possible.

Trop d'incertitudes demeurent encore dans la caractérisation des conditions de formation des précipitations pour espérer obtenir actuellement une bonne corrélation ; des déterminations plus précises seraient nécessaires, comme par exemple la collecte d'échantillons au sein de masses nuageuses dans des conditions bien déterminées. Il est pourtant intéressant de noter que l'allure des phénomènes est relativement bien représentée par les courbes théoriques de concentration (§ 1.2.) ; bien qu'à son stade initial, une telle méthode d'investigation a permis d'obtenir des résultats intéressants dans l'étude des conditions de formation d'un grêlon (L. FACY et al., 1963).

CHAPITRE III

MESURE DE L'ACCUMULATION DE LA NEIGE

Datation saisonnière des couches de névé par le deutérium

3.1 — MÉTHODES DE MESURE DE L'ACCUMULATION

Pour établir le bilan de masse de l'Antarctique, la mesure précise de l'accumulation de neige est nécessaire. Les différentes estimations actuelles varient entre 0,16 et $3,80 \cdot 10^{18}$ g par an (H. WEXLER, 1961) avec une valeur moyenne estimée à $1,7 \cdot 10^{11}$ g par an (M. MELLOR, 1961). Une telle incertitude rend impossible la réponse à une des questions fondamentales concernant le continent : l'Antarctique est-il en voie d'expansion ou de régression ?

La difficulté de la détermination exacte de cette quantité tient à plusieurs raisons :

- le nombre de stations permanentes et la couverture du continent sont très insuffisants, notamment en ce qui concerne les régions centrales ;
- l'accumulation présente un caractère extrêmement irrégulier dû notamment à la redistribution des précipitations de neige par le vent ;
- les méthodes utilisées jusqu'à présent ne semblent pas suffisantes pour résoudre ce problème ; elles consistent essentiellement en la mesure de l'enneigement par lecture directe sur des repères et en l'étude stratigraphique des couches de névé.

3.1.1. Utilisation des repères.

Pour obtenir des valeurs représentatives, il est nécessaire d'avoir un réseau suffisamment dense ; les résultats obtenus peuvent d'ailleurs être faussés par l'enfoncement de la balise par suite de phénomènes de fusion, ou simplement par suite du tassement des couches de névé par rapport à la balise (1). L'utilisation de repères de niveau (fils, grillages ou rondelles isolantes) peut améliorer cette méthode qui est la plus fréquemment utilisée au voisinage des bases ou sur certains itinéraires de raids ; elle ne permet pas, de toute façon, de remonter dans le temps.

3.1.2. Étude stratigraphique des couches de névé.

Elle est la seule utilisable pour presque toute l'étendue du continent sur lequel il n'existe pas de repères et s'effectue dans des puits (généralement de 4 m) creusés à partir de la surface ou sur des échantillons continus de névé obtenus par carottage. Elle est basée sur la distinction des couches d'été et d'hiver à partir de certaines propriétés physiques simples (densité, résistance à la pénétration, cohésion, grosseur des grains), et sur l'examen de caractères stratigraphiques particuliers tels que les couches de glace et les croûtes de vent (fig. 22 et C. LORIGUS, 1963 b).

(1) Observations présentées par A. BAUER, Commission des neiges et glaces, Obergurgl 1962.

Le processus de diagenèse des couches de neige qui se déposent s'explique essentiellement par une recristallisation de sublimation et le tassement, lorsque la température demeure constamment en-dessous de 0° C. Les grains de neige (fig. 23 et 24) ou de chasse-neige (fig. 25) qui se déposent tendent vers une forme d'équilibre sphérique : la tension de vapeur plus grande sur les parties saillantes entraîne une redistribution du matériau et les grains très petits disparaissent au profit des plus gros. Le transport de matière s'accompagne ensuite de l'apparition de faces cristallines (fig. 26) et de régulation aux points de contact, en même temps que se développe le tassement de la couche ; l'amas de particules se transforme en un dépôt plus ou moins cohérent.

Sous l'action des gradients de température, un transport de matière s'effectue des parties les plus chaudes (forte tension de vapeur) vers les parties les plus froides (faible tension de vapeur) ; ce transport sera d'autant plus intense que la porosité des couches sera plus grande, la température et les gradients de température plus élevés.

L'antagonisme entre le tassement et la recristallisation par sublimation entraîne un développement opposé des couches de neige, le tassement conduisant au durcissement et la recristallisation à l'ameublissement. Dans le premier cas, on constate une augmentation du poids spécifique et l'absence de croissance des grains tandis que dans le second cas, l'accroissement rapide des cristaux se produit avec conservation du poids spécifique initial.

Différents travaux ont déjà été consacrés à cette question parmi lesquels nous citerons ceux de P. A. SHOUMSKY (1955), V. SCHYTT (1958) et C. S. BENSON (1962).

Nos propres observations dans l'Antarctique et notamment à la Station Charcot (C. LORIUS, 1963a) nous ont permis d'arriver aux conclusions suivantes : les couches qui se déposent en été ont une densité inférieure à celles se déposant en hiver ; cette différence est en moyenne supérieure à 10 % (les moyennes de nombreuses mesures ont donné des chiffres respectifs de 0,375 et 0,425) et s'explique à partir des vitesses de vent plus grandes durant la saison froide. Ces couches exposées, durant la saison chaude, à des températures et gradients de température élevés sont formées de grains plus gros, à faces cristallines nettement marquées et à assemblage lâche. Dans le cas extrême, on peut observer par suite de la fusion la formation de couches de glace plus ou moins importantes.

Il semble qu'il soit donc possible à partir de l'étude des couches superposées de déterminer l'accumulation annuelle par caractérisation d'un cycle saisonnier.

3.2 — DATATION DES COUCHES DE NÈVÉ PAR LE DEUTÉRIUM

S. EPSTEIN et C. BENSON (1959) ont les premiers mis en évidence l'existence d'une variation de teneur en oxygène 18 dans les couches de névé du Groenland, variation liée à la détermination stratigraphique des saisons (C. BENSON, 1962). Une étude comparée des concentrations en deutérium et en oxygène 18 a été faite sur des échantillons provenant d'un iceberg (W. DANSGAARD, G. NIEF et E. ROTH, 1960) et C. LANGWAY (1962) a tiré des conclusions concernant l'accumulation de la neige, à partir de l'analyse de prélèvements effectués au cours d'un forage profond. Toujours en ce qui concerne le Groenland, d'autres travaux sont actuellement en cours (A. RENAUD) (1).

Nous avons par ailleurs publié les premiers résultats d'études systématiques dans l'Antarctique basés sur les teneurs en deutérium (R. BOTTER, C. LORIUS, G. NIEF, 1961 et C. LORIUS, 1961). Avec l'oxygène 18 R. SHARP et S. EPSTEIN (1962) ont analysé les données stratigraphiques et isotopiques provenant de plusieurs stations ; R. GONFIANTINI et al... (1963) ont réalisé le même travail sur une profondeur continue de 15 m au voisinage de la base Roi Baudoin.

D'une façon générale, la détermination isotopique des différentes couches est basée sur la séparation saisonnière des précipitations en ce qui concerne leur teneur en deutérium (cf. chap. II) ; les couches de neige formées à partir des précipitations d'été sont plus riches en isotope lourd (deutérium, oxygène 18).

(1) Informations présentées lors de la Commission des neiges et glaces, réunion du Scientific Committee for Antarctic Research - Obergurgl 1962.

3.3. — DÉTERMINATION DE L'ACCUMULATION : COMPARAISON DES RÉSULTATS OBTENUS A PARTIR DES DIFFÉRENTES MÉTHODES

3.3.1. Stations d'études.

Le tableau ci-dessous indique les stations pour lesquelles nous disposons des différentes données (fig. 27) ; les puits ayant servi à l'étude stratigraphique et au prélèvement d'échantillons ont été creusés au pied des balises repères lorsque ceci était possible.

STATIONS	DISTANCES à la côte (km)	AUTITUDES (m)	BALISES de 0 à — (cm)	STRATIGRAPHIE de 0 à — (cm)	DEUTÉRIUM de 0 à — (cm)
A 3 (B 1)	2,8	220	246	403	361
A 28 (B 7)	26,2	675	170	400	392
B 61	501	2 510	25	113	110
NZGS 15 (1)	0	16	137	179,5	141
NZGS 16 (1)	0	16		610	421,5

Une comparaison est donc possible entre les trois méthodes aux stations A 3, A 28, B 61, NZGS 15 et entre deux méthodes pour le profil NZGS 16.

Nous nous contenterons d'indiquer ici les résultats obtenus ; des commentaires plus détaillés sur les études de balises et de stratigraphie entrent dans le cadre d'une autre publication (C. LORIUS, 1963 b) ; la signification des symboles utilisés est indiquée figure 28.

3.3.2. Station A 3. (B1)

— *Datation à partir de la balise :*

Les lectures d'accumulation effectuées permettent de caractériser les niveaux suivants :

- 0 cm ... Janvier 1962 - Octobre 1961
- 122 cm ... Novembre 1958
- 126 cm ... Janvier 1959
- 206 cm (2) ... Octobre 1956
- 246 cm (2) ... Septembre 1957.

Cette énumération permet de mettre en évidence une faible accumulation probable durant l'été 1958-1959 (faible ablation de Novembre 1958 à Janvier 1959) et une ablation très nette d'Octobre 1956 à Septembre 1957.

— *Datation stratigraphique :*

Elle est nettement établie (fig. 29) à l'exception de deux niveaux pour lesquels les différents critères utilisés ne sont pas concordants.

De 245 à 275 cm, la datation probable est notée sur la figure ; une autre interprétation moins vraisemblable serait la suivante :

- 245 - 258 cm : été
- 258 - 264 cm : hiver
- 264 - 269 cm : été
- 269 - 275 cm : hiver.

(1) Station située au voisinage de Scott Base.

(2) La position relative de ces deux repères est exactement connue ; il existe une incertitude quant à leur profondeur absolue.

De 340 à 403 cm, une interprétation moins vraisemblable que celle notée sur la figure pourrait être :

340 - 346 cm : été
 346 - 358 cm : hiver
 358 - 376 cm : été
 376 - 391 cm : hiver
 391 - 403 cm : été.

Il est à remarquer pour cette station que certaines couches d'été présentent une densité relativement élevée qui s'explique par la présence de couches ou de lentilles de glace assez nombreuses.

— *Datation par le deutérium* (tableau 14) :

Elle est nettement établie à partir de la courbe représentative (fig. 30) ; en dehors des saisons indiquées, il serait peut-être possible de placer deux étés supplémentaires caractérisés par les faibles accroissements notés pour les profondeurs voisines de 35 et 245 cm et un hiver à la profondeur 337 cm. Cette interprétation suggérée par la comparaison avec la datation stratigraphique nous semble assez peu probable.

Les échantillons prélevés dans les tubes à densité se suivent de façon continue ; ils représentent une couche de 2,5 cm de part et d'autre de la profondeur donnée.

— *Comparaison des différentes méthodes* :

Les mesures d'accumulation effectuées sur la balise conduisent à placer l'été 1958-1959 entre les niveaux 122 et 128 cm ; ces chiffres sont légèrement inférieurs à ceux indiqués par la stratigraphie (128 à 133 cm) et par le deutérium (135 à 145 cm) ; mais, si l'on tient compte d'un tassement probable de la neige de quelques %, ces valeurs sont en excellent accord (notons que l'accord serait meilleur pour le deutérium en admettant un été supplémentaire au niveau 35 cm). Par contre, le niveau Septembre 1957, situé à 256 cm est nettement décalé par rapport aux datations par la stratigraphie et par le deutérium ; ceci s'explique par l'ablation importante notée d'Octobre 1956 à Septembre 1957 et que seule la lecture sur balise a permis de mettre en évidence.

Les déterminations saisonnières par stratigraphie et par le deutérium sont en majeure partie concordantes ; cependant il existe certaines divergences. En dehors du décalage des couches hiver 1960, la concordance est mauvaise pour les profondeurs 116 à 190 cm et au voisinage de 245 cm ; pour la couche 116-190 cm, nous observons des décalages et oppositions de saison dus au plus grand nombre de couches caractérisées stratigraphiquement, tandis que vers 245 cm l'accord entre les deux méthodes ne subsisterait qu'en admettant la présence d'une couche d'été isotopique à ce niveau. La concordance est ensuite très bonne jusqu'au bas du puits à l'exception de la couche stratigraphique hiver 1951 ; là aussi il faudrait interpréter la faible décroissance observée pour le deutérium au niveau 337 cm comme l'indication d'une couche d'hiver. Sur une profondeur de 400 cm, la détermination isotopique indique 8 à 11 années tandis que la méthode stratigraphique en donne de 12 à 15. Environ 30 % des saisons sont indiquées en opposition et 50 % en bonne concordance.

Conclusion : La datation effectuée au moyen des différentes méthodes conduit aux résultats suivants :

	PROFONDEUR	BALISE	STRATIGRAPHIE (1)	DEUTÉRIUM (1)
Accumulation moyenne	de 0 à 125 cm	18,9	19,7	21,2 (17,3)
annuelle	0 à 206	19,9	14,5	20,3 (16,9)
(cm eau)	0 à 400		16,1 (12,9)	24,2 (17,6)

La détermination isotopique conduit donc à une accumulation d'environ 50 % supérieure à celle donnée par la stratigraphie ; elle semble être en meilleur accord avec les déterminations effectuées à partir des lectures sur la balise.

(1) Les chiffres entre parenthèses tiennent compte des interprétations alternatives données comme peu probables.

3.3.3. Station A 28 (B 7).

— *Datation à partir de la balise* :

Les lectures d'accumulation effectuées permettent de caractériser les niveaux suivants :

0 cm ... Janvier 1962
 20 cm ... Octobre 1961
 40 cm ... Janvier 1959
 79 cm ... Novembre 1958
 116 cm (1) ... Novembre 1957
 119 cm (1) ... Février 1957
 170 cm (1) ... début été 1956-1957.

Cette énumération permet de mettre en évidence l'irrégularité de l'accumulation ; celle-ci est en effet de près de 50 cm pour l'été 1956-1957, de 3 cm pour l'hiver 1957, de 39 cm pour l'été 1958-1959 et seulement de 20 cm pour une période s'étendant de Janvier 1959 à Octobre 1961.

— *Datation stratigraphique* :

Elle est nettement établie (fig. 31) à l'exception de la couche allant de 7 à 40 cm pour laquelle deux interprétations sont possibles. La plus vraisemblable est donnée sur la figure, l'autre détermination étant :

7 - 19 cm : été
 19 - 25 cm : hiver
 25 - 40 cm : été,

si l'on tient compte du léger accroissement de densité vers le niveau 25 cm.

— *Datation par le deutérium* (tableau 15) :

Elle est nettement établie à partir de la courbe représentative (fig. 32) ; la seule caractérisation un peu douteuse étant celle d'un hiver au niveau 270 cm. La présence d'un hiver supplémentaire à 135 cm et à 242 cm suggérée par la comparaison avec la datation stratigraphique nous semble peu vraisemblable.

Les échantillons prélevés dans les tubes à densité se suivent de façon continue ; ils représentent une couche de 2,5 cm de part et d'autre de la profondeur donnée.

— *Comparaison des différentes méthodes* :

Les mesures d'accumulation effectuées sur la balise conduisent à placer le début de l'été 1956-1957 au niveau 170 cm (2) ; ceci est un excellent accord avec la détermination stratigraphique, bien que les autres niveaux repérés soient décalés dans les différentes datations. Les quantités saisonnières ne sont pas non plus respectées, puisque ni le deutérium ni (encore moins) la stratigraphie ne donnent une valeur comparable à celle relevée sur la balise par exemple pour l'été 1958-1959.

Les déterminations saisonnières stratigraphique et isotopique ne sont guère comparables, l'une donnant des saisons relativement rapprochées alors que la courbe représentative de l'autre est faite de variations s'étendant sur des profondeurs plus importantes.

Alors que nous comptons de 8 à 10 années sur l'ensemble du puits pour le deutérium, la stratigraphie en indique de 14 à 15 ; environ 30 % des saisons sont indiquées en opposition et 30 % en bonne concordance. Le calcul de l'accumulation moyenne effectué à partir de ces données conduit aux résultats suivants :

(1) La position relative de ces repères est exactement connue ; il existe une incertitude quant à leur profondeur absolue.

(2) Il n'est pas tenu compte lors de cette comparaison du tassement probable de la neige ce qui tendrait à diminuer de quelques % la profondeur des couches déterminées à partir des lectures sur balises.

	PROFONDEUR	BALISE	STRATIGRAPHIE (1)	DEUTÉRIUM (1)
Accumulation moyenne annuelle (cm eau)	de 0 à 170 cm	15	15 (12,5)	25 (18,8)
	0 à 400 cm		13,3 (12,4)	23,3 (18,6)

Les méthodes utilisant balise et stratigraphie sont dans ce cas en bon accord, la détermination isotopique donne des valeurs nettement plus grandes pour l'ensemble du puits ; l'accumulation obtenue à partir du deutérium est supérieure d'environ 75 % à celle donnée par la méthode stratigraphique.

3.3.4. Station B 61. (2)

— *Datation à partir de la balise :*

La lecture de l'accumulation permet de caractériser le niveau 23 cm qui se trouvait à la surface le 18 Décembre 1958.

— *Datation stratigraphique :*

Elle est nettement établie (fig. 33) à partir des critères concourants.

— *Datation par le deutérium (tableau 16) :*

Elle est nettement indiquée (fig. 34), bien que les échantillons aient été prélevés de façon discontinue (tous les 10 cm environ).

— *Comparaison des différentes méthodes :*

Elles sont ici en parfait accord pour la caractérisation de l'été 1958-1959. La concordance est ensuite bonne entre la datation par stratigraphie et par le deutérium, comme le montre le calcul de l'accumulation moyenne annuelle :

		BALISE	STRATIGRAPHIE	DEUTÉRIUM
Accumulation moyenne annuelle (cm eau)	pour 1 an	8,7	8,7	8,7
	pour 3 ans		14,5	14,5

3.3.5. Station N Z G S 15 (tableau 17). (3)

— *Datation à partir de la balise :*

Les lectures d'accumulation effectuées permettent de caractériser les niveaux suivants :

0 cm ... Octobre 1961

95 cm ... Février 1960

137 cm ... Janvier 1959.

— *Datation stratigraphique :*

Elle semble nettement établie (fig. 35) sauf en ce qui concerne la couche comprise entre 13,5 et 25 cm ; cette saison d'été a en effet été caractérisée par deux minces niveaux (13,5 à 15,5 et 23,5 à 25 cm) pour lesquels la cohésion était très faible. Cette interprétation a évidemment été suggérée par les repères obtenus à partir de la balise.

(1) Les chiffres entre parenthèses tiennent compte des interprétations alternatives données comme peu probables.

(2) Cette étude a été possible grâce aux facilités qui nous ont été accordées par la National Science Fondation (U.S.A.), Antarctic Research program.

(3) Pour les stations NZGS 15 et 16, l'étude stratigraphique et la collecte des échantillons ont été effectuées en collaboration avec A. HEINE, New Zealand Geological Survey, grâce aux facilités qui nous ont été accordées par l'Antarctic Division, Dep. Sc. Ind. Res. New Zealand.

— *Datation par le deutérium :*

Elle est nettement indiquée par les variations de la courbe représentative (fig. 36). Un seul échantillon ayant été prélevé pour chaque couche stratigraphique, il est possible que certaines variations aient été masquées.

— *Comparaison des différentes méthodes :*

La concordance entre les saisons stratigraphiques et isotopiques n'existe pratiquement jamais sauf en ce qui concerne la couche allant de 77 à 98 cm (caractérisation d'un été) ; par contre les niveaux repérés à partir des lectures effectuées sur la balise sont en assez bon accord avec la détermination isotopique. La détermination de l'accumulation annuelle moyenne donne d'ailleurs les résultats suivants :

	BALISE	STRATIGRAPHIE	DEUTÉRIUM
Accumulation moyenne annuelle (cm de névé)	46	39	46

3.3.6. Station N Z G S 16 (tableau 18).

Il n'existe pas pour cette station de repères d'accumulation ; par contre la détermination stratigraphique a pu être contrôlée par l'étude effectuée en 1958 (A. W. STUART et A. J. HEINE), compte tenu du tassement du névé.

— *Datation stratigraphique :*

Elle est nettement établie (fig. 37) et les saisons semblent bien caractérisées ; notre détermination effectuée en 1961 coïncide avec celle effectuée en 1958.

— *Datation par le deutérium :*

Elle est nettement indiquée par les variations de la courbe représentative (fig. 38) ; les échantillons ont été prélevés de façon à représenter chaque couche déterminée stratigraphiquement.

— *Comparaison des méthodes :*

La courbe de variation de la teneur en deutérium met en évidence 8 années entre le sommet du puits et le niveau 420 cm, alors que la stratigraphie jusqu'à la même profondeur indique 12 années. Dès le début nous observons un décalage des saisons, décalage qui se traduit parfois par une nette opposition, les zones de forte teneur en deutérium correspondant par exemple à des hivers stratigraphiques ; c'est en particulier le cas pour :

l'hiver stratigraphique 1958
l'été » 1957-1958
l'hiver » 1957
l'été » 1956-1957
l'hiver » 1955.

A partir du niveau 200 cm, l'étude stratigraphique suggère l'interprétation d'étés isotopiques aux niveaux 277, 309, 352, 367,5 et 387,5 ; on note en effet à ces profondeurs un très faible accroissement de la teneur en deutérium, mais il nous semble peu vraisemblable d'attribuer ces faibles variations à la présence de neige d'été.

Pour l'ensemble du puits environ 30 % des saisons sont en complète opposition alors que 40 % sont en bon accord.

L'accumulation moyenne annuelle a été calculée à partir de ces résultats :

	STRATIGRAPHIE	DEUTÉRIUM
Accumulation moyenne annuelle (cm névé)	34,4	51,6

La détermination isotopique donne donc une valeur de 50 % supérieure à celle obtenue par l'étude stratigraphique.

3.4 — VALIDITÉ DES DIFFÉRENTES MÉTHODES

POUR LA DÉTERMINATION DE L'ACCUMULATION DE LA NEIGE

Les études comparatives précédentes mettent en évidence la divergence des résultats obtenus à partir des différentes méthodes, la datation isotopique conduisant à des valeurs de l'accumulation annuelle nettement plus élevées ; mais si l'accord entre les lectures effectuées sur les balises et la stratigraphie semble un peu meilleur, il faut se rappeler que le plus souvent l'étude des puits sur le terrain est effectuée compte tenu justement de la mesure directe de l'accumulation. L'analyse isotopique et la détermination stratigraphique ont conduit à des résultats cohérents au Groenland (S. EPSTEIN et C. BENSON, 1959) et même dans l'Antarctique (R. GONFIANTINI et al... 1963) ; par contre nos conclusions sont en accord avec les travaux de R. P. SHARP et S. EPSTEIN, 1962.

Examinons maintenant les différentes causes susceptibles de conduire à des erreurs d'interprétation :

3.4.1. Principes.

Certaines critiques peuvent s'appliquer, à priori, à chacune des méthodes utilisées :

— les mesures effectuées sur balises doivent être corrigées du tassement de la neige, et, ce qui est pratiquement impossible, de l'enfoncement relatif des couches de névé par rapport à la balise ;

— les critères utilisés pour l'étude stratigraphique (grosseur des grains, densité, résistance à la pénétration...) ne sont établis que d'une façon générale et leur interprétation est souvent délicate ; il peut se déposer par exemple durant la période d'été des couches fortement tassées, ce qui influencera leur métamorphisme ultérieur ;

— la datation isotopique saisonnière dépend de la régularité des phénomènes météorologiques et nous avons vu (cf. chapitre II) que certaines chutes de neige peuvent ne pas être caractéristiques de leur saison.

Les datations stratigraphique et isotopique reposent sur des principes qui peuvent d'ailleurs être partiellement contradictoires ; la première est basée sur une évolution marquée des couches de neige déposées, alors que la seconde utilise une propriété des précipitations dont la conservation est nécessaire.

3.4.2. Répartition irrégulière de l'accumulation.

Nous avons vu qu'aux stations A 3 et A 28 les lectures effectuées sur balises ont mis en évidence une ablation marquée durant des périodes assez longues. Ceci n'est guère étonnant car la surface de la neige se présente souvent sous un aspect très accidenté (fig. 39) et certains dépôts d'origine éolienne (sastruggi) peuvent atteindre une hauteur de plus de 1 mètre ; les équipes de raid se déplaçant en Terre Adélie ont d'ailleurs parfois retrouvé des traces datant de plus d'un an. L'absence d'années ou de saisons ne peut être mise en évidence par l'analyse isotopique ni par l'analyse stratigraphique.

En dehors de ces accidents qui ne sont cependant pas négligeables pour la détermination de l'accumulation, d'autres facteurs peuvent encore intervenir. Les résultats obtenus au cours de l'A.G.I. ont en effet permis de conclure (V. M. KOTLYAKOV, 1961) que l'accumulation de la neige était généralement liée à l'intensité des précipitations, mais si cette accumulation se fait de façon relativement régulière dans le cas des stations intérieures (voir par exemple C. LORIUS, 1963a) il n'en est pas de même pour les régions côtières. L'intensité des précipitations liée à l'activité cyclonique, à la proximité de la mer libre et à la température de l'air présente un maximum en automne — début hiver et vers la fin de l'hiver et le printemps ; il existe parfois un autre maximum durant la période d'été (V. M. KOTLYAKOV, 1961). Bien que dans l'ensemble des discussions précédentes

nous avons considéré l'année comme séparée en saisons d'été et d'hiver pour des raisons de simplification, le découpage généralement admis est le suivant :

été : Décembre à Février

automne : Mars à Avril

hiver : Mai à Septembre

printemps : Octobre à Novembre.

Dans le cas particulièrement défavorable d'une accumulation se produisant uniquement en automne et au printemps, les saisons isotopiques seraient très difficiles à différencier (cf. chap. II) ; l'évolution des couches par diagenèse peut d'ailleurs se produire en opposition partielle avec leur saison d'origine, donc avec leur teneur isotopique. Ceci semble confirmé dans certains cas (R. GONFIANTINI et al... 1963) alors que dans le présent travail nous avons vu que la proportion des saisons en accord était sensiblement égale à celle des saisons en désaccord.

3.4.3. Chasse-neige.

La neige charriée par le vent qui se dépose ensuite est évidemment cause de nombreuses difficultés dans l'interprétation des couches saisonnières ; si la diagenèse peut éventuellement permettre de les reconnaître stratigraphiquement, la datation isotopique risque d'être rendue encore plus difficile.

Pourtant la variation annuelle (cf. chapitre II) des teneurs en deutérium n'est guère moins nette lorsque l'on considère non seulement les cas de précipitation mais tous les cas où neige et chasse-neige sont mêlés. R. SHARP et S. EPSTEIN (1962) font ainsi état de mesures réalisées dans de telles conditions à Petite Amérique et qui mettent en évidence « la tendance normale, bien qu'irrégulière de l'oxygène 18 à suivre la variation de température » ; les résultats obtenus à la base Roi Baudoin (E. PICCIOTTO et al... 1960) montraient déjà que le chasse-neige n'avait qu'une importance locale et que les concentrations mesurées dans ce cas restaient caractéristiques des saisons.

3.4.4. Fusion.

La présence d'eau qui regèle ensuite dans les couches inférieures conduit, de façon générale, à effacer les variations ; lorsque la fusion n'est pas trop intense, elle peut au contraire servir de repère, dans le cas notamment de la méthode stratigraphique.

3.4.5. Autres formes de précipitation.

Bien que F. LOEWE (1962) estime que l'accumulation sous forme de givre soit négligeable, en accord avec nos observations en Terre Adélie jusqu'à la Station Charcot, (C. LORIUS, 1963a), V. M. KOTLYAKOV (1961) écrit que dans les régions centrales la condensation de la vapeur d'eau sur la surface de la neige est une part importante de l'accumulation. Il a été signalé d'autre part à de nombreuses reprises que les précipitations dans les régions intérieures se produisaient sous forme d'aiguilles de glace.

Si les formations de givre risquent de suivre une variation saisonnière normale en ce qui concerne leur teneur isotopique (E. PICCIOTTO et al..., 1960), les conditions de formation des aiguilles de glace ne semblent pas exactement définies à ce sujet. Ces deux cas d'accumulation sont aussi une source de difficultés pour l'interprétation stratigraphique.

3.4.6. Conclusion.

Il n'existe à l'intérieur du Continent Antarctique, soit sur près de 15 millions de km², que quelques stations où une mesure continue de l'accumulation puisse être effectuée. Le plus souvent ces études sont faites au cours de raids par l'analyse stratigraphique, dont de nombreuses données se sont d'ailleurs révélées inexploitable. Parallèlement il existe une alternance de « saisons isotopiques » très nettement marquées dont l'interprétation est faite actuellement à partir des « saisons climatiques ».

L'importance de la connaissance de l'accumulation de la neige justifie que l'on développe des études fondamentales pour en permettre une détermination plus exacte.

Les points successifs qui devraient faire l'objet d'études plus complètes pourraient être les suivants :

— variation de la teneur en deutérium de précipitations lors d'un cycle annuel, non seulement en des stations côtières mais aussi à l'intérieur du continent ;

— établissement d'un réseau de couches repères à partir duquel pourraient être testées systématiquement les différentes méthodes ;

— développement de méthodes indépendantes (teneurs en sel, résistivités électriques) et notamment celles pouvant donner une datation absolue. Citons à ce sujet l'utilisation du tritium (A. RENAUD et al., 1962) et du plomb 210 (E. D. GOLDBERG, 1962) ; il serait aussi possible d'utiliser des niveaux particuliers de retombées radioactives (E. PICCIOTTO et S. WILGAIN, 1963).

Il semble en tout cas souhaitable que l'analyse isotopique soit utilisée parallèlement à d'autres méthodes pour la détermination de l'accumulation de la neige. Les variations de concentration ont de plus l'avantage de se conserver durant de très longues périodes, malgré l'influence possible de transport de matière par sublimation. La faible teneur du coefficient de diffusivité ($1 \cdot 10^{-10}$ cm²/sec ; W. KUHN et M. THURKAUF, 1958) dans la glace rendait ceci prévisible et des mesures effectuées sur un iceberg (W. DANSGAARD, G. NIEF et E. ROTH, 1960) ou à de grandes profondeurs dans le névé (C. LANGWAY, 1962) au Groenland ont effectivement mis en évidence l'existence de variations (1). La datation isotopique serait donc la seule utilisable à partir d'une certaine profondeur puisque le tassement rend alors impossible la caractérisation stratigraphique des couches.

(1) Les mesures de S. EPSTEIN et al. (sous presse) semblent montrer un amortissement de l'amplitude des concentrations isotopiques dans les couches de névé par rapport aux chutes de neige.

CHAPITRE IV

RELATION ENTRE LES TEMPÉRATURES MOYENNES ANNUELLES AU SOL ET LES CONCENTRATIONS ISOTOPIQUES

Nous avons montré dans le chapitre 2 que la teneur isotopique était fonction des conditions de formation des précipitations ; mais cette relation dépend de nombreux paramètres, variant dans chaque cas et qui concernant l'« histoire » des masses d'air.

La datation isotopique (chapitre III) est basée sur la différence des valeurs moyennes saisonnières ; parallèlement à ce phénomène existe une variation géographique des teneurs.

Pour résoudre certains problèmes glaciologiques (chapitre V) il s'est avéré nécessaire de relier les teneurs moyennes caractéristiques de différentes stations avec les températures moyennes annuelles.

4.1. — PRÉLÈVEMENTS

Nous disposons de plusieurs séries collectées en Terre Adélie par des équipes successives, TA XI (M. RENARD) et TA XII (C. LORIOUS, G. RICOU) ; ces échantillons sont complétés par ceux obtenus en Terre de Victoria (C. LORIOUS 1961), les positions géographiques des différentes stations étant indiquées sur la fig. 27.

La représentativité de ces points est bien différente suivant les cas, comme le montre le nombre de mesures pour chaque station.

— TERRE DE VICTORIA :

Les valeurs moyennes calculées sont légèrement différentes de celles précédemment publiées ; ceci est dû au fait que nous n'avons pas tenu compte ici de la caractérisation saisonnière des couches à la suite des conclusions du chapitre III (tableau 19).

— TERRE ADÉLIE :

La série TA XI se compose de deux échantillons prélevés en chaque station à des profondeurs fixes (85 et 185 cm), sur une hauteur de névé de 10 cm.

Dans la série TA XII, les valeurs représentent un échantillonnage continu sur une hauteur de névé équivalant à 1 année (B 11, B 13, B 16, B 17, B 18, B 19) et environ 10 années (A 3, A 5, A 14, A 17, A 28-B 7, A 34-B 10, B 22 bis) d'accumulation ; ces points sont donc représentatifs des concentrations moyennes en chaque station (tableau 20).

4.2. — VARIATION GÉOGRAPHIQUE

Le cycle du deutérium dans la nature (chapitre I, fig. 1) montre que la teneur isotopique des eaux douces peut varier dans un intervalle très large, variation qui est liée de façon schématique à l'échelle du globe avec la latitude (R. P. SHARP 1960, E. PICCIOTTO 1961). Dans des études

locales concernant certains glaciers des régions tempérées et du Groenland, les effets de latitude et d'altitude ont pu être évalués (W. DANSGAARD 1953, S. E. EPSTEIN et R. P. SHARP 1959, R. P. SHARP et al... 1960).

En Antarctique, le problème se présente de façon différente ; ce continent est en effet centré sur le pôle géographique, et dans la partie Est les courbes de niveau sont très grossièrement parallèles à la côte, donc situées à la même latitude.

Les itinéraires de raid en Terre Adélie sont pratiquement perpendiculaires aux courbes de niveau, et le profil altimétrique de la calotte est elliptique (C. LORIUS, 1962). On conçoit donc dans ce cas qu'il soit difficile de séparer l'influence de différents paramètres tels que l'altitude et la latitude.

Variation avec l'altitude : malgré cette réserve, on a étudié la variation des concentrations isotopiques en fonction de l'altitude (fig. 40). L'élévation de chaque station a été déterminée pour la Terre Adélie à partir des profils barométriques (C. LORIUS, 1963) et pour la Terre de Victoria à partir des données de A. STUART et A. HEINE, 1961.

Pour ces deux secteurs, qui sont d'ailleurs contigus, les valeurs obtenues se complètent de façon cohérente en se répartissant autour d'une courbe moyenne. Notons que les points très représentatifs (série TA XII, B 61) présentent une dispersion très faible par rapport à cette courbe ; les deux valeurs les plus élevées en Terre de Victoria qui s'en écartent nettement n'ont été obtenues qu'à partir de 3 échantillons.

Nous avons porté sur la même figure la courbe moyenne obtenue en Terre de la Reine Maud (R. GONFIANTINI et al... 1963) pour l'oxygène 18, après conversion dans nos unités. L'allure des courbes moyennes est comparable, bien que celles-ci soient décalées ; pour une même altitude le névé de la Terre de la Reine Maud contient environ 8 p.p.m. de deutérium en moins.

4.3. — RELATION ENTRE LES TEMPÉRATURES MOYENNES ANNUELLES AU SOL ET LES CONCENTRATIONS ISOTOPIQUES

Il semblait possible d'établir une telle relation puisque les températures moyennes au sol et en altitude, tout au moins pour la partie de l'atmosphère qui nous intéresse, ne sont pas indépendantes (H. WEXLER, 1959).

Pour quelques stations antarctiques, nous avons comparé les températures au sol et au niveau 2 000 m. (fig. 41, tableau 21) ; malgré le faible nombre de valeurs il semble que ces deux variables soient liées effectivement.

4.3.1. Mesure des températures.

Les moyennes annuelles de la température au sol sont mesurées soit de façon continue dans l'air, soit directement dans le névé.

Dans le premier cas, les valeurs ne peuvent être obtenues qu'en stations, dont certaines sont maintenant occupées depuis plusieurs années. Par contre, on ne dispose pas de tels enregistrements pour la plus grande partie du continent Antarctique ; au cours des raids, les températures sont mesurées au fond de forages dont les profondeurs sont généralement supérieures à 10 m. A ce niveau, l'amplitude de l'onde annuelle est en effet de l'ordre de 0,1° C, c'est-à-dire pratiquement négligeable.

Les températures que nous avons adoptées pour les bases proviennent de données climatologiques publiées ; en Terre de Victoria et en Terre Adélie elles sont été extraites de travaux publiés par ailleurs (A. STUART et A. HEINE 1961, C. LORIUS 1963 b).

4.3.2. Relation avec la concentration isotopique.

— *Terre Adélie, Terre de Victoria* : les points représentatifs (fig. 42) se répartissent de façon continue autour d'une courbe moyenne ; la dispersion est plus grande pour les stations ayant une faible valeur représentative, comme nous l'avons déjà noté dans le cas de la variation avec l'altitude.

— *Stations antarctiques* : nous avons pu rassembler des mesures de concentration isotopiques effectuées en plusieurs stations de l'Antarctique (tableau 22). Celles concernant les bases du Pôle, de Byrd, Little America, Ellsworth et Wilkes S.2, nous ont été très obligeamment communiquées par MM. S. EPSTEIN et R. P. SHARP, certains résultats ayant déjà été publiés (1962), et d'autres étant sous-presse.

Les teneurs en O¹⁸ ont été transformées dans nos unités à partir de la relation :

$$D = 1,30 \cdot \frac{O^{18}}{O^{16}} + 161,5, \text{ donnée au chapitre 1.}$$

Nous disposons pour la station du Pôle d'une série de 14 prélèvements qui nous ont été remis par J. WEIHAUPT ; la valeur moyenne de 98,8 trouvée à la suite des mesures faites au Laboratoire des Isotopes Stables de Saclay est très voisine de celle obtenue par conversion des concentrations en O¹⁸ (97,8).

La valeur de Scott Base provient de l'étude stratigraphique des puits, exposée au chapitre III, tandis que celle de la Base Roi Baudouin a été extraite des travaux de R. GONFIANTINI et al... 1963 ; pour Dumont d'Urville on a moyenné les valeurs de deux années obtenues pour les précipitations (chapitre II, tableaux 6 et 7). Toutes ces valeurs ont été portées sur la figure 43.

4.4. — COMPARAISON DES RÉSULTATS OBTENUS DANS LES RÉGIONS POLAIRES

Les résultats de Terre Adélie et Terre de Victoria peuvent aussi être comparés avec quelques mesures effectuées par les Expéditions Soviétiques Antarctiques et des valeurs provenant du Groenland.

4.4.1. Antarctique.

Des échantillons prélevés en 7 stations ont été analysés par une méthode de densité, l'écart par rapport à une eau type étant caractéristique de la teneur globale en isotopes (B. A. SAVELIEV, 1962). A partir des relations données, nous avons calculé la teneur en deutérium en négligeant la proportion d'atomes O¹⁷ et H³ (tableau 23). On obtient ainsi pour le Pôle Sud une teneur de 101 p.p.m., valeur un peu supérieure à celles citées dans le paragraphe précédent (97,8 et 98,8) ; cette différence peut être attribuée à l'incertitude des résultats obtenus par des méthodes d'analyses complètement différentes (voir paragraphe 1.3.).

A partir des coordonnées des stations, les altitudes ont été déterminées sur une carte de l'Antarctique au 1/3 000 000 (Moscou 1961) où elles figuraient ; pour les températures on s'est reporté au travail de I. A. ZOTIKOV (1962) (1).

Nous ne possédons pas d'information concernant la méthode de collection de ces échantillons, c'est-à-dire sur leur représentativité.

4.4.2. Groenland.

W. DANSGAARD (1961), a trouvé une relation linéaire entre les températures et les teneurs en oxygène 18.

A partir des résultats de 9 stations, la relation s'exprime par :

$$\Delta a = 1,70 t + 17,6 ;$$

l'intervalle de température s'étend entre -15 et -30° C et la droite prolongée passe au voisinage du point représentant le Pôle Sud. La transformation en teneurs en deutérium à partir de la relation :

$$\Delta O^{18} = 1,53 D - 212,7 \quad (\text{paragraphe 1.3.3.})$$

conduit à l'équation :

$$D = 1,11 t + 150,5.$$

(1) Les valeurs ainsi trouvées diffèrent de moins de 1° C de celles qui nous ont été communiquées par B. A. SAVELIEV au moment de l'impression.

Nous avons porté sur la figure 43 les différents résultats dont nous disposons :

- Terre Adélie et Terre de Victoria (courbe moyenne) ;
- Stations antarctiques ;
- Groenland.

La courbe représentant les concentrations en Terre Adélie et en Terre de Victoria est relativement bien définie grâce à l'ensemble des données dont nous disposons dans un intervalle de température allant de -10 à -50° C. Par rapport à cette courbe, les valeurs obtenues pour différentes stations antarctiques sont assez dispersées et la relation linéaire trouvée au Groenland nettement décalée.

Décalage et dispersion peuvent être expliqués par les méthodes de prélèvement et d'analyse différentes et l'incertitude dans la détermination des températures. Mais il est aussi probable que la répartition des concentrations soit influencée par d'autres effets géographiques.

Ceci est d'ailleurs tout à fait logique si l'on se souvient des différents paramètres conditionnant la teneur des précipitations énumérées au paragraphe 2.3.1. ; l'« histoire » des masses d'air n'est certainement pas semblable pour les différents secteurs de l'Antarctique.

4.5. — INFLUENCE DE LA RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE DE L'ACCUMULATION

Avec la série de prélèvements effectués en Terre Adélie, nous avons pu mettre en évidence l'influence de paramètres locaux sur la répartition des concentrations isotopiques.

Sur la figure 44, nous avons porté les valeurs des concentrations (série TA XI) et des accumulations (C. LORIUS, 1963 b) en fonction de la distance à la côte.

On observe une décroissance des teneurs isotopiques avec l'augmentation de la distance, ce que l'on pouvait prévoir du fait de la décroissance des températures moyennes. Mais cette courbe présente une série de maxima et minima qui sont en opposition avec les valeurs de l'accumulation. A une zone de forte accumulation correspond une zone de faible teneur en deutérium, phénomène attribuable à l'appauvrissement de la masse d'air en isotopes lourds lorsque la quantité de précipitations croît.

Cet exemple illustre une des causes possibles de la dispersion des points, observée sur la fig. 43 ; une couverture géographique beaucoup plus complète de l'Antarctique serait évidemment nécessaire pour préciser un tel problème.

CHAPITRE V

CARACTÉRISATION DE LA GLACE A PARTIR DU DEUTÉRIUM

En utilisant la teneur en oxygène 18, S. EPSTEIN et R. P. SHARP (1959) ont pu tirer certaines conclusions générales concernant le mode d'écoulement d'un glacier ; W. DANSGAARD (1961) a déterminé au Groenland l'origine de la glace constituant différents icebergs à partir de leur concentration isotopique. Récemment, des prélèvements effectués par les Expéditions Antarctiques Belges en Terre de la Reine Maud, ont conduit à la caractérisation de certains aspects de la variation géographique (E. PICCIOTTO et al., 1962) et à la détermination de l'origine locale de certaines formations, par opposition avec la glace pauvre en isotope lourd provenant de la calotte polaire.

Nous avons pour notre part, publié certains résultats préliminaires sur le même sujet (C. LORIUS et L. MERLIVAT 1963 c) ; l'ensemble de nos recherches nous a permis de caractériser et de différencier la glace côtière en Terre Adélie.

5.1. — ÉTUDE DE LA GLACE DANS LA RÉGION CÔTIÈRE DE TERRE ADÉLIE

5.1.1. Description de la côte.

La côte de Terre Adélie est essentiellement formée par le rebord de l'Inlandsis Antarctique, qui, au voisinage de la base Dumont d'Urville, se présente sous forme d'une falaise de quelques dizaines de mètres plongeant verticalement dans la mer. Son aspect est nettement différent suivant les vitesses d'écoulement de la glace comme l'illustre la fig. 45 : le glacier de l'Astrolabe, large de plus de 5 km, s'avance en mer sur une longueur de l'ordre de 6 km par rapport à la côte moyenne ; celle-ci n'est marquée que par quelques affleurements rocheux qui ne sont vraisemblablement que des îlots (rocher Pointe Géologie par exemple).

Il nous a été ainsi possible d'étudier les deux formes les plus courantes de la côte Antarctique, à l'exception des « ice-shelves », le glacier et la falaise de glace ; un caractère particulièrement intéressant est la présence d'une moraine centrée sur le rocher de Pointe Géologie, comme il en existe plusieurs en Terre Adélie (fig. 46 ; P. BELLAIR, 1961).

5.1.2. Stations d'étude (fig. 47).

Elles ont été réparties sur deux zones où la glace était présente en surface, de façon à couvrir le glacier et le rebord habituel de la calotte glaciaire. Des observations ont été réalisées à quelque distance de la côte, lorsque la glace fait place à une surface de névé. La sélection des emplacements a été grandement facilitée par la reconnaissance préalable faite en hélicoptère.

5.1.3. Observations.

Différentes observations ont été réalisées sur le terrain ; elles comprenaient notamment :

— dimensions des cristaux de glace : leur diamètre varie entre quelques mm et 2 cm, sans qu'il ait été possible de relier ces valeurs aux différentes sortes de glaces observées (bleue, bulleuse...);

— dimensions des inclusions gazeuses : elles vont de quelques 1/10 à quelques mm, sous différentes formes (allongées, sphériques, isolées ou localisées dans certains plans bien définis);

— étude du mouvement de la glace vers la moraine : des résultats antérieurs ont permis d'estimer à environ 500 m/an le déplacement du glacier de l'Astrolabe (A. CORNET, 1960), alors que la falaise se déplace à une vitesse approximative de 10 m/an (P. PERROUD, 1955); des repères ont été mis en place et positionnés au-dessus de la moraine, de façon à nous permettre de connaître la direction et la grandeur de l'écoulement dans cette zone.

Des échantillons ont d'autre part été prélevés en vue de procéder à différentes déterminations (teneur et composition des inclusions gazeuses, pression des bulles, radioactivité...). Nous nous bornerons à exposer ici les résultats obtenus par l'analyse isotopique du deutérium, les seuls ayant conduit à un ensemble de valeurs cohérentes.

5.2. — TENEUR EN DEUTÉRIUM DE LA GLACE.

Une première série d'échantillons a été prélevée au cours de la campagne d'été 1961-62 au sujet de laquelle certains résultats partiels ont déjà été publiés (C. LORIUS et L. MERLIVAT 1963 c); une deuxième série a alors été collectée en 1962-63, par les soins de G. RICOU.

5.2.1. Résultats de la première série de prélèvements.

Les analyses (tableau 24) mettent en évidence le fait que la plupart de ces échantillons ont une teneur voisine de celle des précipitations tombant dans la région bordière de Terre Adélie. La teneur moyenne des chutes de neige à Dumont d'Urville est en effet de 136,7 p.p.m. (cf. § 2.1.) et celle des couches de névé accumulées à A₃ (distance à la côte = 3,5 km) est de 137 p.p.m. (cf. § 3.3.2.). Les seules valeurs faibles observées étaient localisées en deux points (AOA = 105,5 et AOD = 121,7 p.p.m.) et à un degré moindre en C.

Ces résultats préliminaires nous ont amenés à réaliser une étude plus détaillée.

5.2.2. Résultats de la deuxième série de prélèvements.

Le détail des valeurs obtenues par l'analyse isotopique est donné dans le tableau 25, les stations étant positionnées sur la figure 48.

L'existence d'une glace à très faible teneur est ainsi nettement confirmée, l'examen des données et des conditions de prélèvements conduisant à certaines considérations :

— ces faibles valeurs ne peuvent être attribuées à une accumulation due à des chutes de neige isolées. Cette glace est en effet située dans la zone d'ablation, ce qui signifie que la couche neigeuse superficielle disparaît chaque année, par suite de la fusion et de la chasse-neige; de plus, l'homogénéité des résultats et notamment la faible dispersion observée en chaque station comparativement à celle constatée dans les puits, prouve qu'il ne peut s'agir de couches de glace surimposée provenant de la fusion de précipitations locales. Dans ce cas on devrait retrouver une proportion élevée de fortes concentrations et la valeur moyenne devrait être voisine de celle des précipitations à Dumont d'Urville, comme c'est le cas pour la plupart de la glace côtière;

— certaines variations, notées par exemple pour les stations I, IV, XV et XVI, montrent qu'il n'existe pas un mélange total des couches par suite de la fusion; malgré ceci, il est possible qu'une pollution partielle par apport de précipitations locales, puisse exister;

— il semble que la variation de teneur en deutérium se fasse suivant une direction perpendiculaire à la moraine; sur la figure 48, les différentes zones représentant les valeurs en p.p.m. comprises entre 105-110, 110-120, 120-135 et supérieures à 135, sont en effet approximativement parallèles au dépôt morainique superficiel.

5.3. — DÉTERMINATION DE L'ORIGINE DE LA GLACE CÔTIÈRE

La teneur en deutérium des différents échantillons prélevés, montre que la plupart de la glace s'écoulant au voisinage de la base Dumont d'Urville est d'origine purement locale.

Ceci est vrai en particulier pour le glacier de l'Astrolabe. Les points étudiés de part et d'autre de la première ligne de séracs rencontrée à partir de l'île des Pétrels ont tous des valeurs caractéristiques du climat local, bien que la partie de la langue située du côté de la côte, soit formée de glace considérée comme pratiquement morte (A. CORNET, 1960). Sur le glacier lui-même, l'exploration d'une crevasse de 15 m. de profondeur nous a permis de constater la présence de névé alternant avec des couches de glace; le fait que la transformation névé-glace ne soit que peu avancée, confirme les résultats de l'analyse isotopique.

La relation trouvée au chapitre IV, entre les concentrations et les températures moyennes annuelles, nous a conduit à un essai de détermination de l'origine de la glace située vers la moraine de Pointe Géologie.

5.3.1. Définition du bassin d'écoulement.

On peut estimer le sens d'écoulement de la glace à partir des courbes de niveau de la surface et du socle rocheux.

Malgré les nombreuses déterminations effectuées depuis l'A.G.I., le relief sous glaciaire reste encore trop peu connu (C. R. BENTLEY 1962); jusqu'à la latitude de 78° S il n'existe aucune donnée entre les méridiens 140° et 100° E. En Terre Adélie, des profils sismiques (B. IMBERT, 1959) et gravimétriques (G. ROUILLON, 1960) ont montré l'aspect accidenté du relief avec des zones situées alternativement au-dessus et en dessous du niveau de la mer.

En l'absence de données suffisantes pour le socle rocheux, il est logique d'admettre que l'écoulement se fait suivant les directions de plus grande pente. La fig. 49 reproduite à partir de celle publiée par C. R. BENTLEY, 1962, nous permet de définir une zone probable d'écoulement pour la glace en Terre Adélie.

5.3.2. Détermination de l'origine de la glace.

A partir des valeurs de la concentration isotopique, nous pouvons définir l'origine de la glace pour les différentes zones représentées sur la fig. 48. Pour cela, en face de chaque teneur on note la température moyenne annuelle relevée sur la fig. 42, courbe tracée à partir de résultats obtenus dans la même région géographique.

En Terre Adélie, la répartition des températures moyennes annuelles en fonction de la distance à la côte, suivant un axe compris dans la zone probable d'écoulement, est connue (fig. 50, C. LORIUS, 1963 b). Nous pouvons ainsi déterminer les distances parcourues par la glace jusqu'à la température de -41° C; mais l'extrapolation de la courbe des températures au-delà de cette valeur n'est pas possible, l'itinéraire du raid devenant alors pratiquement parallèle aux courbes de niveau, donc aux isothermes.

Pour les points caractérisés par les températures de -45,5 et -46,5° C, nous avons donc utilisé la carte publiée par R. L. CAMERON et R. P. GOLDTHWAIT, 1961 (fig. 51); la direction probable d'écoulement reportée sur celle-ci permet de mesurer approximativement les distances à la côte de ces deux isothermes.

L'ensemble de ces déterminations conduit aux valeurs suivantes :

CONCENTRATION isotopique (D p.p.m.)	TEMPÉRATURE de formation (° C)	DISTANCE à la côte (km)
105	-46,5	800
105-110	-45,5	750
110-120	-41	380
120-135	-30,5	165
> 135	-21	< 45

Il est bien difficile d'indiquer la précision de ces résultats ; les causes possibles d'erreur sont en effet nombreuses :

- ensemble de données de base insuffisantes concernant la topographie superficielle et sous-glaciaire et la distribution des températures ; ceci est vrai en particulier pour les valeurs de $-45,5$ et $-46,5^{\circ}\text{C}$ qui n'ont pu être localisées qu'avec imprécision sur la carte dont nous disposions ;
- imprécision de la relation entre les concentrations et les températures ;
- pollution partielle possible de la glace par des précipitations côtières, ce qui conduirait à des distances parcourues trop faibles ;
- variation éventuelle du climat sous lequel se sont déposées ces couches de glace.

La glace qui a parcouru 800 km s'est formée à une époque reculée, de l'ordre de quelques milliers ou centaines de milliers d'années, au cours de laquelle les conditions climatiques pouvaient être très différentes. La variation des températures dépend par exemple de la modification du profil altimétrique de la calotte polaire ; dans les conditions actuelles, une dénivellée de 100 m en Terre Adélie, correspond à une différence de température de l'ordre de 1°C (C. LORIUS, 1963 a).

Cette variation peut aussi être due à un changement climatique plus général ; W. DANSGAARD (1961) pense que dans ce cas « la distribution géographique des concentrations isotopiques ne doit pas être influencée de façon considérable », pour autant que les variations de température soient semblables sur l'ice-cap et l'océan voisin.

Nous avons résumé dans le tableau 26 les concentrations théoriques calculées à partir des deux hypothèses suivantes :

- C_0 (concentration initiale de la vapeur d'eau) = 140 p.p.m.
 $t_0 = 0^{\circ}\text{C}$, $p_0 = 1\ 000\ \text{mb}$.
- $C_0 = 138$ p.p.m. (1)
 $t_0 = -10^{\circ}\text{C}$, $p_0 = 1\ 000\ \text{mb}$.

Si l'océan et l'ice-cap subissent une évolution semblable, la distribution des concentrations isotopiques est influencée à un degré moindre, mais non pas négligeable, que dans le cas d'une variation relative de la température de l'un par rapport à l'autre.

En considérant par exemple le cas d'une condensation adiabatique, une glace de teneur 124,5 p.p.m., peut être caractérisée par une température moyenne annuelle de -30°C dans les conditions actuelles.

Si le climat de l'Antarctique était plus froid de 10°C , sans qu'il y ait eu variation de la température océanique, la glace formée au même lieu géographique avait une teneur de 109,9 p.p.m. ; dans le cas d'une évolution parallèle des masses d'eau et de l'Antarctique, cette teneur serait de 115,8 p.p.m.

Ces valeurs théoriques ne donnent évidemment que l'allure des phénomènes ; au point actuel de nos connaissances il ne nous est pas possible de discuter de façon précise de l'influence des variations de température sur la détermination de l'origine de la glace.

Il serait par exemple absolument nécessaire d'avoir une idée de l'âge absolu de cette glace avant d'envisager toute évaluation quantitative.

5.4. — DONNÉES SUR L'ÉCOULEMENT DE LA GLACE EN TERRE ADÉLIE

L'analyse isotopique nous permet de tirer certaines conclusions sur l'écoulement de la glace.

— Nous avons vu (paragraphe 5.3.) que la glace était d'origine locale, à l'exception d'une bande relativement étroite située vers la moraine de Pointe Géologie. Cette constatation est importante pour l'évaluation du bilan de masse en Terre Adélie. Nous avons publié (C. LORIUS, 1963 a)

(1) Une diminution de 2 p.p.m. de la teneur initiale de la vapeur d'eau correspond à un abaissement de 10°C de la température de l'eau océanique.

les calculs de différents auteurs, pour lesquels les secteurs d'accumulation étaient définis parfois jusqu'au Pôle Sud, ce qui est en contradiction avec les conclusions de nos mesures ; on pourrait expliquer ainsi le bilan positif généralement trouvé alors que la côte présente des signes de régression. Une prospection systématique des teneurs côtières permettrait seule de déterminer qu'elle est la surface du bassin d'accumulation à prendre en considération.

— Il est remarquable de trouver en surface, dans un intervalle de 200 m, de la glace dont les lieux d'origine varient de près d'un millier de kilomètres, celle provenant de la région la plus éloignée étant le plus près de la côte (1).

— La datation absolue de cette glace permettrait de réaliser un progrès important dans la connaissance de l'équilibre des calottes polaires.

W. DANSGAARD, (1961) a le premier utilisé la méthode du carbone 14 au voisinage de la côte du Groenland, sur des icebergs dont il a déterminé l'origine à partir de l'oxygène 18.

Ce travail particulièrement intéressant a conduit à des mesures d'âges inférieurs à 1 000 ans pour des distances parcourues d'environ 200 km ; seuls deux échantillons (260 et 460 km) ont donné 1 500 et 3 100 ans. Ces résultats paraissent d'autant plus surprenant que les calculs théoriques conduisent à des estimations variant de quelques milliers à plusieurs centaines de milliers d'années.

Il nous a été possible de localiser en surface, de la glace qui provient du plateau antarctique ; la connaissance de son âge apporterait une donnée de base essentielle pour l'étude de l'équilibre de masse du continent.

(1) Une prospection détaillée, non seulement en surface mais aussi en profondeur, permettrait de connaître les trajectoires de la glace lors de son écoulement du centre de l'Antarctique vers la zone côtière ; elle apporterait des informations sur la mécanique du mouvement, actuellement très mal connue.

CHAPITRE VI

L'UTILISATION DES ISOTOPES STABLES EN GLACIOLOGIE

Les résultats des mesures effectuées sur différents échantillons d'eau, de neige, de névé et de glace provenant de l'Antarctique, nous ont permis d'étudier les relations existant entre la teneur en deutérium et certains phénomènes naturels tels que :

- les précipitations saisonnières ;
- la structure de l'atmosphère et en particulier les températures régnant au sein des masses nuageuses ;
- la distribution géographique des précipitations ;
- la température moyenne annuelle au sol.

Nous en avons déduit des conclusions pratiques pour l'étude du déplacement de la chasse-neige, la mesure de l'accumulation de la neige, la détermination de l'origine de la glace et de l'alimentation des glaciers s'écoulant dans la zone bordière de l'Antarctique.

Les isotopes stables, deutérium et oxygène 18, sont un moyen nouveau d'investigation qui ouvre d'immenses possibilités, en particulier dans le domaine de la glaciologie.

Sans en faire un exposé exhaustif, nous nous contenterons de citer ici quelques problèmes importants qui peuvent être abordés par cette méthode, à partir d'échantillons représentant un volume d'eau de quelques cm³ seulement.

Bien que les phénomènes soient plus compliqués dans les glaciers alpins par suite de la fusion estivale, de nombreuses applications sont certainement possibles, comme l'étude des bilans hydrologiques qui touche à des problèmes pratiques d'actualité (J. C. FONTES et al., 1963).

6.1. — ÉTUDE DU BILAN DE MASSE ET DE SON ÉVOLUTION

Un des problèmes essentiels qui se pose au glaciologue est l'évolution des masses de glace, dont l'importance est telle qu'elle influence les conditions de vie sur notre globe. La connaissance des paramètres qui conditionnent cette évolution est un problème difficile, pour la solution duquel les isotopes stables apportent des possibilités complémentaires et parfois uniques. Citons en quelques exemples :

— *Accumulation de la neige* : dans les couches de surface, la datation saisonnière isotopique est pour le moins aussi valable que les méthodes actuelles utilisées ; à partir d'une certaine profondeur, elle devient la seule possible, c'est-à-dire qu'elle permettrait d'obtenir des données sur toute la formation de la calotte antarctique (chap. III).

De plus, la relation qui existe entre la teneur isotopique et la structure de l'atmosphère (température en particulier) pourrait permettre d'étudier les conditions de formation des précipitations qui ne sont connues que de façon imparfaite actuellement ; bien sûr notre travail dans ce domaine (chap. II) ne représente qu'une tentative grossière, mais à partir de ce principe une étude récente (L. FACY et al., 1963) a permis de connaître les trajectoires successives d'un grêlon au sein d'une masse nuageuse au cours de sa formation.

— *Ablation* : un paramètre qui joue un rôle pratiquement inconnu dans l'équilibre de masse de l'inlandsis est la fusion sous-glaciaire ; on ne sait pas actuellement si la glace au contact du socle rocheux est à l'état solide ou liquide. La teneur en deutérium de l'eau de mer est de l'ordre de 160 p.p.m. et si l'on estime à 105 p.p.m. la concentration moyenne des glaces de l'Antarctique (valeur correspondant à une température de l'ordre de -45°C), l'existence et l'importance de l'apport d'eau de fusion pourrait être déduites de mesures de concentrations et de courants ; les masses d'eau d'origine polaire pourraient ainsi être étudiées au moyen de ce traceur naturel. Cette méthode est moins sensible que la mesure des salinités mais elle n'est pratiquement pas influencée par la formation et la fusion de la glace de mer puisque le facteur de séparation α liquide/solide vaut environ 0,98 ; ce fait a été confirmé par des mesures directes (I. FRIEDMAN et al., 1961), ce qui montre que l'on pourrait différencier ainsi l'origine de l'eau douce.

Si la présence d'eau de fusion a pu être caractérisée de façon nette au Groenland dans le fjord du Kangerdlugssuaq (L. BERTHOIS, 1963), les mesures entreprises (deutérium, salinité, températures) en Terre Adélie n'ont pas pour l'instant montré son existence ; ceci rejoint les conclusions d'autres travaux (T. TRANI et al., 1960).

— *Dynamique de la glace* : la teneur en isotopes a été utilisée (chap. V) pour déterminer l'origine de la glace côtière ; elle doit permettre d'étudier les lois de l'écoulement à grande échelle des calottes polaires, pour lequel il n'existe actuellement aucune mesure. Il est en effet fondamental de connaître le temps mis par la neige s'accumulant à l'intérieur du continent pour parvenir à la côte. La distance parcourue étant connue à partir de la teneur en deutérium, l'âge de la glace peut être déterminé par exemple par la méthode du Carbone 14 ; il serait particulièrement intéressant de pouvoir établir en Antarctique une relation entre l'âge de la glace et sa teneur en oxygène 18, telle qu'elle a été trouvée au Groenland (W. DANSGAARD, 1961). Une mesure relativement simple effectuée sur quelques cm^3 d'eau permettrait alors la datation approchée de la glace, à l'échelle des milliers d'années.

Il a été suggéré (E. ROTH, 1961) qu'une datation absolue pouvait même être envisagée à partir de l'amortissement de la courbe saisonnière des concentrations dû à la diffusion des atomes dans la glace ; la longueur moyenne de diffusion serait de 10 cm pour une durée d'environ 30 000 ans.

Dans le même domaine, on pourrait obtenir des informations sur le mode d'écoulement et la trajectoire des particules de glace comme l'ont montré certaines études préliminaires effectuées sur des glaciers tempérés (S. EPSTEIN et R. P. SHARP, 1959) ; ce problème est de plus lié à la répartition verticale des vitesses d'écoulement.

Les études du bilan de masse effectuées dans différents secteurs de l'Antarctique se heurtent au problème de la détermination du secteur d'accumulation à considérer ; ceci pourrait être résolu de façon rigoureuse par la prospection isotopique de l'origine de la glace.

Une application simple en est par exemple l'étude de l'« ice-shelf » de Ross dont la surface est d'environ 550 000 km^2 et l'altitude de quelques centaines de mètres. Il serait aisé de différencier dans ce cas l'alimentation due aux glaciers formés à plus de 2 000 m d'altitude de celle due aux précipitations locales.

6.2. — ÉTUDE DES VARIATIONS CLIMATIQUES

Les calottes polaires se sont formées par la superposition de couches de neige qui se sont entassées au cours des âges ; en l'absence de fusion, la glace contient donc sous différentes formes les empreintes des conditions terrestres et extraterrestres, à l'abri des sources de pollution.

Il n'est guère possible d'évaluer actuellement la durée que peuvent représenter les 4 000 m d'archives contenues dans l'Antarctique, et pour laquelle la concentration isotopique des couches de glace permettrait de reconstituer l'histoire climatique continue ; au rythme actuel de l'accumulation (0,1 m/an) cette épaisseur s'est formée en 40 000 ans, ce qui est un minimum puisque la glace s'est écoulée vers le bord dans le même temps.

Cette étude poserait évidemment de nombreux problèmes pour l'obtention des échantillons

et l'exploitation des données ; certains aspects en ont été évoqués dans le chapitre V, mais il semble certain qu'un jour sera utilisé ce thermomètre isotopique dont la précision théorique est de l'ordre de $0,1^{\circ}\text{C}$.

Certains résultats préliminaires (S. EPSTEIN et al., sous presse) semblent indiquer un réchauffement de 2 à 4°C à la Station Byrd, par rapport à la période durant laquelle s'est accumulée la neige qui se trouve maintenant à la profondeur de 288 m.

Le présent travail n'apporte qu'une contribution modeste face à l'ampleur des possibilités d'étude qui existent dans l'Antarctique, pour lesquelles les isotopes seront certainement un outil essentiel d'investigation. Nous espérons qu'ils permettront d'atteindre à des conclusions débordant nettement du cadre de la glaciologie pour intéresser d'autres disciplines, à l'échelle de notre globe. Mais, sur ce continent difficile et si mal connu, bien des années de travail seront encore nécessaires.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- BAUER A. 1961. — *Nouvelle estimation du volume de la glace de l'Indlandsis Antarctique* — A.I.H.S. pub. n° 55, p. 19-23.
- BELLAIR P. 1961. — *La bordure côtière de la Terre Adélie* — Terre Adélie, campagne d'été 1960, Expéditions Polaires Françaises — Pub. n° 218.
- BENSON C. S. 1962. — *Stratigraphic studies in the snow and firn of the Greenland Ice Sheet* — S.I.P.R.E. Research Report 70.
- BENTLEY C. R. 1962. — *Glacial and subglacial geography of Antarctica* — Geophysical monograph 7 — Antarctic research.
- BERTHOIS I. — *Sédimentologie du Kangerdlugssuaq* — Meddelelser om Groenland — sous presse.
- BOATO G. 1960. — *Isotope fractionation process in nature* — Summer course on nuclear geology — Varenne.
- BOATO G. and TOGLIATTI V. 1960. — *Seasonal variation in the O¹⁸ content of meteoric waters in the upper Mediterranean basin* — Summer course on nuclear geology — Varenne.
- BOTTER R., LORIUS C. et NIEF G. 1960. — *Sur la teneur en deutérium des précipitations en Terre de Victoria, Antarctique* — Comptes rendus Ac. Sc. t. 251, p. 573.
- BOTTER R., LORIUS C. et NIEF G. 1961. — *Sur la datation des couches de névé dans l'Antarctique à partir de leur concentration de deutérium* — Comptes rendus Ac. Sc. t. 252, p. 437-439.
- CAMERON R. L. and GODLTHWAIT R. P. 1961. — *The U.S. I.G.Y. contribution to Antarctic Glaciology* — Colloque sur la Glaciologie antarctique — Pub. n° 55 — A.I.H.S.
- CORNET A. 1960. — *Déplacement du glacier de l'Astrolabe et bilan de masse en Terre Adélie* — Comptes rendus Ac. Sc. t. 251, p. 404.
- CRAIG H. 1961. — *Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen 18 in natural waters* — Science, vol. 133, p. 1833.
- DANSGAARD W. 1953. — *The abundance of O¹⁸ in atmospheric water and water vapour* — Tellus 5, p. 461.
- DANSGAARD W., NIEF G. and ROTH E. 1960. — *Isotopic distribution in a Greenland iceberg* — Nature — Vol. 185, p. 232.
- DANSGAARD W. 1960. — *O¹⁸ in atmospheric waters* — Summer course on nuclear geology — p. 150 — Varenne.
- DAANSGARD W. 1961. — *The isotopic composition of natural waters with special reference to the Greenland Ice Cap* — Meddelelser om Groenland. Bd. 165, Nr 2.
- ENHALT D., KNOTT K., NAGEL J. F. and VOGEL J. C. 1962. — *Deuterium and oxygen 18 in rain water* — Symposium on trace gases and natural and artificial radioactivity in the atmosphere — Utrecht.
- EPSTEIN S. and MAYEDA T. 1953. — *Variations of the O¹⁸ content of waters from natural sources* — Geochim. et Cosmochim. Acta. p. 213.
- EPSTEIN S. 1956. — *Variations of the O¹⁸/O¹⁶ ratios of fresh water and ice* — Nat. Ac. sc. Nucl. Sci. Ser. Rep. n° 19, p. 20.
- EPSTEIN S. and BENSON C. 1959. — *Oxygen isotope studies* — Trans. Am. Geophysic. Union. 40 — p. 81-84.
- EPSTEIN S. and SHARP R. P. 1959. — *Oxygen isotope variations in the Malaspina and Sashatchewan glaciers* — Journ. Geol. vol. 67, n° 1.
- EPSTEIN S., SHARP R. P. and GODDARD I. — sous presse, *Oxygen isotope ratios in antarctic snow, firn and ice*, Journal of Geology.
- FACY L., MERLIVAT L., NIEF G. et ROTH E. 1963. — *Etude de la formation d'un grêlon par une méthode d'analyse isotopique* — J. Geophy. Research, vol. 68, n° 13.
- FONTES J. C., GLANGRAUD L., GONFIANTINI R. et TONGIORGI E. 1963. — *Composition isotopique et origine des eaux et gaz thermaux du Massif Central*, Comptes rendus Ac. Sc., t. 256, p. 472.
- FRIEDMAN I. 1953. — *Deuterium content of natural waters and other substances*, Geochim. et Cosmochim. Acta., 4, p. 89.

- FRIEDMAN I. and SMITH R. I. 1958. — *The deuterium content of water in some volcanic glasses* — Geochim. et Cosmochim. Acta, 15, 218.
- FRIEDMAN I., SCHOEN B. and HARRIS J. 1961. — *The deuterium concentration in Arctic sea ice* — J. Geophys. Research, vol. 66, n° 6.
- GOLDBERG E. C. 1962. — *Geochronology with lead 210* — Symposium on radioactive dating — I.A.E.A. — Athènes.
- GONFIANTINI R., TOGLIATTI V., de BREUCK W., PICCIOTO E. and TONGIORGI E. 1963. — *Snow stratigraphy and oxygen isotope variations in the Glaciological pit of king Baudoin Station, Queen Maud Land, Antarctica* — Nature — Vol. 197, p. 1096.
- HANDBOOK OF CHEMISTRY AND PHYSICS — 1960 — n° 42, p. 450.
- INSTITUT DE RECHERCHES ARCTIQUES ET ANTARCTIQUES 1959. — *Expéditions soviétiques dans l'Antarctique* — Vol. 4.
- IMBERT B. 1959. — *Détermination de l'épaisseur de glace en Terre Adélie* — Comptes rendus Ac. Sc. t. 249.
- KIRSCHENBAUM J. 1951. — *Physical properties and analysis of heavy water*, New-York, 438 p.
- KUHN W. und THURCKAUF M. 1958. — *Isotopentrennung beim gefrieren von wasser un diffusionkonstanten von D und O¹⁸ im eis*. Helvetica chimica Acta — Vol. XLII, fasc. IV, p. 938.
- KOTLYAKOV V. M. 1961. — *Couverture neigieuse de l'Antarctique et son role dans la glaciation moderne du continent* — Glaciology I.G.V. n° 7.
- LANGWAY C. 1962. — *Some physical and chemical investigations of a 411 meters deep Greenland ice core and their relation ship to accumulation* — Symposium d'Obergurgl. A.I.H.S., pub. n° 58, p. 273-285.
- LOEWE F. 1962. — *On the mass economy of the interior of the Antarctic Ice Cap* — J. Geophys. Research — Vol. 67, n° 13, p. 5171.
- LORIUS C. 1961. — *Concentration en deutérium des couches de névé dans l'Antarctique* — Annales Géophysique, t. 17, n° 4, p. 378-387.
- LORIUS C. 1962. — *Contribution to the knowledge of the Antarctic Ice Sheet — A synthesis of Glaciological measurement in Terre Adélie* — Journal of Glaciology — Vol. 4, n° 31.
- LORIUS C. 1963 a. — *Contribution à la connaissance de l'Inlandsis Antarctique* — Glaciologie en Terre Adélie — A.G.I., C.N.R.S., sous presse.
- LORIUS C. 1963 b. — *Terre Adélie — Campagne d'été 1961-62 — Glaciologie E.P.F.* — sous presse, n° 241.
- LORIUS C. et MERLIVAT L. 1963 c. — *Sur la caractérisation de la glace des Inlandsis à partir de la teneur en deutérium* — Comptes rendus Ac. Sc., t. 256, p. 475.
- MERLIVAT L., BOTTER R. et NIEF G. 1962. — *Fractionnement isotopique au cours de la distillation de l'eau — 12^{me} réunion annuelle, société de Chimie-Physique.*
- MELLOR M. 1961. — *The Antarctic ice sheet* — Cold regions science and engineering — report 1-B.
- NAKAYA U. 1954. — *Formation of snow crystals* — S.I.P.R.E. — research paper 3.
- NIEF C. et BOTTER R. 1958. — *Analyse de composés hydrogénés simples au spectromètre de masse* — advances in Mass Spectrometry, Pergamon Press, London.
- PERROUD P. 1955. — *Astronomie — Géodésie — Cartographie — Terre Adélie, 1951-1952. Expéditions Polaires Françaises.*
- PHYSICS OF PRECIPITATIONS 1960. — American Geophysical Union Monograph, n° 5.
- PICCIOTO E., de MAERE X. and FRIEDMAN I. 1960. — *Isotopic composition and temperature of formation of Antarctic snows* — Nature 187, p. 857.
- PICCIOTO E. 1961. — *Quelques résultats scientifiques de l'Expédition Antarctique Belge, 1957-1958* — Ciel et Terre, n° 4, 5, 6.
- PICCIOTO E., TONGIORGI E., GONFIANTINI R., TOGLIATTI V. and de BREUCK W. 1962. — *Geographical variations of oxygen 18 — oxygen 16, ratio in surface snow and ice from Queen Maud Land, Antarctica* — Nature, Vol. 197, n° 4872, p. 1096.
- PICCIOTO E. et WILGAIN S. 1963. — *Produits de fission dans les neiges antarctiques — Un horizon repère pour les mesures d'accumulation.* J. of Geophys. Research — sous presse.
- RENAUD A., SCHUMACHER E., JUGHES B., MUHLEMANN C. and OESCHGER H. 1962. — *Tritium variations in Greenland ice* — Symposium on trace gases and natural and artificial radioactivity in the atmosphere — I.U.G.G., W.M.O. — Utrecht.
- RIESENFELD E. H. and CHANG T. L. 1936. — *Uber den Gehalt an HDO und H₂ O¹⁸ in Regen und Schnee* — Dent. chem. Geo. — Ber 69, p. 1305.
- ROTH E. 1961. — *L'age et l'origine des Iceberg du Groenland* — Conférence C.E.A., n° 65.
- ROTH E. 1963. — *L'utilisation des mesures de teneur en deutérium pour l'étude des phénomènes météorologiques et géologiques* — Journal Chimie Physique, t. 60, n°s 1-2, p. 339.
- ROUILLON G. 1960. — *Anomalies de la pesanteur et profil de la calotte glaciaire en Terre Adélie* — Comptes rendus Ac. Sc., t. 251.
- SAVELIEV B. A. 1962. — *Particularités de la constitution de la couche de glace de l'Antarctique* — Vestnik de l'Université de Moscou. Série 4 — Géologie — n° 3.
- SCHVYT V. 1958. — *Snow studies inland* — Norwegian British Swedish Antarctic Expedition 1949-1952 — Scientific results — vol. 4 — Glaciology II.
- SHARP R. P. 1960. — *Glaciers* — Condon Lectures — Oregon.
- SHARP R. P., EPSTEIN S. and VIDZIUNAS I. 1960. — *Oxygen isotope ratios in the Blue Glacier, Olympic mountains, Washington, U.S.A.*, J. Geophys. Research. Vol. 65, n° 12.
- SHARP R. P. and EPSTEIN S. 1962. — *Comments on annual rates of accumulation in West Antarctica* — A.I.H.S. Commission des neiges et glaces, pub. n° 58 — Obergurgl.
- SHOUMSKY P. A. 1955. — *Principes de Glaciologie structurale* — Annales du Centre d'Études et de Documentation Paléontologique, n° 22.
- STUART A. W. and HEINE A. J. 1959. — *Glaciological note* — U.S.A.R.P., memo m° 2, Deep snow pit and core.
- STUART A. W. and HEINE A. J. 1961. — *Glaciology, Victoria Land Traverse, 1959-1960* — Institute of Polar studies — Ohio State University — Report 968-1.
- TITANI T., HORIBE Y. and KOBAYAKAWA M. 1961. — *Deuterium abundance of natural waters in the Antarctic* — Antarctic record, n° 11, p. 138.
- U.S. NAVY HYDROGRAPHIC OFFICE 1957. — *Oceanographic Atlas of the Polar seas — Antarctic.*
- VAITAT B. et GILBERT J. 1961. — *Météorologie, Données climatiques de la station Dumont d'Urville* — A.G.I., C.N.R.S., série II, fasc. I.
- WEICKMANN H. 1949. — *Die eisphase in der atmosphere* — Bericht deutsch Wetterdienst — U.S., Zone n° 6.
- WEXLER H. 1959. — *Seasonal and other temperature changes in the Antarctic atmosphere* — Quart. Jour. Roy. met. Soc. vol. 85, n° 365.
- WEXLER H. 1961. — *Ice budgets for Antarctica and changes in sea-level* — Journal of Glaciology — vol. 3, n° 29.
- ZOTIKOV J. A. 1962. — *Heat regime of the Central Antarctica Glacier* — The Antarctic, Academy of Sciences of the U.S.S.R., p. 27.

LISTE DES TABLEAUX

1. — Isotopes de l'hydrogène et de l'oxygène.
2. — Facteurs de séparation du deutérium.
3. — Précipitations : teneurs théoriques en deutérium.
4. — Base Dumont d'Urville 1961 - Précipitations.
5. — Base Dumont d'Urville 1962 - Précipitations.
6. — Base Dumont d'Urville 1961 - Teneur moyenne des précipitations.
7. — Base Dumont d'Urville 1962 - Teneur moyenne des précipitations.
8. — Dumont d'Urville - Valeurs moyennes mensuelles de la température en altitude (° C).
9. — Stations russes 1958 - Sondages moyens mensuels.
10. — Dumont d'Urville 1961 - Radiosondages dans le cas de précipitations.
11. — Mirny 1958 - Sondages dans le cas de précipitations.
12. — Mirny 1956 - Radiosondages mensuels - 2 000 m.
13. — Base Dumont d'Urville 1961 - Conditions de formation des précipitations.
14. — Station A 3 (B 1).
15. — Station A 28 (B 7).
16. — Station B 61.
17. — Station NZGS 15.
18. — Station NZGS 16.
19. — Terre de Victoria : teneur en deutérium du névé.
20. — Terre Adélie : teneur en deutérium du névé.
21. — Stations antarctiques : températures moyennes annuelles au sol et à + 2 000 m.
22. — Stations antarctiques : teneurs en deutérium.
23. — Mesures soviétiques dans l'Antarctique.
24. — Étude de la glace côtière en Terre Adélie - 1962.
25. — Étude de la glace côtière en Terre Adélie - 1963.
26. — Concentrations théoriques pour des conditions climatiques variables.

Tableau 1

ISOTOPES DE L'HYDROGÈNE ET DE L'OXYGÈNE

NOMBRE ATOMIQUE	ISOTOPE	MASSE ATOMIQUE	CONCENTRATION NATURELLE
1	H ¹	1.00813	99,9839 0,0161
	H ²	2.01471	
	H ³	3.01605	
8	O ¹⁴		99,76 0,04 0,20
	O ¹⁵	15.0078	
	O ¹⁶	16.000000	
	O ¹⁷	17.00450	
	O ¹⁸	18.0049	
	O ¹⁹	19.00938	

Tableau 2

FACTEURS DE SÉPARATION DU DEUTÉRIUM

t° C	$\frac{(D/H) \text{ liquide}}{(D/H) \text{ vapeur}}$	$\frac{(D/H) \text{ solide}}{(D/H) \text{ vapeur}}$
- 40	1,179	1.205
- 30	1,157	1.183
- 25	1,147	1.173
- 20	1,138	1.162
- 15	1,128	1.152
- 10	1,120	1.142
- 5	1,112	1.132
0	1,105	1.122
+ 5	1,098	
+ 10	1,091	
+ 15	1,084	
+ 20	1,078	
+ 25	1,072	
+ 30	1,068	

Tableau 3

PRÉCIPITATIONS : TENEURS THÉORIQUES EN DEUTÉRIUM

TEMPÉRATURE (° C)	ADIABATIQUE		PRESSION CONSTANTE	
	Condensation	Sublimation	Condensation	Sublimation
— 0				
— 2	153,1	154,9	152,5	154,2
— 4	151,6	152,9	150,4	151,4
— 6	150,1	150,7	148,2	148,5
— 8	148,4	148,5	146	145,7
— 10	146,7	146,1	143,7	142,6
— 12	144,9	143,96	141,4	139,4
— 14	143,0	140,9	139	136,2
— 16	141,0	138,2	136,5	132,9
— 18	138,9	135,3	133,9	129,5
— 20	136,8	132,4	131,3	126,1
— 22	134,5	129,4	128,6	122,6
— 24	132,1	126,3	125,7	119
— 26	129,6	123,2	122,8	115,4
— 28	127,1	119,9	119,9	111,7
— 30	124,5	116,5	116,9	108
— 32	121,8	113,1	113,8	104,2
— 34	118,9	109,7	110,7	100,5
— 36	116,0	106,2	107,5	96,7
— 38	113,0	102,6	104,2	92,8
— 40	109,9	99	100,8	89

Co = 140 p.p.m.

Po = 1 000 mb.

Tableau 4

BASE DUMONT D'URVILLE 1961 — PRÉCIPITATIONS

N° échantillon	DATE	HEURE locale (TU + 10)	DEUTÉRIUM p.p.m.	OBSERVATIONS
1	15.3.61	11.30	139,2	Neige et chasse-neige.
2	15.3.61	15.30	138,1	
5	8.4.61	07.30	134,9	Neige certaine avec léger chasse-neige commençant à se manifester.
6	8.4.61	07.30	136,3	
7	10.4.61	11.00	138,9	Neige tombant depuis 07.20 loc. Vent faible aucun chasse-neige.
8	10.4.61	11.00	139,4	
9	23.4.61	11.00	111,3	Neige et chasse-neige.
10	23.4.61	11.00	112,0	
13	5.5.61	14.00	123,2	Neige sans chasse-neige.
14	5.5.61	14.00	120,3	
15	7.5.61	12.00	143,9	Neige sans chasse-neige.
19	22.5.61	18.00	132,0	Neige probable car ciel de corps avant début chasse-neige.
20	22.5.61	18.00	128,1	
23	20.6.61	12.00	135,3	Neige et chasse-neige modérés.
24	20.6.61	12.00	135,3	
25	1.7.61	10.00	132,7	Neige sans chasse-neige.
26	1.7.61	10.00	132,7	
27	17.7.61		141,8	Neige sans chasse-neige.
28	17.7.61		139,7	
29	22.7.61	11.40	130,4	Neige sans chasse-neige.
30	22.7.61	11.40	130,3	
32	24.7.61	09.00	140,6	
33	31.7.61	09.10	138,1	Neige suivie de chasse-neige, début chasse-neige 0800, neige à partir 0300.
34	31.7.61	09.10	138,8	
35	5.8.61	14.00	133,9	Neige et chasse-neige violent depuis le 4 Août à 1800.
36	5.8.61	14.00	134,0	
37	6.8.61	20.00	134,6	Neige avec faible chasse-neige.
38	6.8.61	20.00	134,5	
39	11.8.61	13.00	134,9	Neige et chasse-neige.
40	11.8.61	13.00	133,0	
45	21.8.61	03.00	136,9	Neige et chasse-neige modéré, flocons visibles.
46	21.8.61	14.30	137,9	
47	3.9.61	09.00	137,7	Neige depuis la veille.
48	3.9.61	09.00	135,3	
49	5.9.61	03.00	145,0	Neige et chasse-neige faible à modéré.
50	5.9.61	03.00	142,6	
51	8.9.61	03.00	140,0	Neige (cristaux bien formés) et chasse-neige faible.
52	8.9.61	03.00	139,4	
53	12.10.61	12.15	135,4	Neige + chasse-neige.
54	12.10.61	12.15	133,6	
55	21.10.61	18.00	142,5	Neige sans chasse-neige.
56	21.10.61	18.00	142,2	
57	22.10.61	08.45	138,4	Neige et chasse-neige.
58	22.10.61	08.45	137,8	

N° échantillon	DATE	HEURE locale (TU + 10)	DEUTÉRIUM p.p.m.	OBSERVATIONS
59	26.10.61	06.45	138,6	Neige et chasse-neige.
60	26.10.61	06.45	134,7	
67	19.11.61	21.00	133,6	Neige et chasse-neige mêlés modéré à fort.
68	19.11.61	21.00	136,8	
69	21.11.61		141,1	Neige sans chasse-neige.
70	21.11.61		141,0	
71	23.11.61		149,9	Neige de 0345 à 0630 ; de 1520 à 25 et à partir de 2035.
72	23.11.61		143,5	
73	29.11.61	16.00	128,9	Neige et chasse-neige.
74	29.11.61	16.00	128,9	
76	17.12.61	16.00	145,9	Neige et chasse-neige faible au sol (neige nettement prédominante.)
77	26.12.61		148,9	Averse de neige suivie de neige d'intensité faible à modéré.
78	26.12.61		148,8	
79	30.12.61	09.00	138,2	Neige tombée entre 2100 et 0300.
80	30.12.61	09.00	137,9	
81	31.12.61	16.30	136,8	Neige très faible le matin puis modérée l'après-midi. Chasse-neige modéré.
82	31.12.61	16.30	136,7	
83	5.01.62	20.30	142,2	Neige faible continue le matin et dans l'après-midi.
84	5.01.62	20.30	130,5	
85	01.62		130,4	
P ₁ (1)	26.12.61	18.15	146,8	Neige.
P ₁	26.12.61	20.00	145,6	
P ₃	30.12.61	> 0.00	132,9	Neige.
P ₄	5.01.62	de 2 à 12	145,5	Neige.
P ₅	5.01.62	de 15 à 21	139,5	
P ₆	01.62		143,1	Précipitations d'origine P ₄ et P ₅ .
P ₇	01.62		142,1	
P ₈	15.01.62	< 16.00	137,8	Neige.

(1) Ces échantillons ont été prélevés à quelques km. de la base Dumont d'Urville.

Tableau 5

BASE DUMONT D'URVILLE 1962 — PRÉCIPITATIONS

N° échantillon	DATE	HEURE locale	DEUTÉRIUM p.p.m.	OBSERVATIONS
20	6.2.62		143,5	Précipitations.
21	26.3.62		143,5	»
22	28.3.62		148,4	»
23	31.3.62		148,2	»
24	6.5.62		136,4	Précipitations et chasse-neige fort.
25	14.5.62	18 h	135,1	Précipitations.
26	16.5.62		134,8	»
27	26.5.62		145,5	»
28	30.6.62		134,7	Chasse-neige fort + traces de précipitations.
29	3.7.62		130,1	Précipitations.
30	6.7.62		133,8	»
31	7.7.62		135,6	Précipitations + traces de chasse-neige.
32	9.7.62	18 h	136,2	Précipitations.
33	10.7.62	9 h	136,1	Précipitations.
34	10.7.62	19 h	133,6	»
35	12.7.62	début journée	139,4	»
36	12.7.62	fin journée	136,2	»
37	15.7.62	début journée	133,0	Précipitations.
38	15.7.62	fin journée	140,6	Précipitations.
39	14.8.62	fin journée	135,7	Précipitations.
40	22.8.62		133,1	Chasse-neige et précipitations.
41	2.9.62	matin	129,2	Précipitations.
42	3.9.62	matin	137,9	Précipitations.
43	3.9.62	soir	143,1	Précipitations avec chasse-neige fort.
44	15.9.62		126,0	Précipitations.
45	17.9.62		126,8	Précipitations et chasse-neige.
46	23.10.62	soir	138,6	Précipitations.
47	25.10.62	soir	134,6	»
48	6.1.63		134,0	»

Tableau 6

BASE DUMONT D'URVILLE 1961 — TENEURS MOYENNES DES PRÉCIPITATIONS (p.p.m.)

MOIS		Mars 1961	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janvier 1962
TOUS LES CAS	Valeur p.p.m.	138,7	128,8	131,9	135,3	136,6	135,5	140,0	137,9	138,0	141,5	139,3
	Nombre de cas	2	6	5	2	9	8	6	8	8	10	8
PRÉCIPITA- TIONS SEULES	Valeur p.p.m.	—	137,4	132,9	—	134,6	—	136,5	142,4	143,9	141,5	139,3
	Nombre de cas	0	4	3	0	7	0	2	2	4	7	5

Tableau 7

BASE DUMONT D'URVILLE 1962 — TENEURS MOYENNES DES PRÉCIPITATIONS (p.p.m.)

MOIS	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre
Valeur p.p.m.	143,5	146,7	—	138	134,7	135	134,4	130,6	136,6
Nombre de cas	1	3	0	4	1	10	2	5	2

Tableau 8

DUMONT D'URVILLE — VALEURS MOYENNES MENSUELLES DE LA TEMPÉRATURE EN ALTITUDE (° C)

SURFACE isobare mb	ANNÉE	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
850	1957				— 15 ⁰⁴	— 19 ⁰³	— 21 ⁰⁸	— 22 ⁰⁰	— 20 ⁰⁶	— 18 ⁰⁷	— 17 ⁰²	— 12 ⁰⁸	— 7 ⁰⁴
	1958	— 7 ⁰⁷	— 10 ⁰⁷	— 11 ⁰⁷	— 14 ⁰²	— 14 ⁰⁸	— 26 ⁰²	— 16 ⁰⁰	— 18 ⁰⁵	— 26 ⁰⁷	— 19 ⁰⁰	— 14 ⁰⁷	— 10 ⁰²
	1961		— 10 ⁰⁴	— 13 ⁰⁷	— 16 ⁰¹	— 17 ⁰¹	— 19 ⁰¹	— 19 ⁰²	— 19 ⁰⁰	— 21 ⁰⁰	— 17 ⁰⁹	— 15 ⁰⁴	— 11 ⁰⁷
	1962	— 10 ⁰⁰	— 9 ⁰⁵	— 11 ⁰⁰	— 17 ⁰⁷	— 19 ⁰⁸	— 20 ⁰²	— 20 ⁰⁵	— 19 ⁰⁰	— 17 ⁰²	— 15 ⁰¹	— 12 ⁰⁸	— 9 ⁰⁹
700	1957				— 18 ⁰³	— 20 ⁰⁹	— 24 ⁰¹	— 21 ⁰⁸	— 21 ⁰⁶	— 20 ⁰⁵	— 19 ⁰³	— 17 ⁰¹	— 14 ⁰⁷
	1958	— 14 ⁰²	— 16 ⁰⁴	— 17 ⁰⁰	— 18 ⁰⁹	— 17 ⁰⁵	— 26 ⁰⁸	— 19 ⁰⁵	— 22 ⁰²	— 26 ⁰⁹	— 21 ⁰⁵	— 18 ⁰³	— 16 ⁰⁹
	1961		— 16 ⁰³	— 18 ⁰⁷	— 19 ⁰⁴	— 20 ⁰⁰	— 21 ⁰⁷	— 21 ⁰²	— 20 ⁰⁵	— 23 ⁰¹	— 21 ⁰⁵	— 20 ⁰¹	— 18 ⁰⁶
	1962	— 17 ⁰⁴	— 14 ⁰³	— 16 ⁰⁶	— 20 ⁰⁹	— 23 ⁰¹	— 20 ⁰¹	— 20 ⁰⁹	— 21 ⁰⁶	— 20 ⁰¹	— 18 ⁰⁵	— 16 ⁰¹	— 16 ⁰⁸
500	1957				— 31 ⁰²	— 34 ⁰⁴	— 36 ⁰⁷	— 35 ⁰⁹	— 35 ⁰⁶	— 34 ⁰⁵	— 32 ⁰⁸	— 30 ⁰⁴	— 29 ⁰⁷
	1958	— 27 ⁰²	— 29 ⁰⁶	— 31 ⁰²	— 31 ⁰¹	— 30 ⁰⁰	— 38 ⁰⁵	— 33 ⁰³	— 37 ⁰⁵	— 39 ⁰⁴	— 35 ⁰¹	— 31 ⁰⁸	— 31 ⁰⁴
	1961		— 29 ⁰⁰	— 32 ⁰¹	— 32 ⁰⁷	— 33 ⁰⁶	— 34 ⁰⁷	— 35 ⁰⁰	— 35 ⁰⁰	— 36 ⁰²	— 35 ⁰⁷	— 33 ⁰⁶	— 32 ⁰⁸
	1962	— 31 ⁰³	— 28 ⁰³	— 30 ⁰⁷	— 32 ⁰⁹	— 38 ⁰⁸	— 33 ⁰²	— 27 ⁰⁰	— 35 ⁰⁴	— 34 ⁰⁵	— 33 ⁰¹	— 30 ⁰⁷	— 29 ⁰⁶
400	1957				— 40 ⁰⁸	— 44 ⁰³	— 46 ⁰⁴	— 46 ⁰⁴	— 46 ⁰¹	— 45 ⁰³	— 42 ⁰⁵	— 40 ⁰⁹	— 39 ⁰¹
	1958	— 37 ⁰²	— 39 ⁰²	— 41 ⁰²	— 41 ⁰⁰	— 40 ⁰⁶	— 47 ⁰³	— 44 ⁰⁰	— 47 ⁰⁵	— 48 ⁰⁶	— 45 ⁰¹	— 41 ⁰⁹	— 41 ⁰¹
	1961		— 30 ⁰⁵	— 41 ⁰³	— 42 ⁰²		— 45 ⁰⁵	— 45 ⁰⁶	— 46 ⁰⁴	— 46 ⁰⁵	— 45 ⁰⁴	— 43 ⁰²	— 41 ⁰⁸
	1962	— 41 ⁰¹				— 45 ⁰⁸			— 46 ⁰³	— 45 ⁰¹			

Tableau 9

STATIONS RUSSES 1958 — SONDAGES MOYENS MENSUELS

MOIS	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Mirny (2 000 m)		- 15 ⁰⁷	- 16 ⁰⁰	- 18 ⁰⁶	- 16 ⁰⁸	- 21 ⁰²	- 19 ⁰⁴	- 23 ⁰⁰	- 28 ⁰³	- 20 ⁰⁵	- 17 ⁰²	- 13 ⁰⁷
Sovietskaya (5 000 m)			- 41 ⁰⁶	- 42 ⁰²	- 43 ⁰⁸	- 47 ⁰⁵	- 46 ⁰⁰	- 49 ⁰⁴	- 49 ⁰²	- 44 ⁰⁶	- 41 ⁰⁴	- 37 ⁰⁶
Vostok (5 000 m)	- 36 ⁰²	- 39 ⁰⁵	- 42 ⁰³	- 44 ⁰⁵	- 43 ⁰⁸	- 49 ⁰¹	- 45 ⁰⁴	- 49 ⁰⁰	- 50 ⁰⁹	- 45 ⁰⁷	- 40 ⁰²	- 36 ⁰⁹

Tableau 10

DUMONT D'URVILLE 1961 — RADIOSONDAGES DANS LE CAS DE PRÉCIPITATIONS (2 000 m) Températures négatives.

JOURS	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janvier 1962
1						15 (1)				16		
2	15							21				
3					23			17 (1)	32			
4	14	17		23			25	10 (1)				13 (1)
5				16 (1)			22,6 (1)					
6		19,5	18				17 (1)				17	
7			19		17 (1)		13		26		16	
8			14 (1)					16 (1)	21	19,5		
9	14			21					21	21		14
10			18 (1)									
11		16					19 (1)			22		
12						17	21		15 (1)	21		
13				14			16					
14				9			18					13
15	15	11 (1)			30							15 (1)
16		14										
17	14					18 (1)	13					
18	14,5		18			16	15			16		13
19			18				19			13 (1)		
20		12			19 (1)		19				19	14
21												
22				16 (1)		26 (1)	17		13 (1)	14 (1)		
23			18 (1)		15	20			13 (1)	14		
24			14		21	25 (1)			9	18 (1)		
25			18			21	11		10			
26			19	14			16		17 (1)			16 (1)
27		20										14
28			16		19	19						16
29	13		17							12 (1)		
30												17 (1)
31						22 (1)						13 (1)
Moyenne Générale	10,2	12,2	15,4	14,9	21,2	21,7	18,5	17,2	15,4	14,2	10,4	8,7
1 000 m												
2 000 m	14,2	15,6	17,2	16,3	21,2	19,9	17,4	16	17	17	14,9	13,1
3 000 m	19	19,6	20,9	20,1	25,2	25,1	20,8	20,2	21,8	21	19,2	18,8
Moyenne Échantillons		1	16,6	16,3	19	21,2	19,1	14,3	14,5	14,3	13	14

(1) Journées avec échantillons.

Tableau 11

MIRNY 1958 — SONDAGES DANS LE CAS DE PRÉCIPITATIONS (2 000 m)
(°C, Températures négatives)

JOURS	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Septembre	Oct.	Nov.	Décembre
1								19,0 19,0			13,5 14,0
2				18,6			30,0	20,6		19,8	14,2
3					25,7				15,2	18,4 20,4	
4						18,2					
5						14,6					
6						12,0					
7				15,5		12,0 12,9					
8						11,2 14,9		18,9 24,0			16,1
9		18,5						25,5			
10						16,7 17,9					15,7
11						17,1					15,1
12						14,6					14,5 12,8
13			17,4			18,2	26,1		17,8 14,8	16,5 19,4	14,4 13,8
14						17,5 18,7	20,4 15,5			18,2 15,1	
15						17,7	16,9 17,0			16,2 15,5	11,9
16				15,5			17,4 23,1	26,5 26,5	19,3		13,8 - 14,3 12,7 - 15,0
17				13,5 16,4		19,2 17,3	22,3 19,3	28,2 29,3	16,2 19,3		12,6 - 11,9 11,4 - 12,8
18				9,8	26,2	17,5	19,2 21,6		20,1 21,7		14,3
19						20,3	23,6 32,0	24,6 - 20,4 23,7 - 21,2	21,8		13,5 - 12,3 13,2
20		15,0		12,9 8,8				27,0 22,4	22,0		15,3 - 12,8 12,4 - 13,3
21		15,7		11,7				25,6 - 29,3 25,7			15,6
22	16,6							20,1 - 18,6 15,6 - 13,8			
23	14,2	20,2				20,7		16,6 - 18,9 21,2			
24	12,8		16,9					21,5			
25				25,2		18,3 24,2					12,2

JOURS	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Septembre	Oct.	Nov.	Décembre
26		15,7 15,5	18,6 19,6	17,4					22,2	14,2	
27					15,8		19,8 16,5				18,0
28					14,5 15,2		14,3				
29					12,4		14,6		16,8		
30							16,4 19,0		16,3	12,2	15,2
31						24,2	18,1 20,7				
Moyenne Générale	14,5	16,8	18,1	15,0	18,3	17,1	20,2	22,4	18,7	16,9	13,8

Tableau 12

MIRNY 1956 — RADIOSONDAGES MENSUELS (2 000 m) - °C

	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janvier 1957
MOYENNE	- 11,5	- 15,5	- 16,6	- 18,2	- 20,3	- 21,5	- 23,4	- 20,2	- 20,7	- 14,2	- 9,6	- 9,8
MAXIMUM	- 8,2	- 10,1	- 10,8	- 14,5	- 15,3	- 10,8	- 15,0	- 14,8	- 14,5	- 7,5	- 4,9	- 2,6
MINIMUM	- 16,3	- 21,3	- 21,2	- 24,7	- 29,2	- 35,4	- 31,3	- 25,7	- 28,5	- 22,8	- 14,9	- 17,6
PRÉCIPITATIONS	- 11,0	- 14,8	- 15,2	- 16,3	- 19,1	- 18,75	- 22,25	- 19,1	- 19,0	- 14,0	- 7,6	- 10,4

Tableau 13

BASE DUMONT D'URVILLE 1961 — CONDITIONS DE FORMATION DES PRÉCIPITATIONS

DATES	HEURE TU	NUAGES				REMARQUES	TEMP. à 800 mb (° C)	TENEUR en deut.	DEUTÉRIUM $\left(\frac{P}{P_0}\right)^{s-1}$		
		Base		Sommet					Base	Sommet	800 mb
		Pression mb	Temp. (° C)	Pression mb	Temp. (° C)						
15.3.61	00	850	- 10,2	730	- 10,9	- 10,4	138,7	135,8	132,9	134,7	
8.4.61	00	795	- 13,4	700	- 17,8	- 13,5	135,6	131,4	128,7	131,5	
10.4.61	00	864	- 15,4	700	- 20,2	- 17,0	139,2	136,4	132,4	134,8	
5.5.61	00	784	- 16,0	563	- 18,8	- 16,0	121,8	117,9	111,9	118,0	
7.5.61	00	912	- 15,1	707	- 17,1	- 16,2	143,9	142,1	136,9	139,4	
22.5.61	00	770	- 15,4	529	- 26,5	- 16,0	130,1	125,4	117,2	126,0	
20.6.61	00	950	- 20,5	535	- 28,9	- 21,2	135,3	134,2	121,8	130,8	
1.7.61	00	829	- 15,6	720	- 14,9	- 14,7	132,7	129,2	126,7	128,6	
17.7.61	00	750	- 18,0	736	- 18,0	- 15,4	140,8	135,0	134,7	136,5	
22.7.61	00	800	- 22,0	650	- 25,0	- 26,5	130,4	126,0	121,7	125,7	
24.7.61	00	811 615	- 22,2 - 35,4	700 570	- 27,8 - 39,1	- 22,2	140,6	136,1	132,5	135,9	
31.7.61	00	775	- 22,3	600	- 33,0	- 25,2	138,5	133,2	126,6	133,6	
6.8.61	00	820	- 16,6	500	- 32,3	- 18,0	134,6	130,8	119,3	130,3	
11.8.61	00	837	- 16,9	538	- 33,1	- 17,1	134,0	130,6	120,1	129,8	
3.9.61	00	800	- 16,2	552	- 32,7	- 16,2	136,5	132,2	122,9	132,2	
5.9.61	00	806	- 11,3	456	- 34,1	- 10,9	143,8	139,8	125,0	139,6	
8.9.61	00	874	- 14,4	765	- 16,1	- 15,0	139,7	137,1	134,5	135,4	
12.10.61	00	764	- 14,5	559	- 27,6	- 14,5	134,5	129,6	122,1	130,4	
21.10.61	00	790	- 14,8	400	- 40,0	- 14,8	142,4	137,8	119,4	138,0	
22.10.61	00	938	- 10,5	352	- 48,7	- 11,9	138,1	136,9	109,8	134,0	
19.11.61	00	950	- 7,1	546	- 18,1	- 12,7	135,2	134,3	123,8	131,1	

DATES	HEURE TU	NUAGES				REMARQUES	TEMP. à 800 mb (°C)	TENEUR en deut.	DEUTÉRIUM $\left(\frac{P}{P_0}\right)^{a-1}$		
		Base		Sommet					Base	Sommet	800 mb
		Pression mb	Temp. (°C)	Pression mb	Temp. (°C)						
21. II. 61	00	716	17,3	517	22,3	—	12,3	134,5	127,5	136,9	
29. II. 61	00	950	6,3	907	6,9	—	12,5	125,4	117,1	125,0	
17. 12. 61	00	815	12,5	544	23,7	—	6,0	143,2	142,7	141,9	
26. 12. 61	00	864	7,1	837	7,1	—	14,8	146,8	143,4	144,3	
30. 12. 61	00	770	5,9	587	13,9	—	14,5	136,0	133,6	133,8	
5. I. 62	00	900	10,6	768	16,4	—	10,4	133,9	133,5	132,4	
15. I. 62	00	890	9,0	790	15,0	—	15,3	134,4	133,6	133,6	
		870	7,4	850	8,0	—	—	—	—	—	
		800	10,4	650	20,2	—	—	—	—	—	
		836	15,6	800	15,3	—	—	—	—	—	
		700	22,5	650	23,8	—	—	—	—	—	

Tableau 14

STATION A 3 (B 1)

PROFONDEUR (cm)	DENSITÉ	‰ DEUTÉRIUM (p.p.m.)	PROFONDEUR (cm)	DENSITÉ	DEUTÉRIUM (p.p.m.)
5	0,476	137,7	182,5	0,447	138,2
8	0,592	138,3	187,5	0,436	138,7
15	0,455	134,8	192	0,413	138,8
21	0,414	131,1	198	0,479	138,7
25	0,424	131,1	203	0,462	138,3
29	0,392	131,6	207	0,498	136,7
33	0,424	132,4	216	0,472	139,4
39	0,458	132,3	222	0,499	139,2
46	0,473	131,4	233	0,442	136,4
50	0,436	136,2	238	0,454	136,5
56	0,474	138,4	242	0,451	136,6
60	0,461	135,5	245	0,512	137,6
65	0,406	134,8	258	0,553	136,4
70	0,395	129,4	262	0,558	138,6
76	0,415	134,8	268	0,471	141,0
81	0,536	135,7	274	0,493	141,1
86	0,442	138,3	282	0,541	140,1
89	0,440	138,3	289	0,504	139,3
99	0,474	138,4	297	0,499	138,9
105	0,460	139,5	302	0,488	137,4
110	0,474	139,4	308	0,510	134,9
116	0,433	140,8	315	0,492	136,1
124	0,469	138,7	321	0,426	139,2
127	0,449	138,7	327	0,478	138,5
131	0,414	134,3	333	0,483	139,2
137	0,535	139,5	337	0,487	139,5
141	0,504	139,1	346	0,504	139,2
145	0,497	138,8	352	0,548	138,7
155	0,540	135,8	361	0,536	136,7
157	0,450	135,1	367	0,510	135,8
159	0,480	133,7	372	0,528	135,5
164	0,507	133,3	381	0,512	134,6
170	0,470	135,5	388	0,550	133,6
172	0,433	136,6	393	0,522	131,2
177,5	0,451	138,6	401	0,523	130,1

Tableau 15

STATION A 28 (B 7)

PROFONDEUR (cm)	DENSITÉ	DEUTÉRIUM (p.p.m.)	PROFONDEUR (cm)	DENSITÉ	DEUTÉRIUM (p.p.m.)
9	0,413	138,4	207	0,494	137,4
14	0,422	138,7	213	0,496	133,7
20	0,431	138,6	219	0,495	129,9
25	0,440	138,6	224	0,506	128,7
31	0,433	138,6	229	0,510	128,3
36	0,438	138,5	236	0,526	135,3
42	0,465	141,6	242	0,518	134,2
48	0,348	146,1	249	0,539	139,3
55	0,390	145,7	260	0,481	140,0
63	0,472	144,6	264	0,473	139,4
68	0,419	144,0	271	0,466	138,9
73	0,428	142,5	278	0,480	139,5
80	0,505	140,6	285	0,472	140,2
85	0,505	138,8	292	0,497	141,2
92	0,411	137,3	297	0,495	139,9
100	0,417	136,2	304	0,478	137,4
104	0,431	135,6	311	0,518	136,9
110	0,456	136,0	317	0,535	136,3
116	0,446	137,9	322	0,471	137,4
122	0,430	141,0	328	0,470	137,5
128	0,431	141,3	332	0,483	138,0
134	0,459	141,0	337	0,502	137,6
140	0,467	141,4	341	0,500	136,1
147	0,444	141,7	348	0,521	136,7
153	0,488	140,6	353	0,497	136,9
161	0,433	139,2	359	0,505	137,7
165	0,454	139,9	365	0,513	138,5
172	0,472	141,0	370	0,513	137,4
182	0,446	140,6	377	0,509	135,0
186	0,493	140,4	382	0,515	133,8
190	0,504	139,6	387	0,535	130,8
196	0,512	138,7	392	0,551	130,9
202	0,507	138,6			

Tableau 16

STATION B 61

PROFONDEUR (cm)	DENSITÉ	TENEUR EN DEUTÉRIUM	
		Profondeur (cm)	Deutérium p.p.m.
4	0,446	5	108,1
12	0,378	12	121,8
21	0,318	20	126,0
29	0,422	35	109,2
35	0,416	50	110,8
42	0,416	70	108,7
52	0,342	83	109,0
59	0,306	95	109,4
71	0,408	110	111,8
77	0,440		
82	0,432		
90	0,458		
100	0,418		
110	0,338		

Tableau 17

STATION NZGS 15

STRATIGRAPHIE			GLACE	OBSERVATIONS	DEUTÉRIUM D p.p.m.
Profondeur (cm)	Grains	Cohésion			
0	V.F.	S.			120,8
13,5	F.	V.S.			119,4
15,25	V.F.	S.M.			116,6
23,5	F.	V.S.			122,4
25	F.	S.M.			125,2
28,5	F.	V.S.			122,4
32,5	F.	S.V.S.			136,8
40,75	F.	S.			133,3
58,5	F.M.	S.			117,5
77	F.M.	S.M.		Couche lâche à gros grains à 79,75 cm.	127,2
98	F.	V.F.			126,4
106	M.	V.S.			118,8
108,5	F.M.	M.H.			118,8
124,5	F.	M.H.			124,2
138	M.	S.			121,6
141	F.M.	M.H.			
151,25	M.	M.S.			
164,25	M.	M.H.			
179,5	F.	H.			

Légende.

<p style="text-align: center;"><i>Grain</i></p> V.F. : very fine = très petit F. : fine = petit M. : médium = moyen L. : large = gros	<p style="text-align: center;"><i>Cohésion</i></p> S. : soft = tendre M. : Medium = Moyen H. : hard = dur
--	---

Tableau 18

STATION NZGS 16

Légende.

<p style="text-align: center;"><i>Grain</i></p> V.F. : very fine = très petit F. : fine = petit M. : medium = moyen L. : large = gros	<p style="text-align: center;"><i>Cohésion</i></p> S. : soft = tendre M. : medium = moyen H. : hard = dur
--	---

STRATIGRAPHIE			GLACE	OBSERVATIONS	DEUTÉRIUM p.p.m.
Profondeur (cm)	Grains	Cohésion			
0	F.	H.			125,5
16	M.	S.			122,0
20	M.	M.H.			118,0
24	M.L.	M.H.			120,5
26	F.	H.			124,6
30	L.	S.		Couche lâche à gros grains	125,1
33	F.	H.			132,4
42	M.L.	S.		Couche lâche à gros grains	129,0
43,5	F.M.	H.			128,0
48	L.	S.		Couche lâche à gros grains	121,5
52	M.	M.S.		Couche lâche à gros grains	116,8
63	F.	H.			119,6
72	M.	M.S.			126,6
77	L.	S.		Couche lâche à gros grains	124,5
78,5	M.L.	M.S.			123,8
81	M.F.	M.H.			121,3
89,5	M.L.	M.S.	=====	Couche de glace continue	120,6
104,5	F.	H.			123,8
106	M.	M.S.			122,5
112	L.	S.		Couche lâche à gros grains	126,5
114	M.	M.H.			125,5
125	M.	S.		Couche lâche à gros grains	128,0
127,5	F.	H.			129,2
137	M.	M.			130,4
144	L.	S.	-----	Lentilles de glace et gros grains	126,1
147	L.	H.	-----	Lentilles de glace et gros grains	120,9
151	M.	M.S.			121,7
160	L.	S.	=====	Couche de glace	122,4
162	M.	H.			121,3
185	F.	H.			122,1
200	M.	H.			122,0

STRATIGRAPHIE			GLACE	OBSERVATIONS	DEUTÉRIUM p.p.m.
Profondeur (cm)	Grains	Cohésion			
203					
205	F.	H.		Couche lâche à gros grains	127,8
209	L.	S.			124,8
212	F.	H.			123,2
217	M.	M.			120,8
220	F.	H.			118,7
221	M.	M.S.			119,1
223	F.	H.	=====	Mince couche de glace	128,4
242	F.M.	H.	=====	Mince couche de glace	123,0
246	M.	H.			123,6
248	M.L.	M.S.			125,1
277	F.M.	H.			121,1
285	L.	S.			125,0
309	F.M.	H.			123,5
311	M.L.	S.			124,7
319	M.	H.			123,5
330	F.	H.			120,8
335	M.	H.			119,0
352	F.	H.			118,8
356	M.L.	M.S.		Couche lâche à gros grains	122,7
367,5	M.F.	H.			122,2
370,5	L.	S.M.			125,3
387,5	F.	H.			122,9
392,5	M.L.	M.	=====	Couche de glace à 395	123,0
412,5	M.	M.			121,1
414	M.L.	M.S.			121,7
419	F.	H.			120,8
421,5	M.L.	S.			122,8

Tableau 19

TERRE DE VICTORIA — TENEUR EN DEUTÉRIUM DU NÉVÉ

STATIONS	DEUTÉRIUM (p.p.mf)	ÉCHANTILLONS	ALTITUDE (mètres)	TEMPÉRATURE (° C)
500	106,6	6	2 276	— 43,6
504	106,9	6	2 437	— 45,0
507	105,5	7	2 479	— 47,3
516	103,5	8	2 591	— 47,1
519	102	7	2 541	— 46,9
521	108,5	7	2 516	— 46,7
524	112,1	9	2 498	— 44,0
527	109,5	10	2 467	— 44,2
531 (B 61)	110,9	23	2 513	— 43,9
536	112,9	9	2 356	— 44,3
540	115	7	2 287	— 42,3
544	118,1	10	2 216	— 41,5
550	116,1	4	2 220	— 40,9
553	124,7	3	2 262	— 39,6
556	124,8	3	2 331	— 38,4

Tableau 20

TERRE ADÉLIE — TENEUR EN DEUTÉRIUM DU NÉVÉ

STATIONS	DEUTÉRIUM (p.p.m.)		ALTITUDE (mètres)	TEMPÉRATURE (° C)	DISTANCE à la côte (km)	ACCUMULATION (cm eau)
	T.A. XI	T.A. XII				
A 3 (B 1)	136,7	137	220	- 14,5	3,5	+ 17,9 (1)
A 5 (B 1 bis)		138,5	232	- 15,6	4,0	
A 8		139,4	275	- 14,8	6,3	
A 14		137,6	405	- 16,1	9	
A 17		138,5	473	- 17,8	11	
A 28 (B 7)	140,7	138,2	676	- 19,3	21	+ 8,7 (1)
A 34 (B 10)	138,4	138,7	870	- 19,8	28,3	+ 8,1 (1)
B 11	134,2	135,1	980	- 22,0	37,6	+ 56,7 (2)
B 11 bis	131,2		1 020	- 22,2	42,2	+ 28,9 (1)
B 12	130,1		1 110	- 23,1	46,9	+ 60,6 (2)
B 13	130,0	135,5	1 210	- 24,2	56,2	+ 45,6 (2)
B 14	135,1		1 310	- 25,1	65,5	+ 11,7 (2)
B 15	133,1		1 390	- 25,9	74,8	+ 21,3 (1)
B 16	125,5	130,5	1 480	- 26,9	84,1	+ 27,1 (1)
B 17	127,9	127,5	1 530	- 27,4	93,4	+ 54,2 (2)
B 17 bis	123,1		1 570	- 27,8	98,0	+ 15,4 (1)
B 18	127,0	129,0	1 610	- 28,3	102,7	+ 22,2 (1)
B 19	130,2	129,5	1 670	- 28,9	112,0	+ 1,9 (1)
B 19 bis	133,5		1 690	- 29,0	116,7	+ 14,7 (1)
B 20	126,7		1 740	- 29,4	121,3	+ 23,8 (1)
B 20 bis	126,8		1 750	- 29,6	126	+ 15,3 (1)
B 21	121,8		1 780	- 30,0	130,6	+ 27,3 (1)
B 21 bis	131,8		1 800	- 30,1	135,3	+ 10,6 (1)
B 22	128,8		1 830	- 30,4	139,9	+ 29,6 (1)
B 22 bis	127,2	126,4	1 850	- 30,4	144,5	
B 61		110,9	2 513	- 43,9	501	
Dumont d'Urville	136,7	136,6	40	- 11,4	0	

(1) Valeur moyenne 1958-1961.

(2) Valeur moyenne 1957.

Tableau 21

STATIONS ANTARCTIQUES
TEMPÉRATURES MOYENNES ANNUELLES AU SOL ET A + 2 000 m

STATIONS	TEMPÉRATURE AU SOL (° C)	TEMPÉRATURE A + 2 000 m (° C)
DUMONT D'URVILLE	- 11,2	- 17,8
MIRNY	- 9,4	- 17,6
VOSTOCK 1	- 47,0	- 43,6
WILKES	- 9,7	- 18,1
BYRD	- 28	- 28,5
ELLSWORTH	- 24	- 20,7
POLE	- 49,1	- 41,1
ROI BAUDOIN	- 14,9	- 19,3
LITTLE AMERICA	- 23,2	- 21,9

Tableau 22

STATIONS ANTARCTIQUES — TENEURS EN DEUTÉRIUM

STATIONS	‰ 018	DEUTÉRIUM (p.p.m.)	REMARQUES	ALTITUDES (m)	TEMPÉRATURES (° C)
Pôle Sud	—	98,8	14 échantillons	2 800	- 49,1
	- 49,0	97,8	0,80 m de névé		
Byrd	- 30,84	121,4	6,90 m de névé	1 530	- 28
	- 33,97	117,2	0,60 m de névé		
Little America	- 19,72	135,8	4,10 m de névé	43	- 23,2
Wilkes Station 2	- 18,5	137,4	1,40 m de névé	1 166	- 19,4
Ellsworth	- 26,6	126,9	28 échantillons	43	- 24
Roi Baudoin	- 21,9	132,9	précipitations et névé	37	- 14,9
Dumont d'Urville	—	136,7	100 échantillons	40	- 11,2
Scott Base	—	123,4	4,20 m de névé	16	- 17,9

Tableau 23

MESURES SOVIÉTIQUES DANS L'ANTARCTIQUE

STATIONS	TENEUR EN GAMMAS	TENEUR ÉQUIVALENTE en Deutérium (p.p.m.)	ALTITUDE (m)	TEMPÉRATURE (°C)
MIRNY (66°33' S 93°00' E)	— 4,92	144,9	30	— 9,4
80°39' S 108°30' E	— 17,40	99,9	3 434	— 56
81°54' S 108°30' E	— 20,60	88,6	3 403	— 54
83°09' S 108°30' E	— 19,32	93,1	3 297	— 53,5
85°26' S 108°30' E	— 18,68	95,4	3 192	— 53
86°00' S 108°30' E	— 20,28	89,7	3 156	— 52
POLE SUD (90°00' S)	— 17,08	101,0	2 800	— 49,1

Tableau 24

ÉTUDE DE LA GLACE CÔTIÈRE EN TERRE ADÉLIE - 1962

STATIONS	ÉCHANTILLONS	PROFONDEUR de prélèvement (mètres)	(D)/(H) (p.p.m.)	(D)/(H) moyen (p.p.m.)	CRISTALLOGRAPHIE Remarques	
AO	AO ₁	0	135,4	136,5 ± 3	Névé	
	AO ₂	1	139,5		Glace	
	AO ₃	1,30	134,6		Glace	
AO A	AO A	0	106,6	105,5 ± 2,5	Glace continue	
	AO A ₁	0,05	107,3		»	
	AO A ₂	0,80	105,0		»	
	AO A ₃	1,25	103,0		»	
AO B	AO B	0	136,6	136,6 ± 0,3	Glace continue	
	AO B ₁	0,30	136,6		»	
	AO B ₂	0,70	137,3		»	
	AO B ₃	1,40	137,1		»	
AO C	AO C ₁	0	138,1	137,7 ± 2,4	Glace continue	
	AO C ₂	0,25	138,7		»	
		0,30			»	
	AO C ₃	0,90	135,3		»	
	AO C ₄	1,30	138,7		»	
AO D	AO D ₁	0	121,3	121,7 ± 0,6	Glace continue	
	AO D ₂	0,80	121,5		»	
	AO D ₃	1,30	122,3		»	
AO E	AO E ₁	0,30	137,4	137,3 ± 2,6	Glace continue	
	AO E ₂	0,90	134,7		»	
	AO E ₃	1,70	139,3		»	
	AO E ₄	1,20	137,9		»	
AO F	AO F ₁	0,45	133,7	139,5 ± 5,8 (6)	Glace continue	
	AO F ₁ 1 ^{re} couche		141,2		»	
	AO F ₂	0,90	140,1		139,9 ± 1,3 (5)	»
	AO F ₂ 2 ^{me} couche		139,9			»
	AO F ₃	1,25	139,4			»
	AO F ₃		139,0			»

STATIONS	ÉCHANTILLONS	PROFONDEUR de prélèvement (mètres)	(D)/(H) (p.p.m.)	(D)/(H) moyen (p.p.m.)	CRISTALLOGRAPHIE Remarques
A (Glacier de l'Astrolabe)					
Séracs	1	0,3	138,2	138,2 ± 1	Glace
Nunatak	2	0,3	139,0		»
Crevasse	3	15	138,8		Névé-glace
Séracs	4	0,3	137,2		Glace
vers	5	0,3	137,3		Glace
Nunatak	6	0,3	138,9		Glace
C					
Crique au bord de la mer	1	de 0 à 2 m au-dessus du niveau de la mer	135,6	132,4 ± 3,2	Glace
	2		135,4		Glace
	3		129,4		Névé-glace
	4		129,2		Névé-glace
	5				
CR 1					
Crevasse vers AO E	50/1	12,90	134,1	137,7 ± 3,6	Glace continue
	50/2	12,90	139,2		»
	50/3	11,0	136,6		»
	50/4	9,40	136,6		»
	50/5	6,10	140,2		»
	50/6	3,60	140,0		»
CR 2					
(Crevasse vers AO E, 20 m à l'Est, largeur 0,7 m)	6	2,65	138,4	136,7 ± 1,7	Glace continue
	7	3,60	136,0		Glace continue
	8	3,60	136,2		»
	9	4,60	135,8		»
	10	5,40	137,1		»
CR 3					
Crevasse vers A 1	11	2,80	137,8	137,8 ± 1,4	Glace
	12	2,80	137,0		Glace
	13	3,40	137,7		Glace
	14	3,40	138,5		Glace
	15	4,30	138,1		Névé en fusion
	16	4,30	138,5		Glace
	17	5,45	136,4		Glace
	18	5,45	137,5		Névé
	19	6,90	139,2		Glace
	20	6,90	136,5		Névé
	21	8,15	138,6		Glace
	22	50 cm	138,9		Névé-glace
23	50 cm	137,0	Cristal de givre		
24	60 cm	138,5	Glace		

Tableau 25

ÉTUDE DE LA GLACE CÔTIÈRE EN TERRE ADÉLIE - 1963

PROFONDEUR	30 cm	60 cm	90 cm	120 cm	150 cm	VALEUR MOYENNE (p.p.m.)
Stations						
I	106,3 (40 cm)	110,3 (80 cm)	—	107,7	—	108,4 ± 2,1
II	123,4	123,8	123,3	117,4	115,8	121,3 ± 5,5
III	120,4	118,6	—	119,2	119,1	119,3 ± 1,1
IV	113,6	113,7	114,8	121,3	120,2	116,7 ± 4,6
V	117,4	116,4	116,0	115,9	115,3	116,2 ± 1,2
VI	122,5	121,5	121,1	—	122,5	121,5 ± 1
VII	106,0	107,4	108,9	108,7	109,0	108,0 ± 2
VIII	123,5	123,9	123,5	122,8	124,4	123,6 ± 0,8
IX	135,5	136,1	135,7	133,8	134,7	135,2 ± 1,4
X	133,8	132,1	132,7	131,9	131,4	132,4 ± 1,4
XI	139,0	137,9	136,8	—	136,1	137,4 ± 1,6
XII	137,1	137,2	137,3	136,5	135,7	136,8 ± 1,1
XIII	131,8	129,8	129,4	130,7	129,1	130,2 ± 1,6
XIV	138,4	135,2	—	135,5	—	136,4 ± 2
XV	112,3	112,9	110,9	106,6	107,3	110,0 ± 3,4
XVI	105,7	105,8	105,2	111,1	110,0	106,9 ± 4,2
XVII	118,0	—	—	—	—	118,0
XVIII	104,6	105,9	105,1	105,4	104,5	105,1 ± 0,8
XIX	105,9	107,0	105,8	106,3	106,5	106,3 ± 0,7
XX	105,8	107,1	103,8	107,2	104,2	106,6 ± 2,8
XXI	111,7	107,6	106,7	107,0	109,0	108,4 ± 3,3

Tableau 26

CONCENTRATIONS THÉORIQUES POUR DES CONDITIONS CLIMATIQUES DIFFÉRENTES

1. $C_0 = 140$ ppm. $t^0 = 0^{\circ}\text{C}$
 $P_0 = 1.000$ mb

2. $C_0 = 138$ ppm. $t^0 = -10^{\circ}\text{C}$
 $P_0 = 1.000$ mb

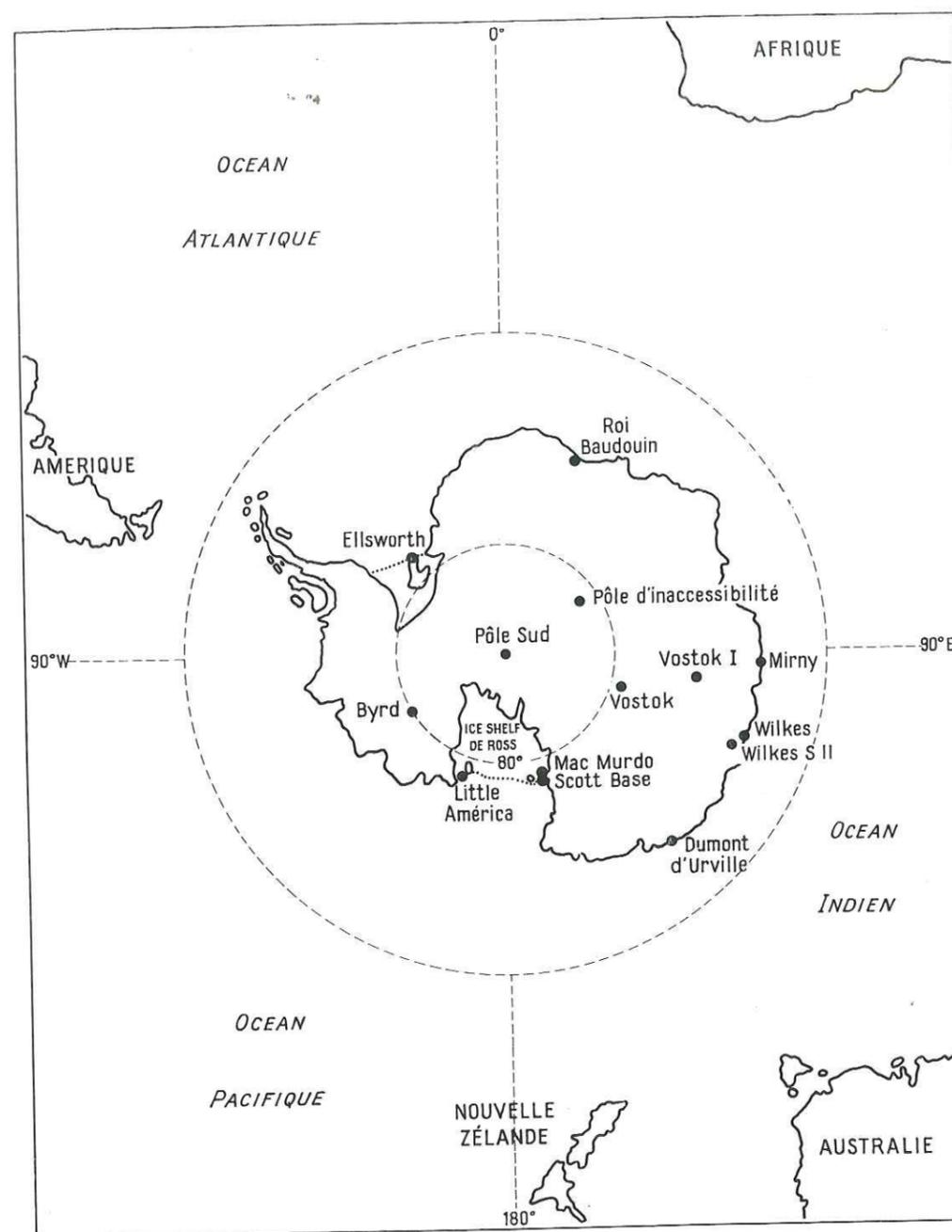
$t^{\circ}\text{C}$	PROCESSUS ADIABATIQUE				PRESSION CONSTANTE			
	Condensation		Sublimation		Condensation		Sublimation	
	1	2	1	2	1	2	1	2
-10	144,9	152,5	143,6	154,5	141,4	151,8	139,4	153,9
-12	143,0	150,5	140,9	151,5	139	149,2	136,2	150,3
-14	141,0	148,3	138,2	148,4	136,5	146,5	132,9	146,6
-16	138,9	146,1	135,3	145,2	133,9	143,8	129,5	142,9
-18	136,8	143,8	132,4	141,9	131,3	141	126,1	139,1
-20	134,5	141,4	129,4	138,6	128,6	138,1	122,6	135,2
-22	132,1	138,9	126,3	135,2	125,7	135	119,0	131,3
-24	129,6	136,3	123,2	131,7	122,8	131,9	115,4	127,3
-26	127,1	133,6	119,9	128,1	119,9	128,7	111,7	123,2
-28	124,5	130,9	116,5	124,4	116,9	125,4	108,0	119,1
-30	121,8	128,1	113,1	120,6	113,8	122,1	104,2	114,9
-32	118,9	125,1	109,7	116,9	110,7	118,7	100,5	110,8
-34	116,0	122,1	106,2	113	107,5	115,3	96,7	106,6
-36	113,0	119	102,6	109,1	104,2	111,8	92,8	102,4
-40	109,9	115,8	99,0	105,1	100,8	108,2	89	98,2

LISTE DES FIGURES

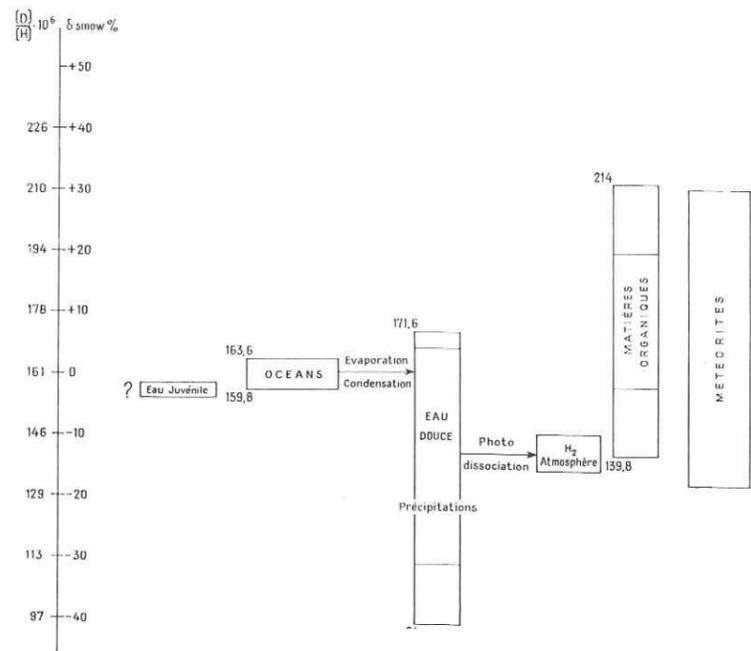
Continent antarctique

1. — Cycle du deutérium dans la nature.
2. — Deutérium - Facteur de séparation liquide/vapeur.
3. — Teneur théorique des précipitations (pression constante).
4. — Teneur théorique des précipitations (processus adiabatique).
5. — Précipitations - Base Dumont d'Urville 1961.
6. — Précipitations - Base Dumont d'Urville 1962.
7. — Précipitations - Teneur moyenne - Base Dumont d'Urville 1961.
8. — Précipitations - Teneur moyenne - Base Dumont d'Urville 1962.
9. — Valeurs moyennes mensuelles de la température - Base Dumont d'Urville 1957-1958.
10. — Valeurs moyennes mensuelles de la température - Base Dumont d'Urville 1961-1962.
11. — Sondages moyens mensuels - Stations russes 1958.
12. — Radiosondages dans le cas de précipitations (moyennes mensuelles) Base Dumont d'Urville 1961.
13. — Radiosondages dans le cas de précipitations (2 000 m) - Base Dumont d'Urville 1961.
14. — Radiosondages dans le cas de précipitations - Mirny 1958 (2 000 m).
15. — Radiosondages mensuels - Mirny 1956 (2 000 m).
16. — Variations de la teneur en deutérium et de la température - Base Dumont d'Urville 1961-1962.
17. — Relation entre la teneur en deutérium et la température (850 mb) (moyennes mensuelles) - Base Dumont d'Urville 1961-1962.
18. — Relation entre la teneur en deutérium et la température (base et sommet des nuages) - Base Dumont d'Urville 1961.
19. — Relation entre la teneur en deutérium et la température (base des nuages) - Base Dumont d'Urville 1961.
20. — Relation entre la teneur en deutérium et la température (800 mb) - Base Dumont d'Urville 1961.
21. — Relation entre la teneur en deutérium et la température - Base Dumont d'Urville 1961.
22. — Stratigraphie du névé (photographie).
23. — Cristal de neige (photographie).
24. — Cristal de neige (photographie).
25. — Grain de chasse-neige (photographie).
26. — Grain de névé (photographie).
27. — Terre Adélie - Terre de Victoria.
28. — Légende stratigraphique.
29. — Station A₃ (B₁) - stratigraphie.
30. — Station A₃ (B₁) - deutérium.
31. — Station A₂₈ (B₇) - stratigraphie.
32. — Station A₂₈ (B₇) - deutérium.

33. — Station B₆₁ — stratigraphie.
34. — Station B₆₁ — deutérium.
35. — Station N.Z.G.S. 15 — stratigraphie.
36. — Station N.Z.G.S. 15 — deutérium.
37. — Station N.Z.G.S. 16 — stratigraphie.
38. — Station N.Z.G.S. 16 — deutérium.
39. — Surface du névé en Terre de Victoria — (photographie).
40. — Teneur en deutérium en fonction de l'altitude.
41. — Relation entre les températures moyennes annuelles au sol et à + 2 000 m.
42. — Terre Adélie — Terre de Victoria : teneur en deutérium en fonction de la température moyenne annuelle.
43. — Teneur en deutérium en fonction de la température moyenne annuelle.
44. — Teneur en deutérium et accumulation en fonction de la distance à la côte.
45. — Le glacier de l'Astrolabe et la côte de Terre Adélie (photographie).
46. — La moraine de Pointe Géologie (photographie).
47. — Stations glaciologiques côtières en Terre Adélie.
48. — Concentration isotopique de la glace côtière (moraine) — Terre Adélie.
49. — Antarctique : courbes de niveau.
50. — Température (°C) en fonction de la distance à la côte — Terre Adélie.
51. — Antarctique : températures moyennes annuelles (°C).

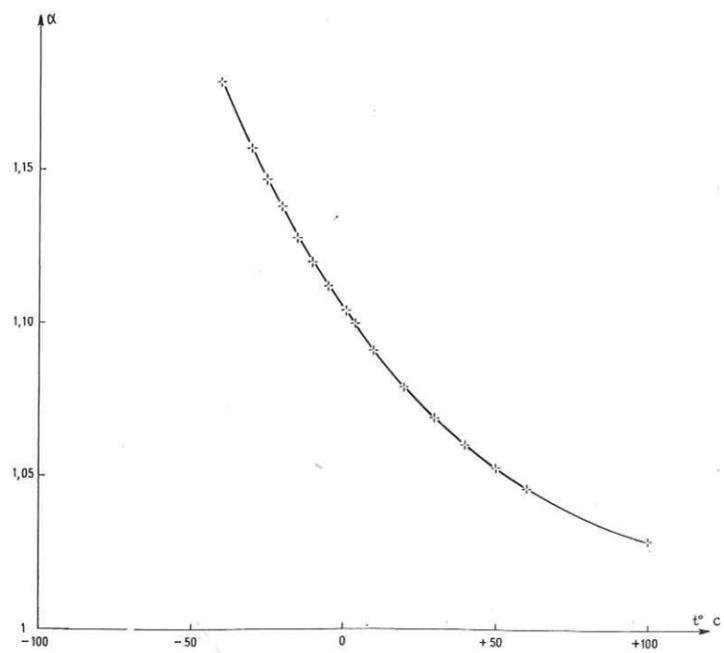


CONTINENT ANTARCTIQUE



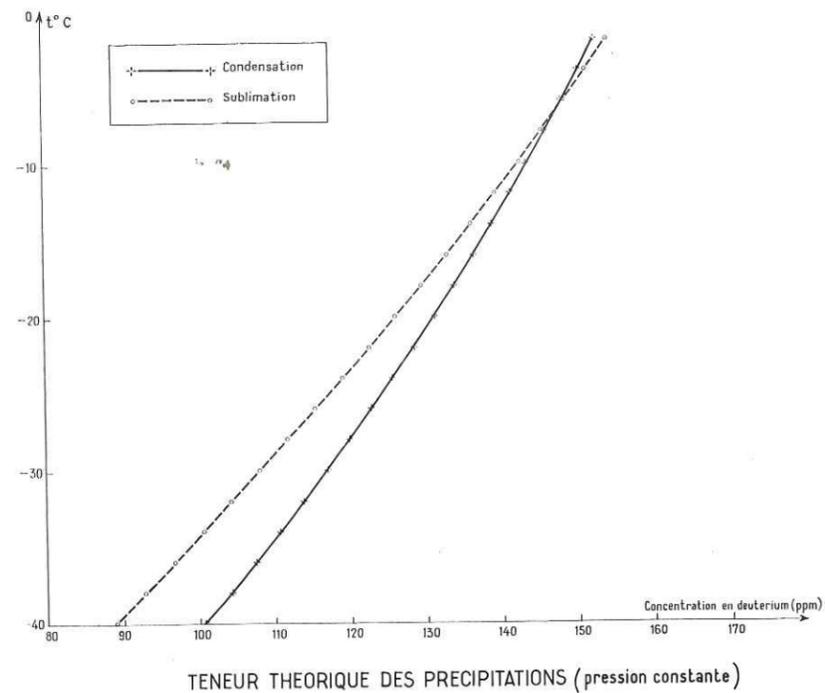
CYCLE DU DEUTERIUM DANS LA NATURE

FIG. 1



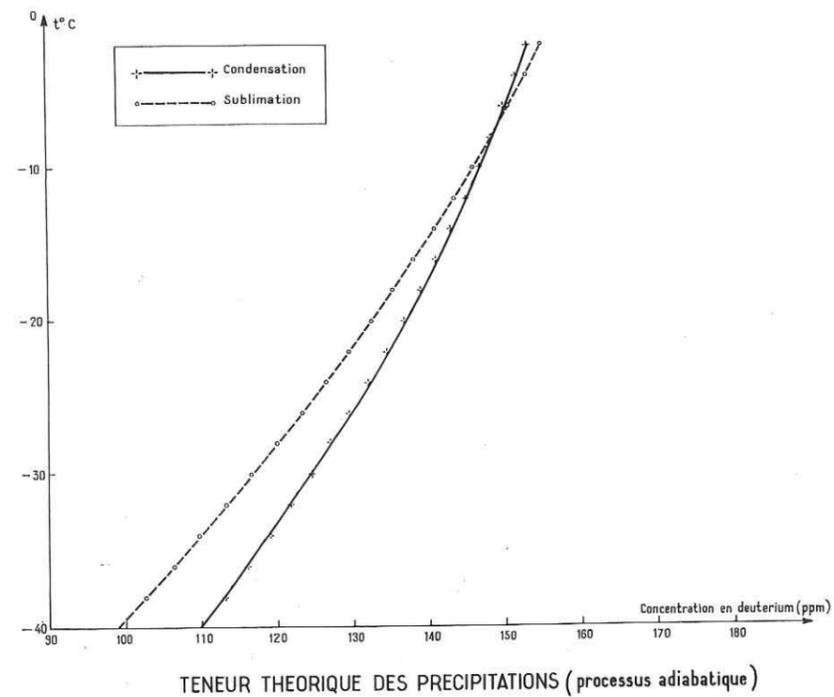
DEUTERIUM - FACTEUR DE SEPARATION LIQUIDE/VAPEUR

FIG. 2



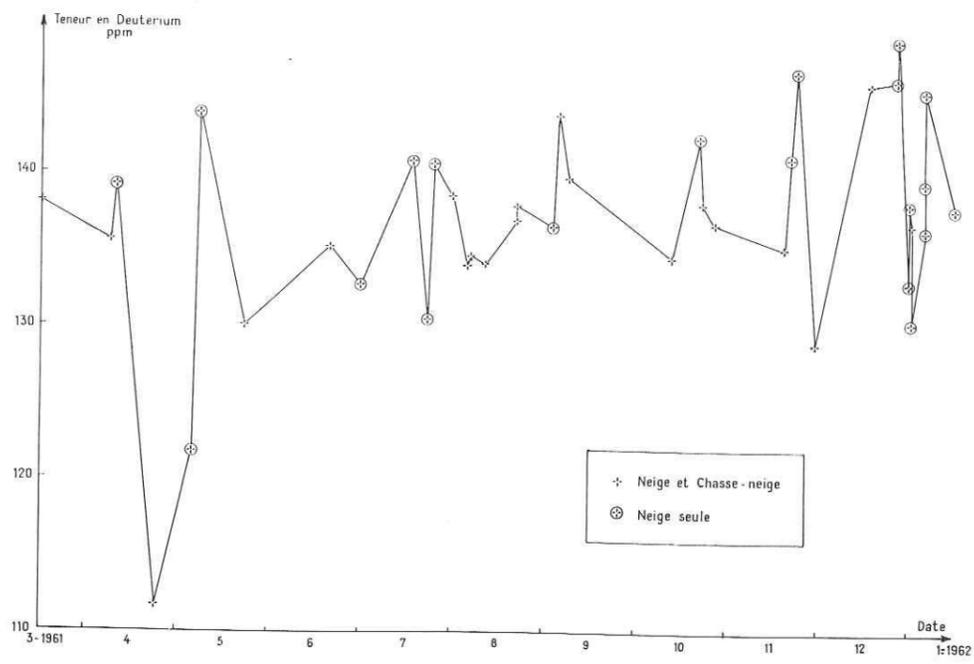
TENEUR THEORIQUE DES PRECIPITATIONS (pression constante)

FIG. 3



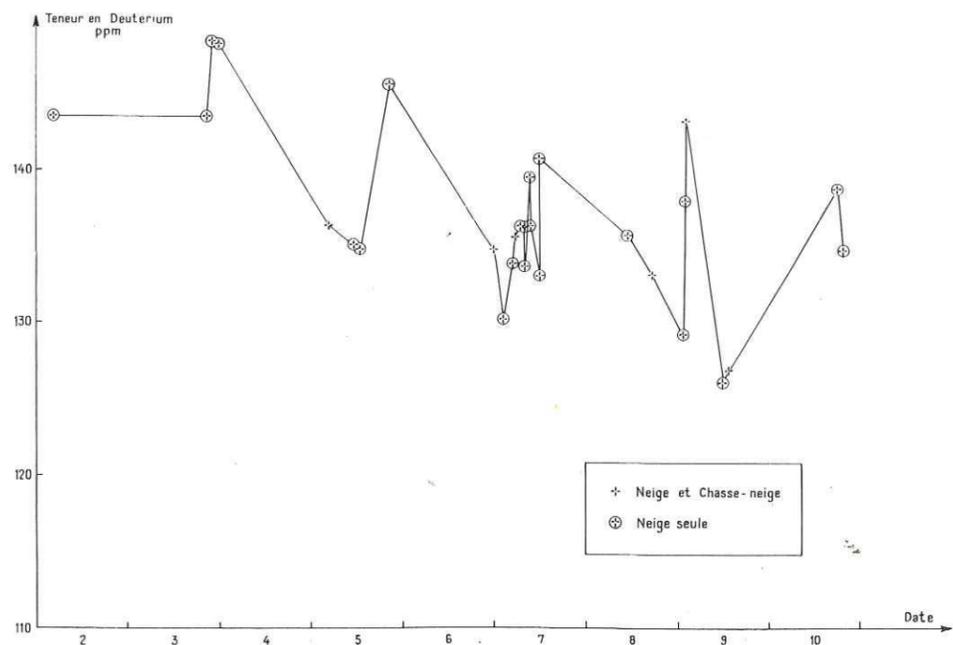
TENEUR THEORIQUE DES PRECIPITATIONS (processus adiabatique)

FIG. 4



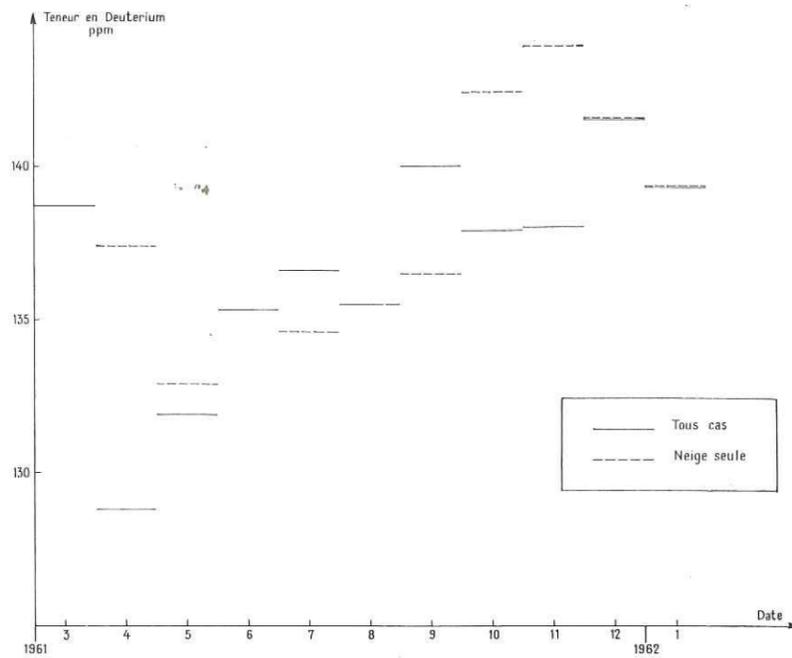
PRECIPITATIONS
BASE DUMONT d'URVILLE - 1961

FIG. 5



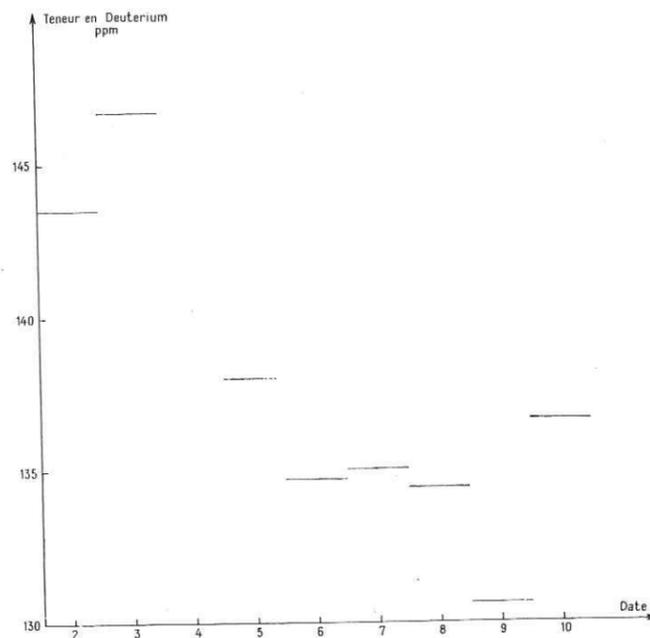
PRECIPITATIONS
BASE DUMONT d'URVILLE - 1962

FIG. 6



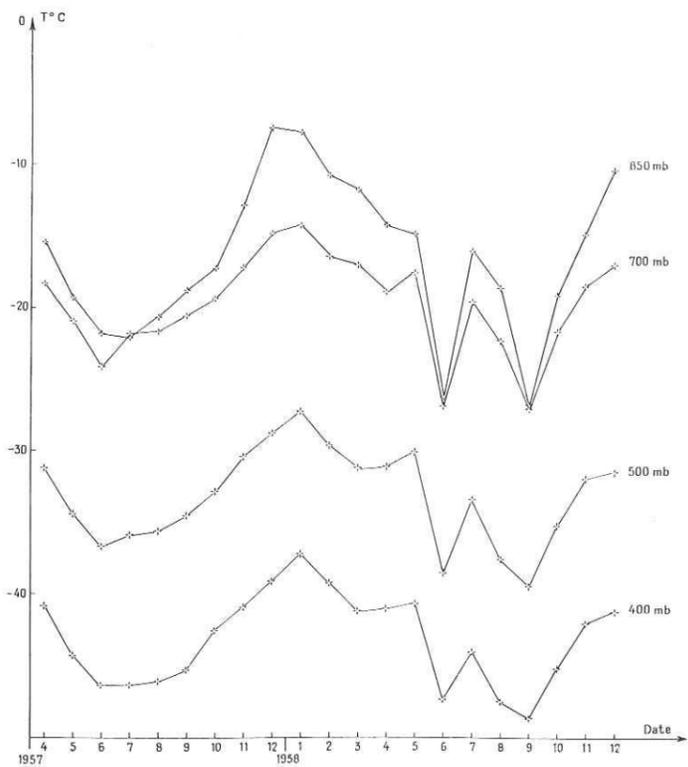
PRECIPITATIONS - TENEUR MOYENNE
BASE DUMONT d'URVILLE - 1961

FIG. 7



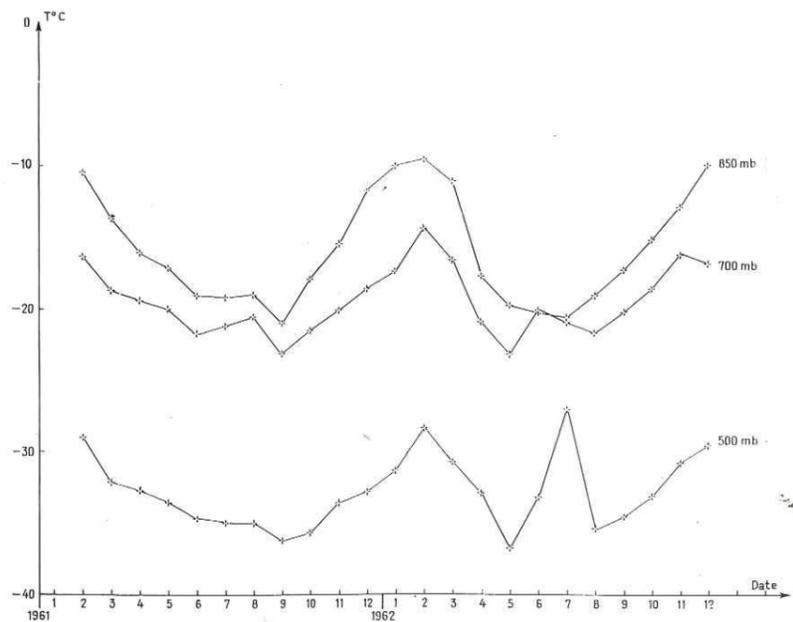
PRECIPITATIONS - TENEUR MOYENNE
BASE DUMONT d'URVILLE - 1962

FIG. 8



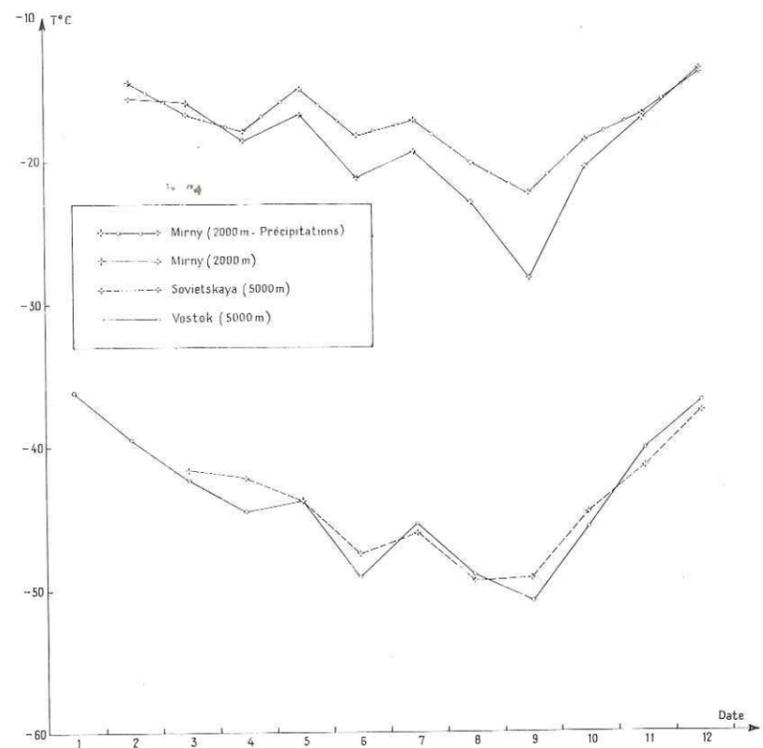
VALEURS MOYENNES MENSUELLES DE LA TEMPERATURE
BASE DUMONT d'URVILLE - 1957-1958

FIG. 9



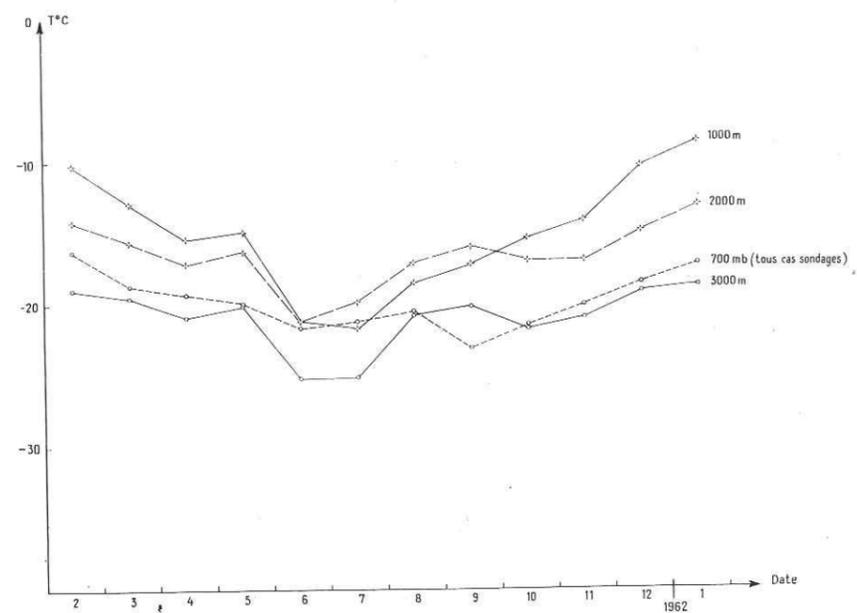
VALEURS MOYENNES MENSUELLES DE LA TEMPERATURE
BASE DUMONT d'URVILLE - 1961-1962

FIG. 10



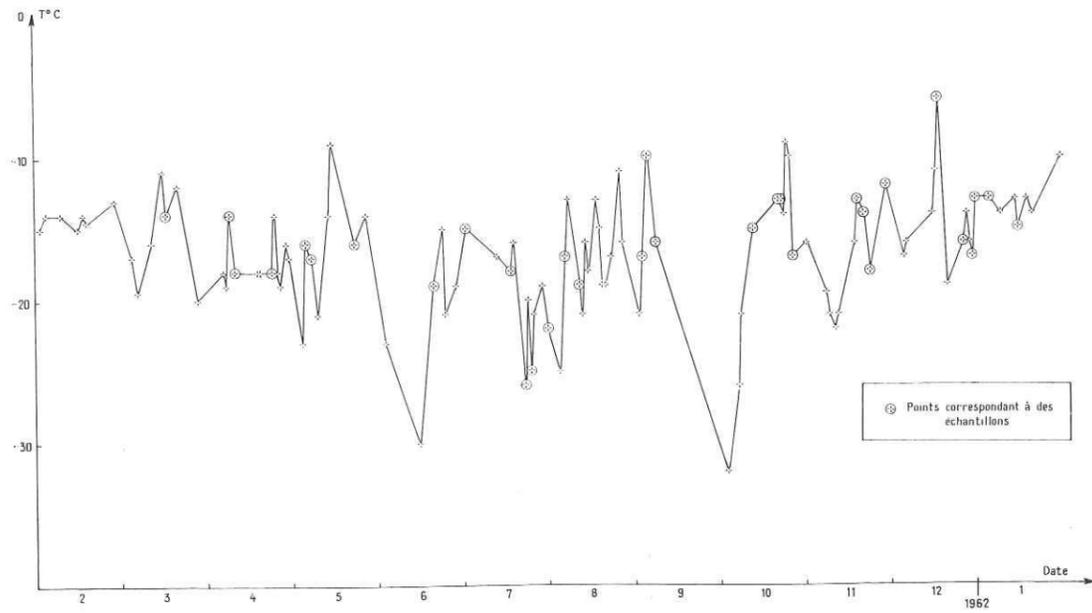
SONDAGES MOYENS MENSUELS
STATIONS RUSSES - 1958

FIG. 11



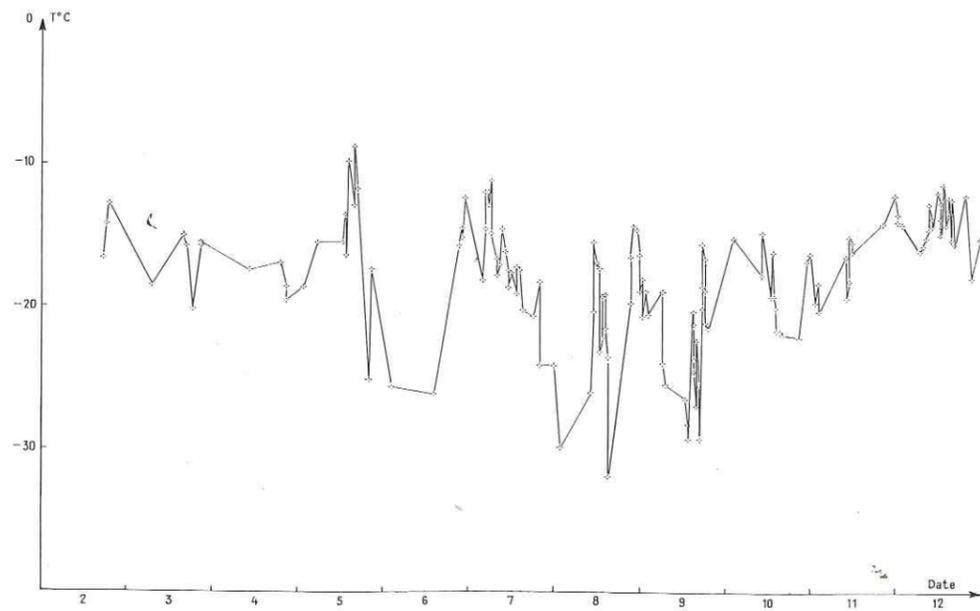
RADIOSONDAGES DANS LE CAS DE PRECIPITATIONS (moyennes mensuelles)
BASE DUMONT d'URVILLE - 1961

FIG. 12



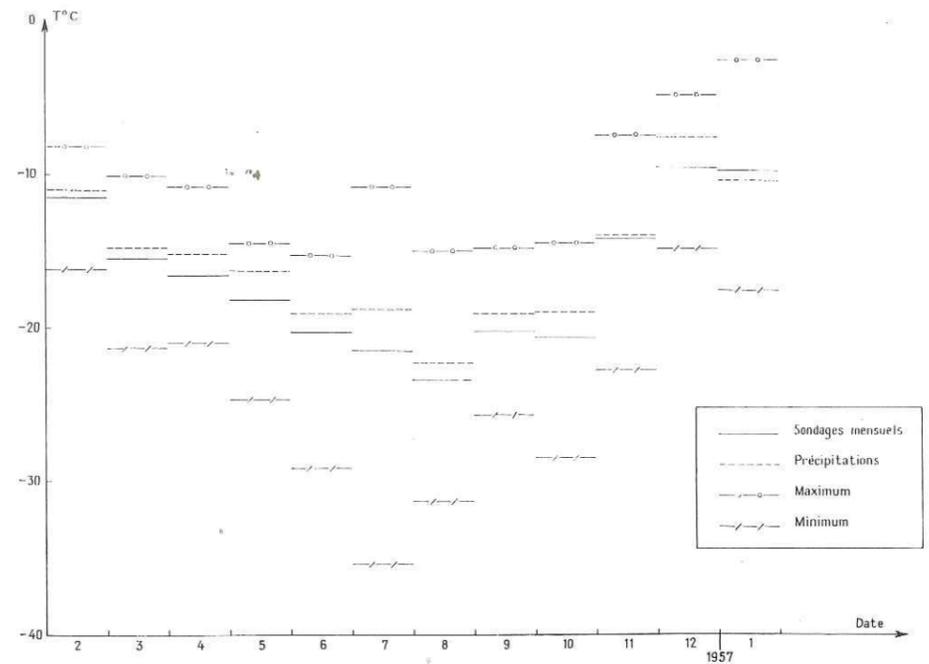
RADIOSONDAGES DANS LE CAS DE PRECIPITATIONS
BASE DUMONT d'URVILLE - 1961 (2000m)

FIG. 13



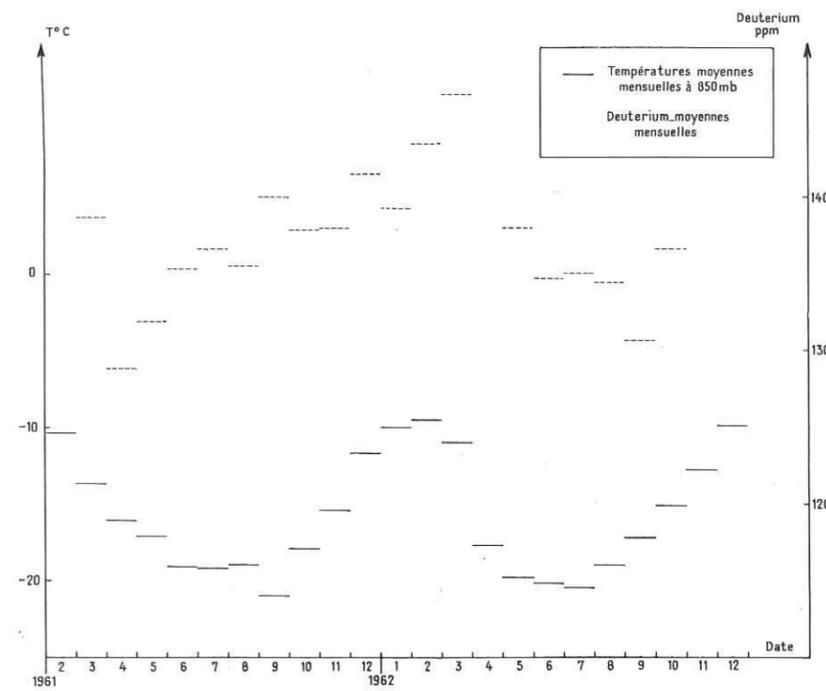
RADIOSONDAGES DANS LE CAS DE PRECIPITATIONS
MIRNY - 1958 (2000m)

FIG. 14



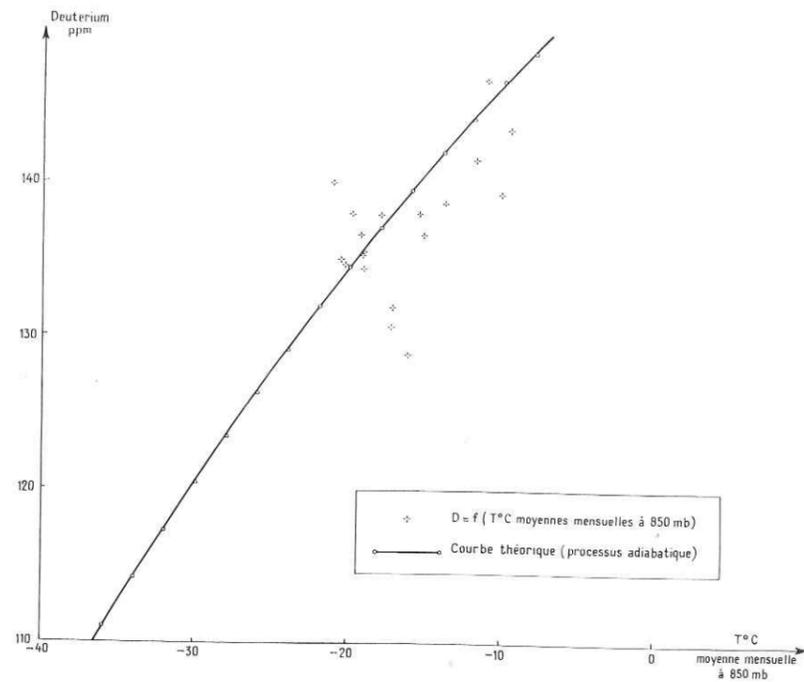
RADIOSONDAGES MENSUELS
MIRNY - 1956 (2000m)

FIG. 15



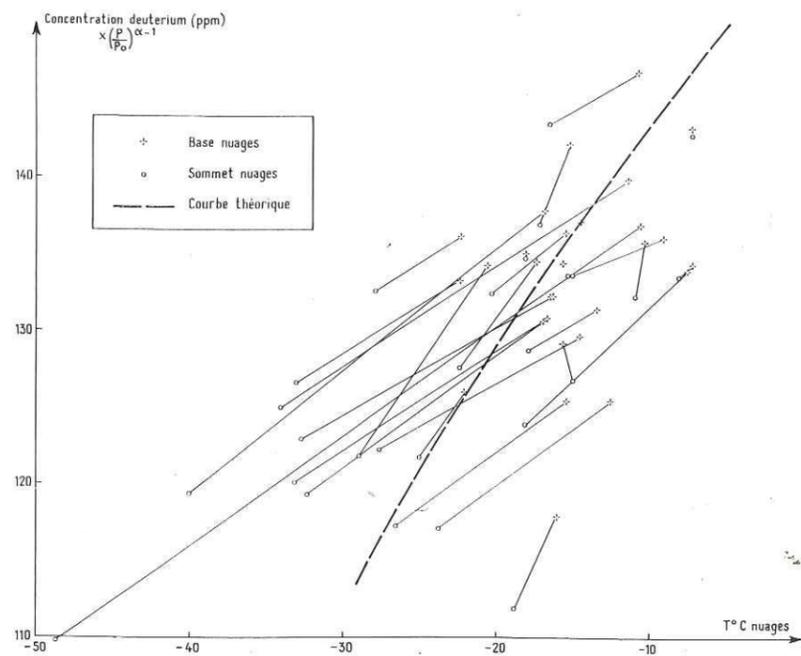
VARIATIONS DE LA TENEUR EN DEUTERIUM ET DE LA TEMPERATURE
BASE DUMONT d'URVILLE - 1961-1962

FIG. 16



RELATION ENTRE LA TENEUR EN DEUTERIUM ET LA TEMPERATURE
BASE DUMONT d'URVILLE -1961-1962

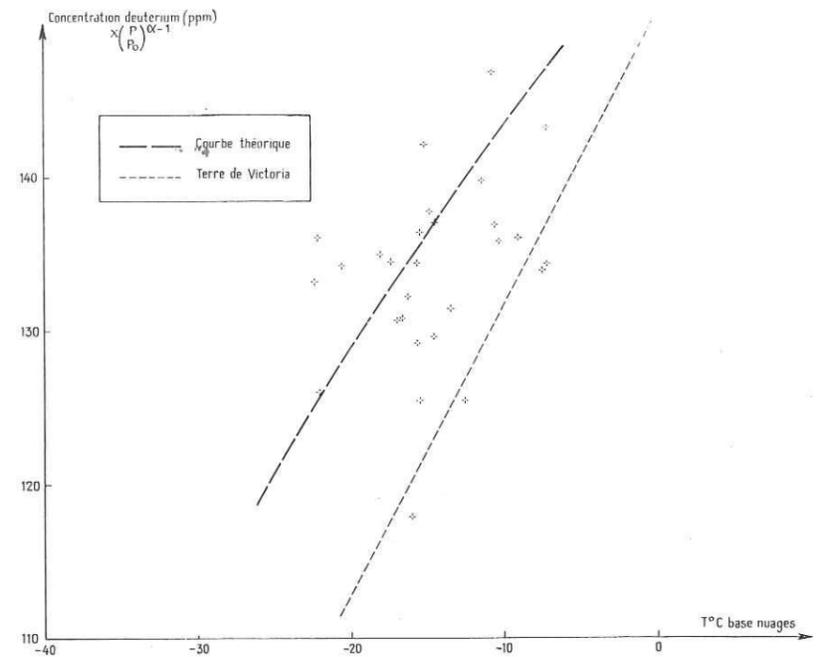
FIG. 17



RELATION ENTRE LA TENEUR EN DEUTERIUM ET LA TEMPERATURE
(base et sommet des nuages)

BASE DUMONT d'URVILLE -1961

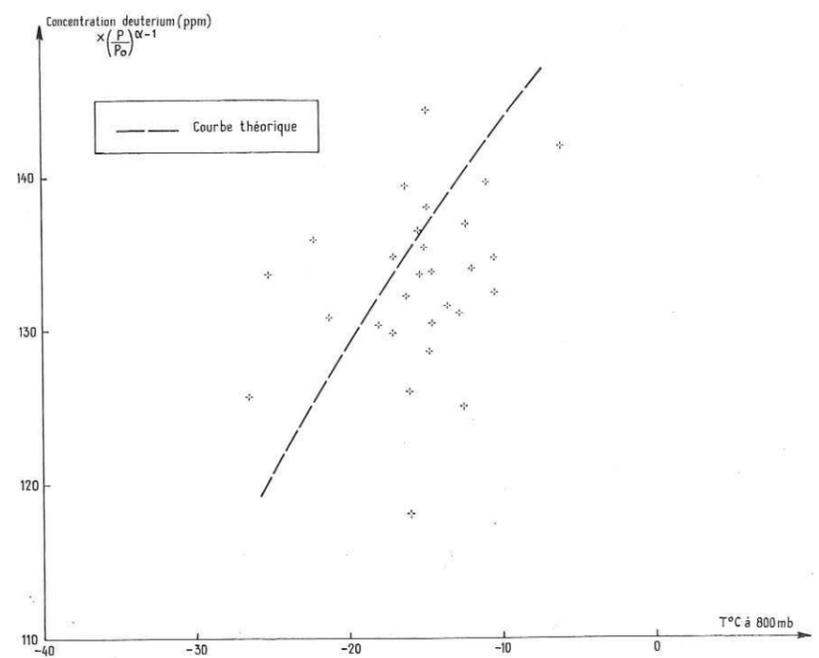
FIG. 18



RELATION ENTRE LA TENEUR EN DEUTERIUM ET LA TEMPERATURE
(base des nuages)

BASE DUMONT d'URVILLE -1961

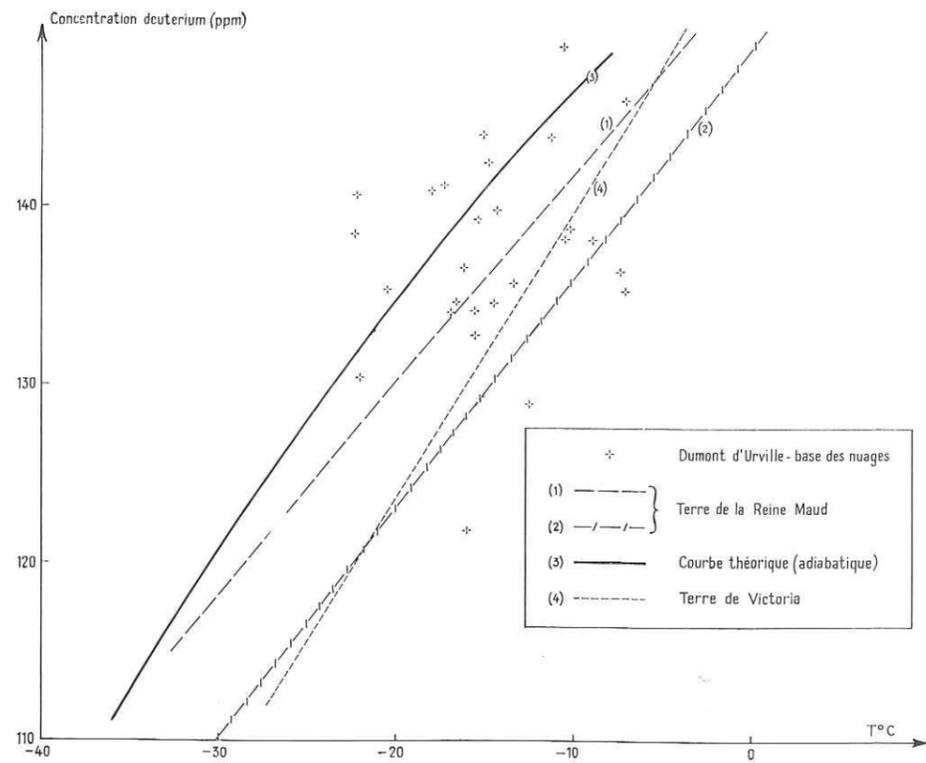
FIG. 19



RELATION ENTRE LA TENEUR EN DEUTERIUM ET LA TEMPERATURE (800mb)

BASE DUMONT d'URVILLE -1961

FIG. 20



RELATION ENTRE LA TENEUR EN DEUTERIUM ET LA TEMPERATURE
BASE DUMONT D'URVILLE - 1961

FIG. 21

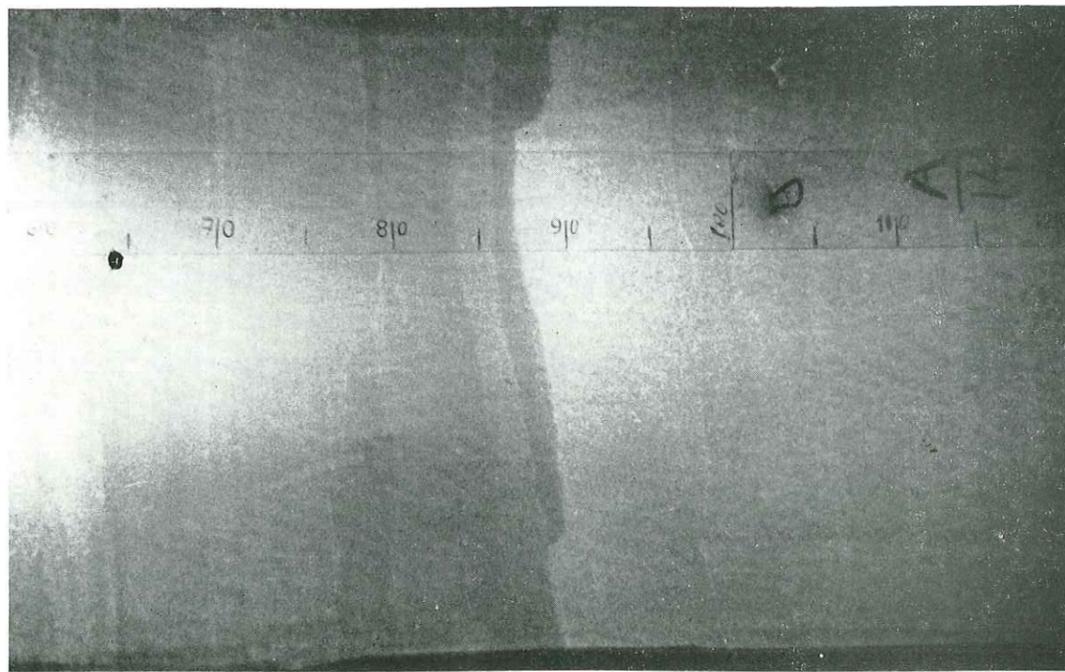


FIG. 22

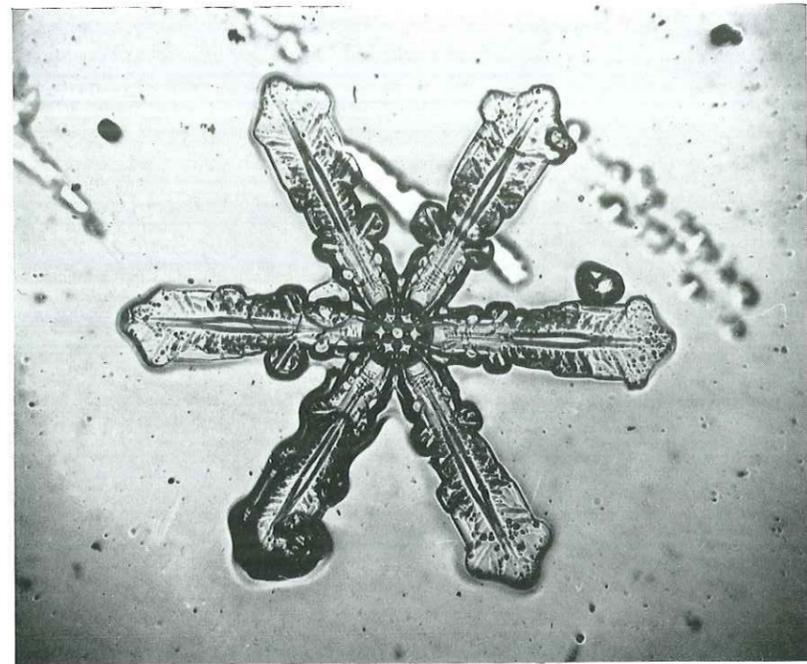


FIG. 23

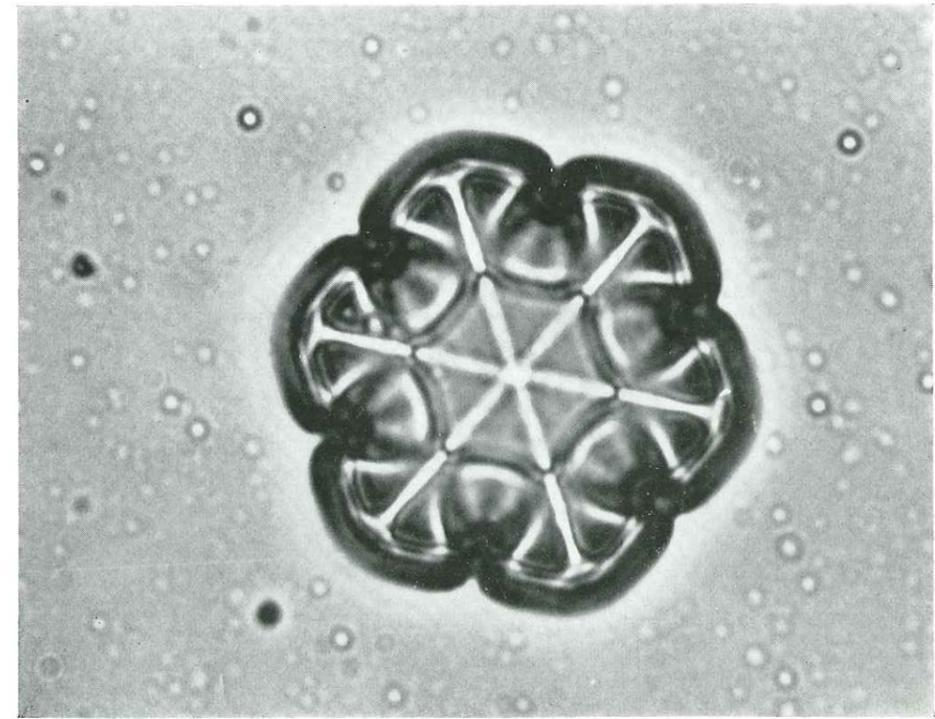


FIG. 24

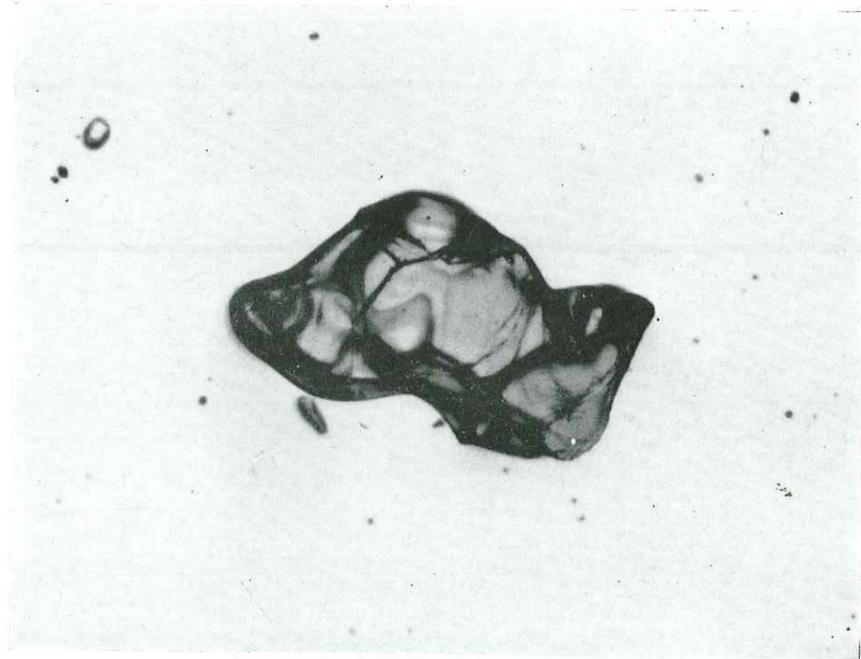


FIG. 26

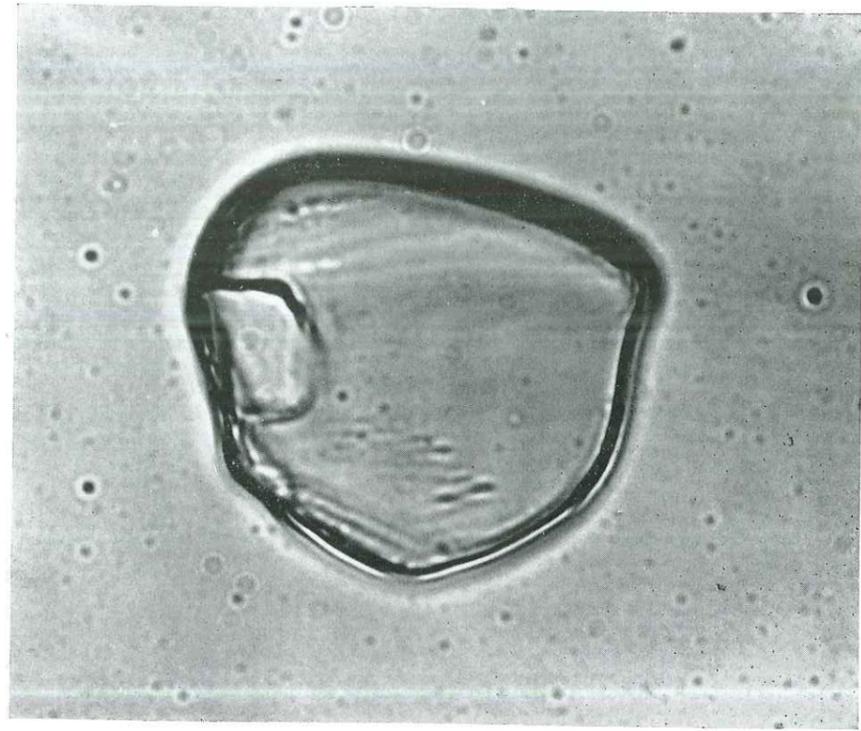


FIG. 25

DATATION STRATIGRAPHIQUE

Légende

GRAINS VF = Very fine = très petit → < 0,5 mm □
 F = Fine = petit → 0,5 - 1mm □
 M = Médium = moyen → 1,0 - 2,0 mm □
 L = Large = gros → 2,0 - 3,0 mm □

COHÉSION

□
 ▨
 ▩
 ▧
 ▦

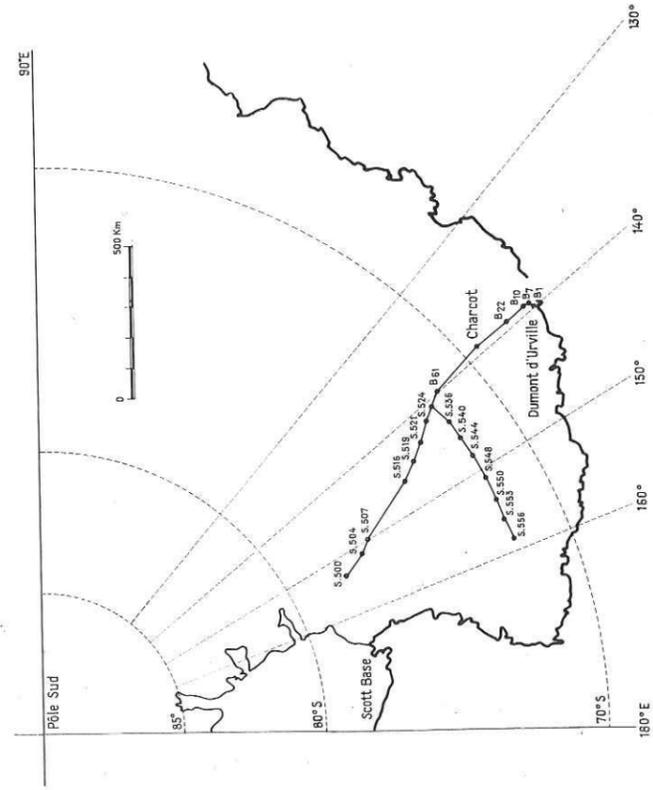
STATIONS FRANÇAISES N. Z. G. S. 15 et 16
 0 - 0,2 S, V-S = tendre, très tendre
 0,3 - 0,5 M-S = tendre à moyen
 0,6 - 0,9 M = moyen
 1,0 - 1,4 M-H = moyen à dur
 1,5 - 2,0 H, V-H = dur, très dur

NIVEAUX PARTICULIERS

▤
 ▬
 ▮
 ▯
 ▰

Cristaux de sublimation ou couche lâche à gros grains
 Couche de glace
 Colonnes de glace
 Lentilles de glace
 Croûte

FIG. 28



TERRE ADELIE - TERRE DE VICTORIA

FIG. 27

STATION A3 (B1) Puits glaciologique

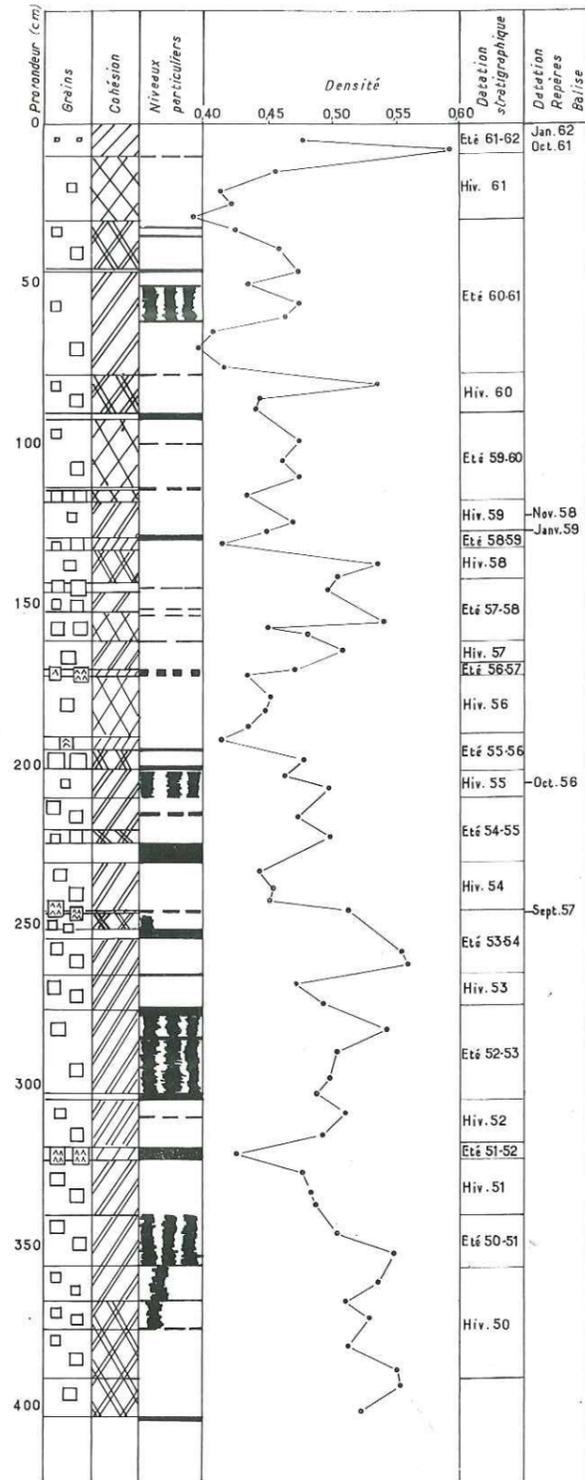


FIG. 29

STATION A3 (B1)

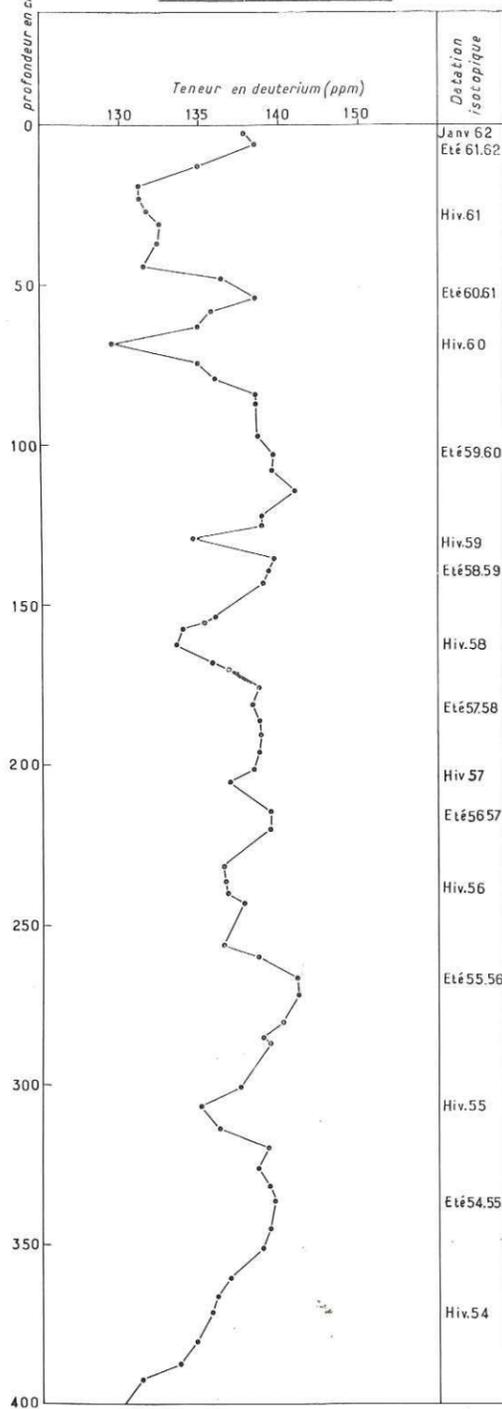


FIG. 30

STATION A28 (B7) Puits glaciologique

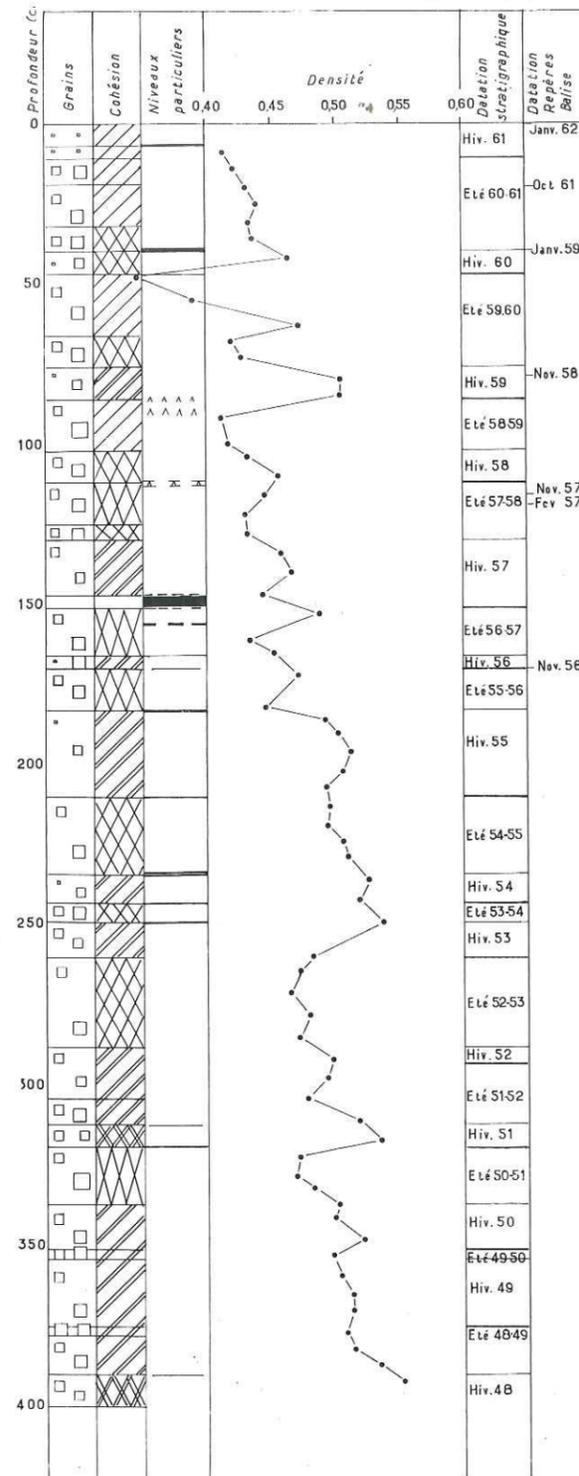


FIG. 31

STATION A28 (B7)

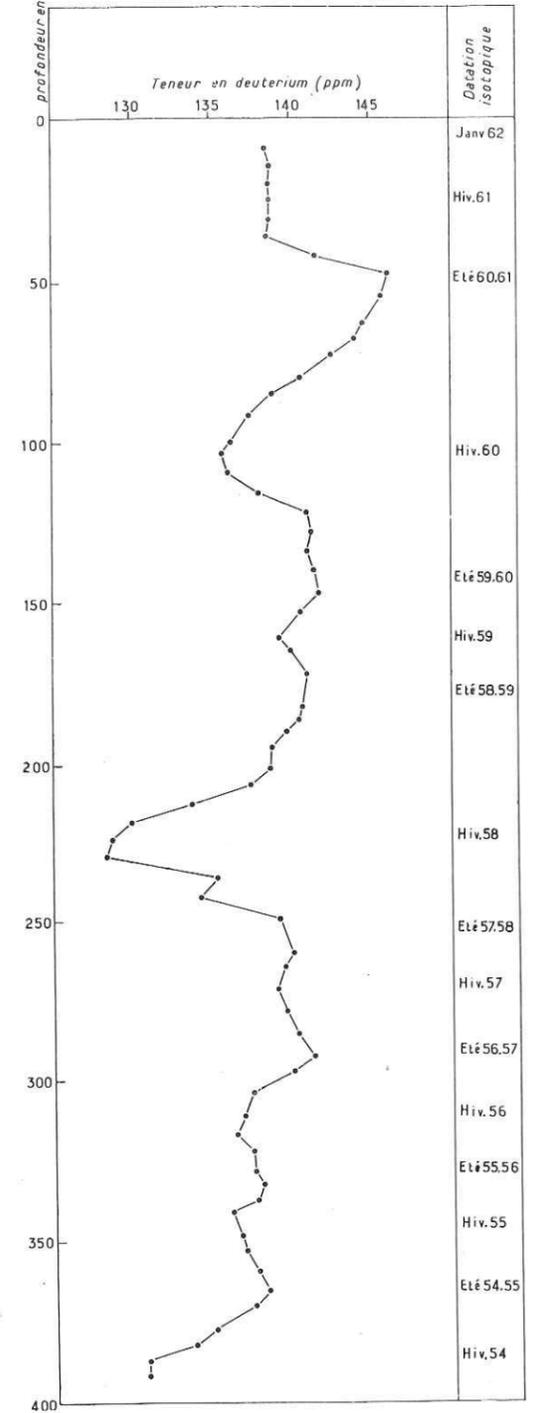


FIG. 32

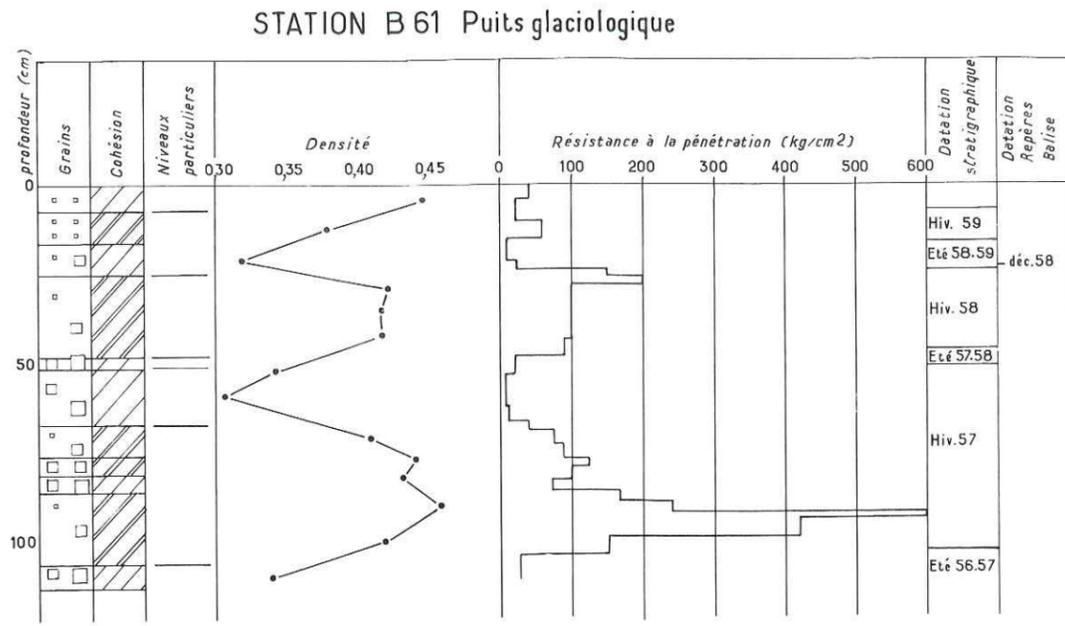


FIG. 33

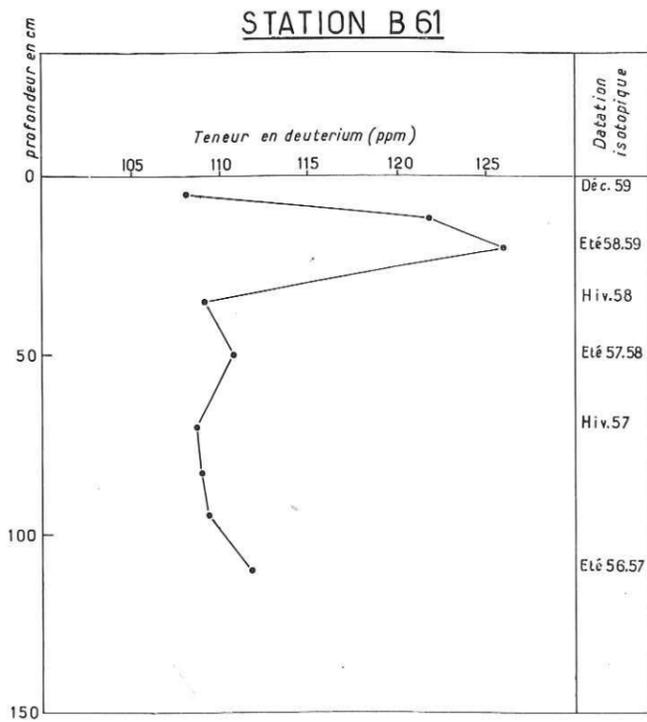


FIG. 34

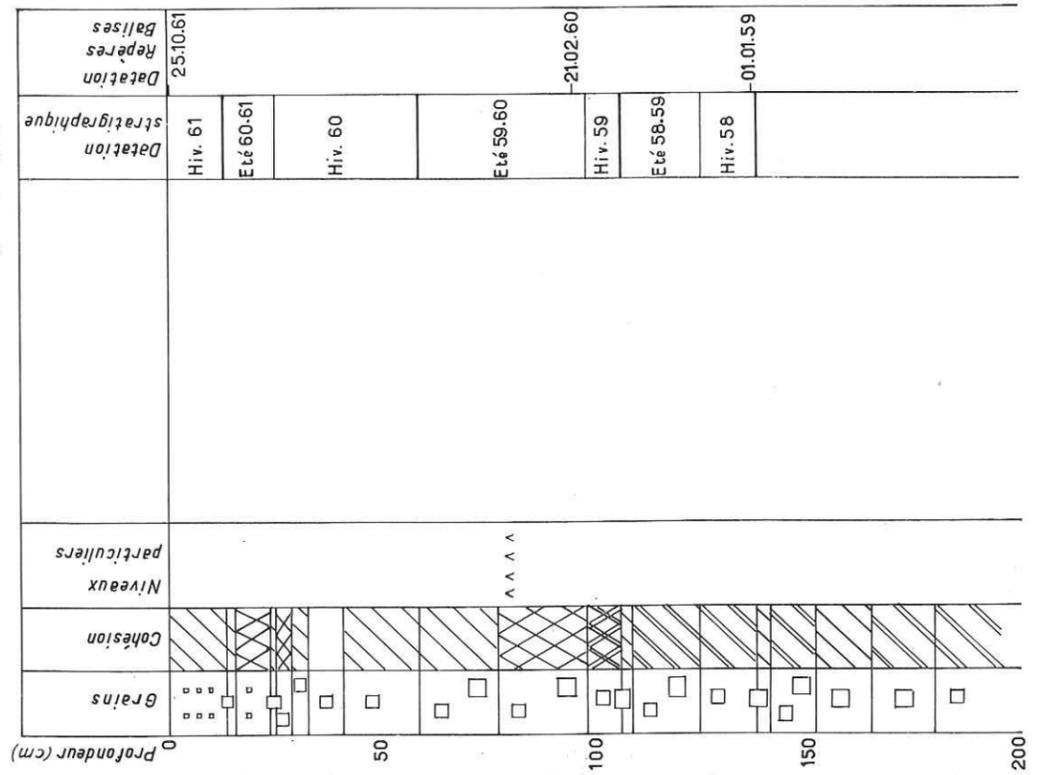


FIG. 35

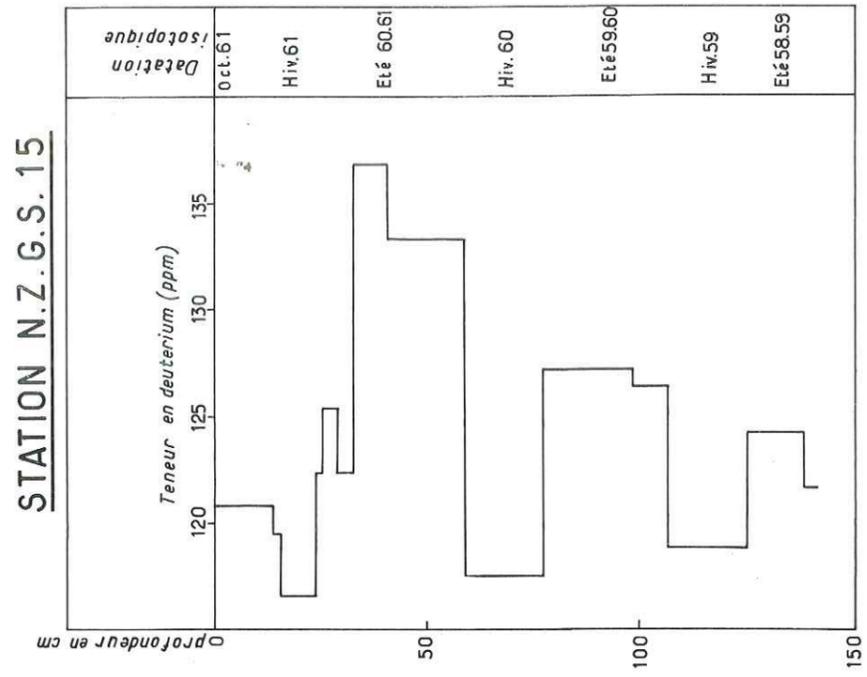


FIG. 36

STATION N.Z.G.S.16 Puits glaciologique

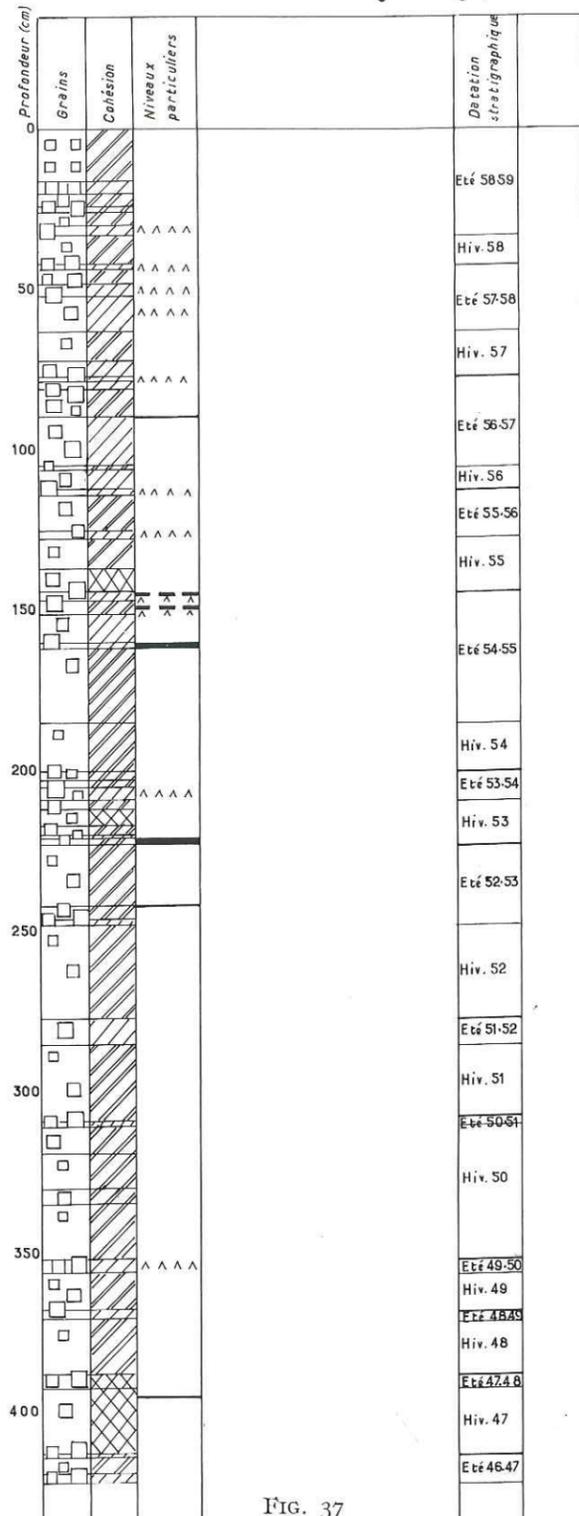


FIG. 37

STATION N.Z.G.S. 16

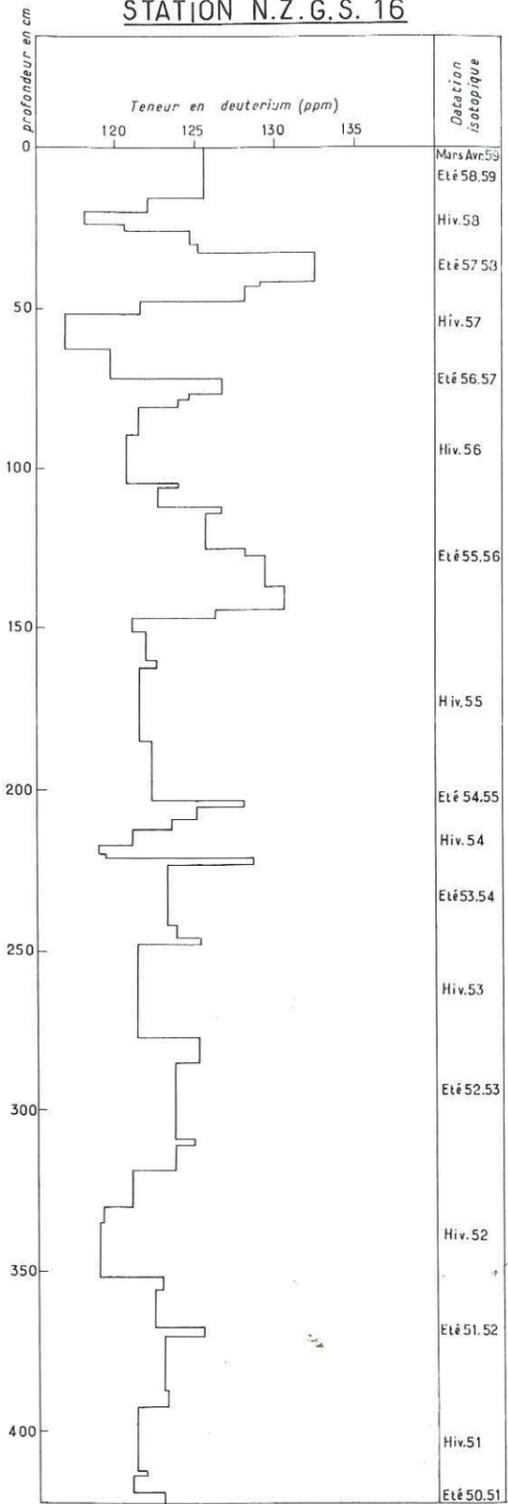
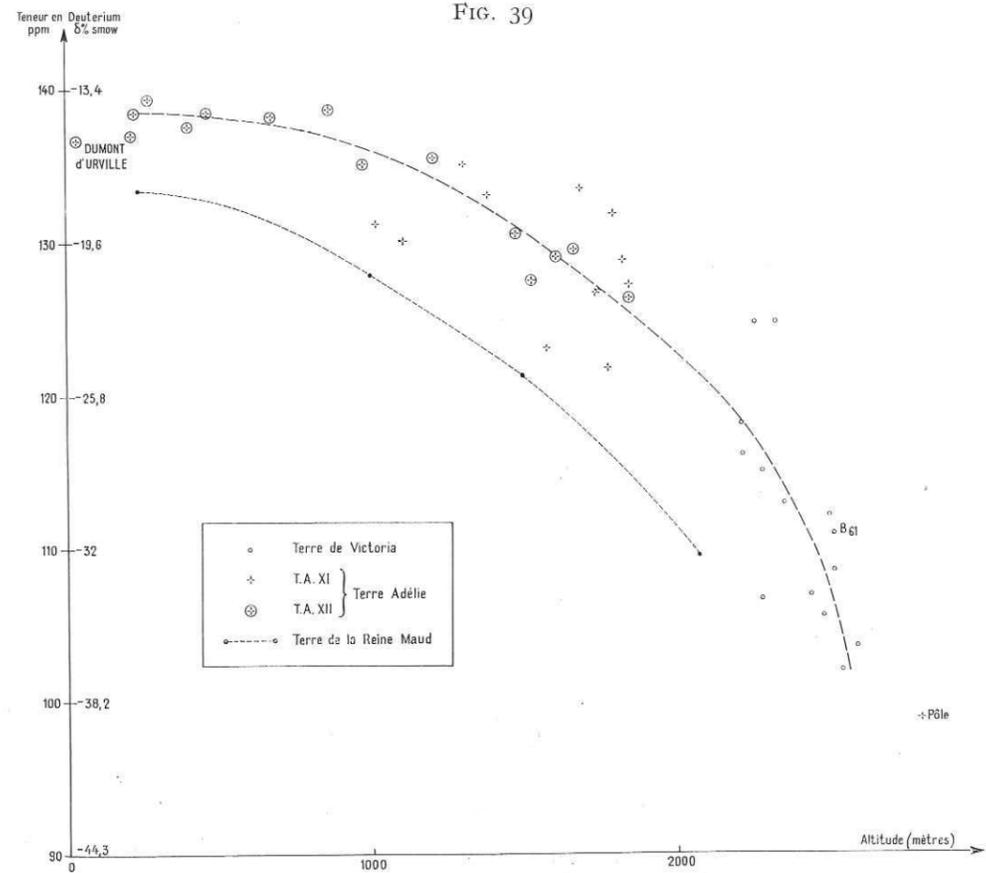


FIG. 38

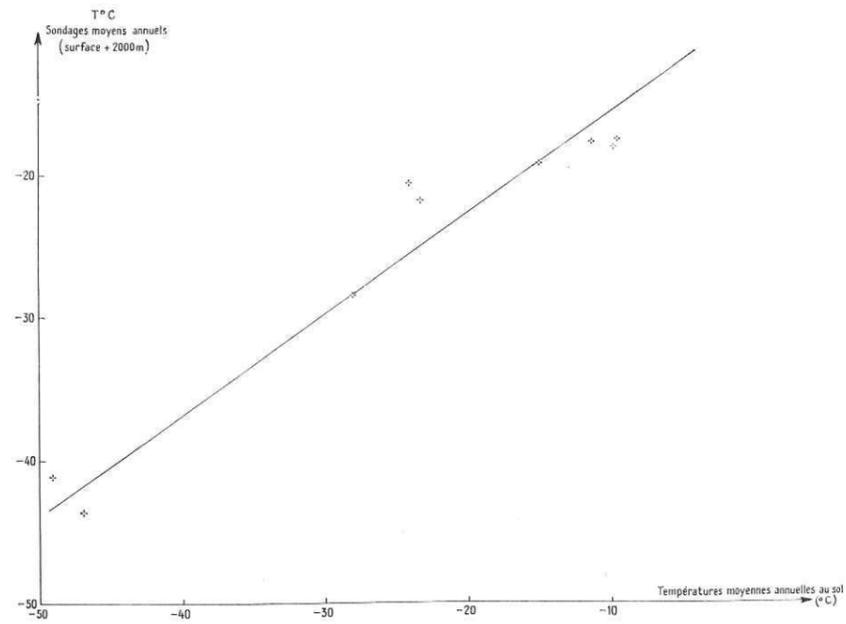


FIG. 39

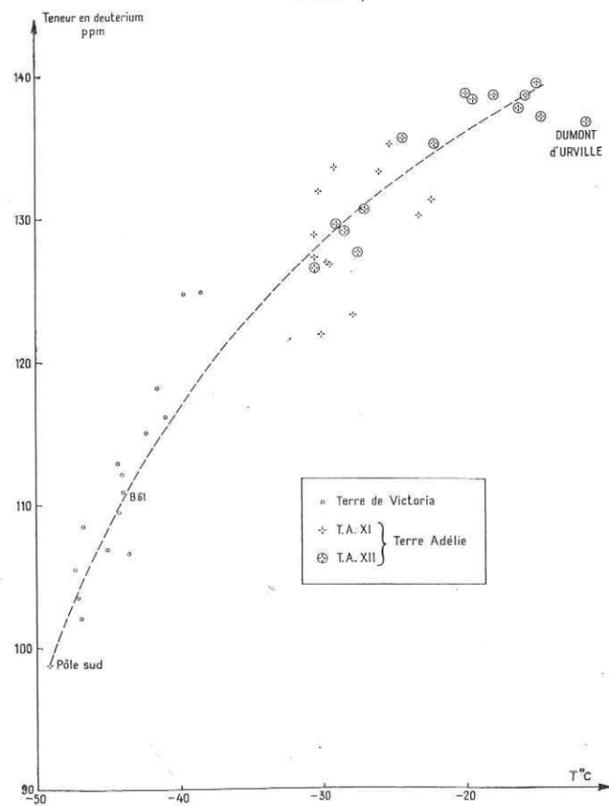


TENEUR EN DEUTERIUM EN FONCTION DE L'ALTITUDE

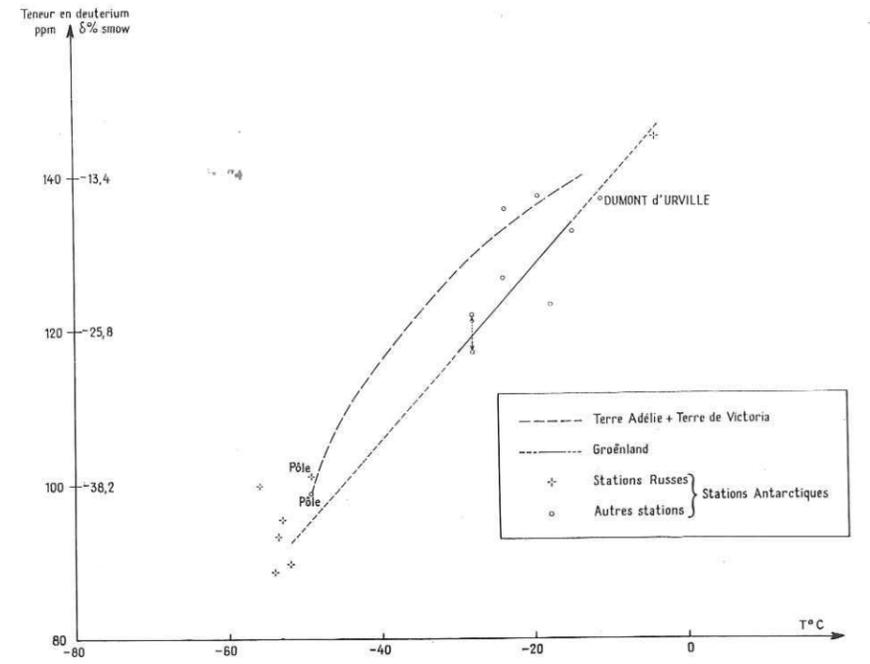
FIG. 40



RELATION ENTRE LES TEMPERATURES MOYENNES ANNUELLES
AU SOL ET A +2000 m
FIG. 41

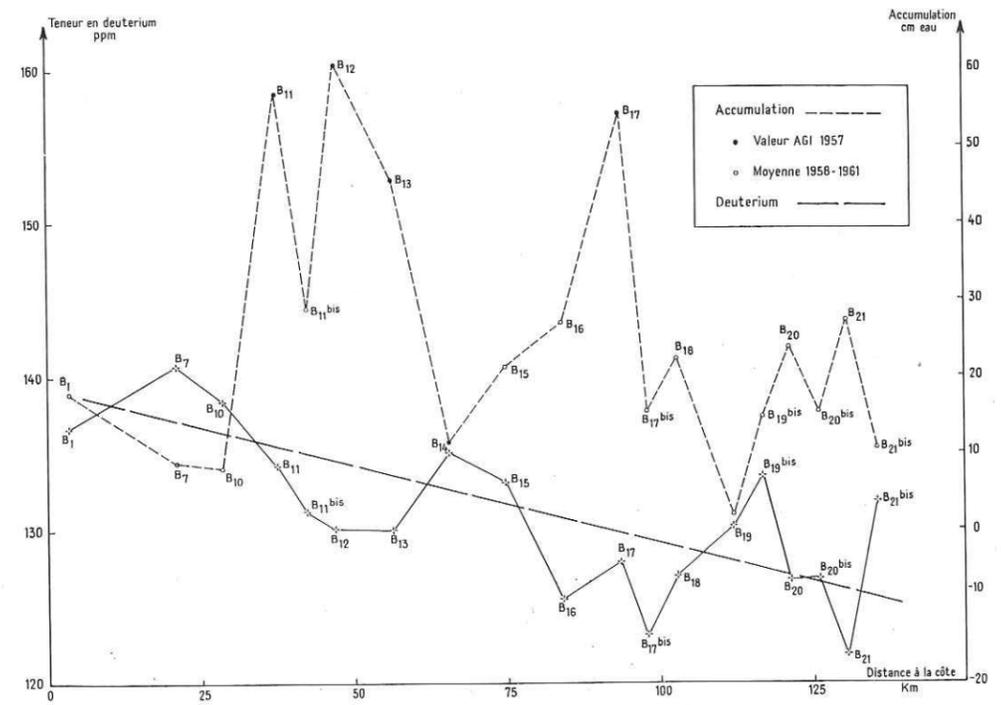


TENEUR EN DEUTERIUM EN FONCTION DE
LA TEMPERATURE MOYENNE ANNUELLE
FIG. 42



TENEUR EN DEUTERIUM EN FONCTION DE LA TEMPERATURE MOYENNE ANNUELLE

FIG. 43



TENEUR EN DEUTERIUM ET ACCUMULATION EN FONCTION DE LA DISTANCE A LA COTE

FIG. 44



FIG. 45

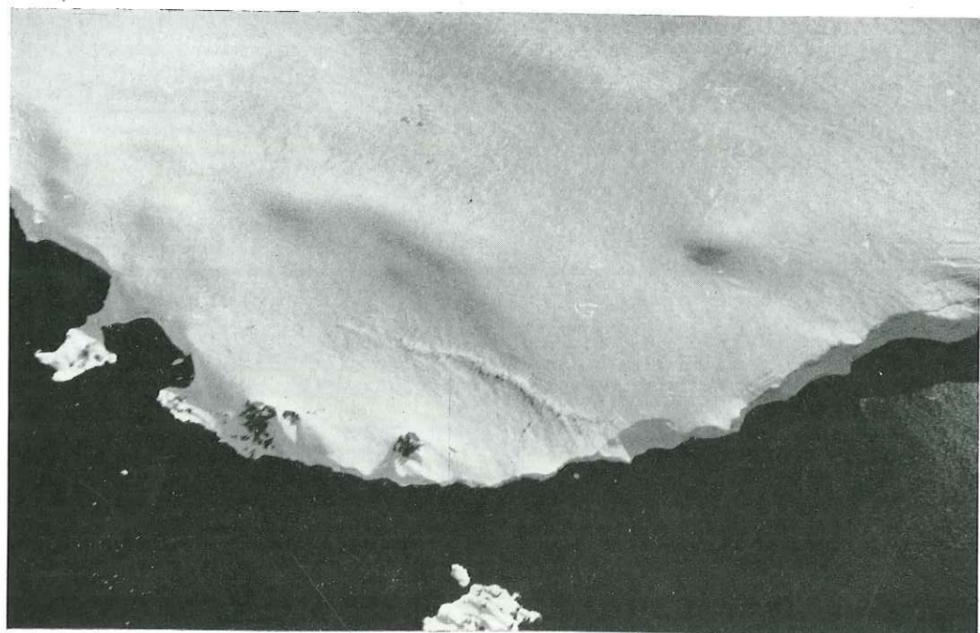
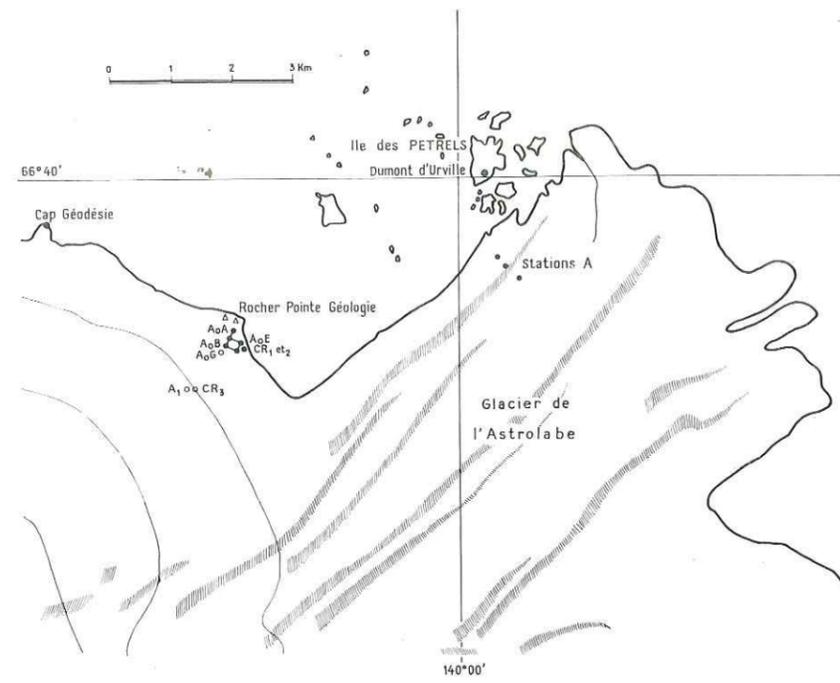
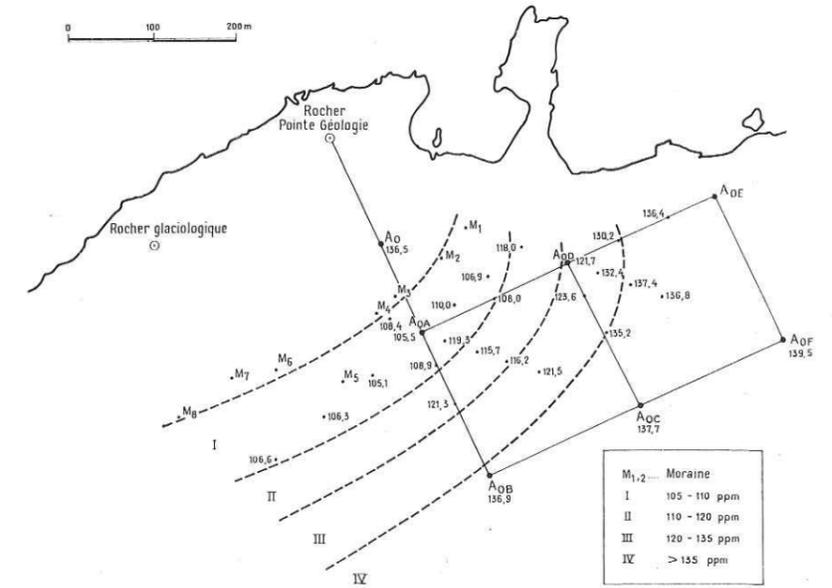


FIG. 46



STATIONS GLACIOLOGIQUES COTIERES EN TERRE ADELIE

FIG. 47



CONCENTRATION ISOTOPIQUE DE LA GLACE COTIERE (moraine)
TERRE ADELIE

FIG. 48

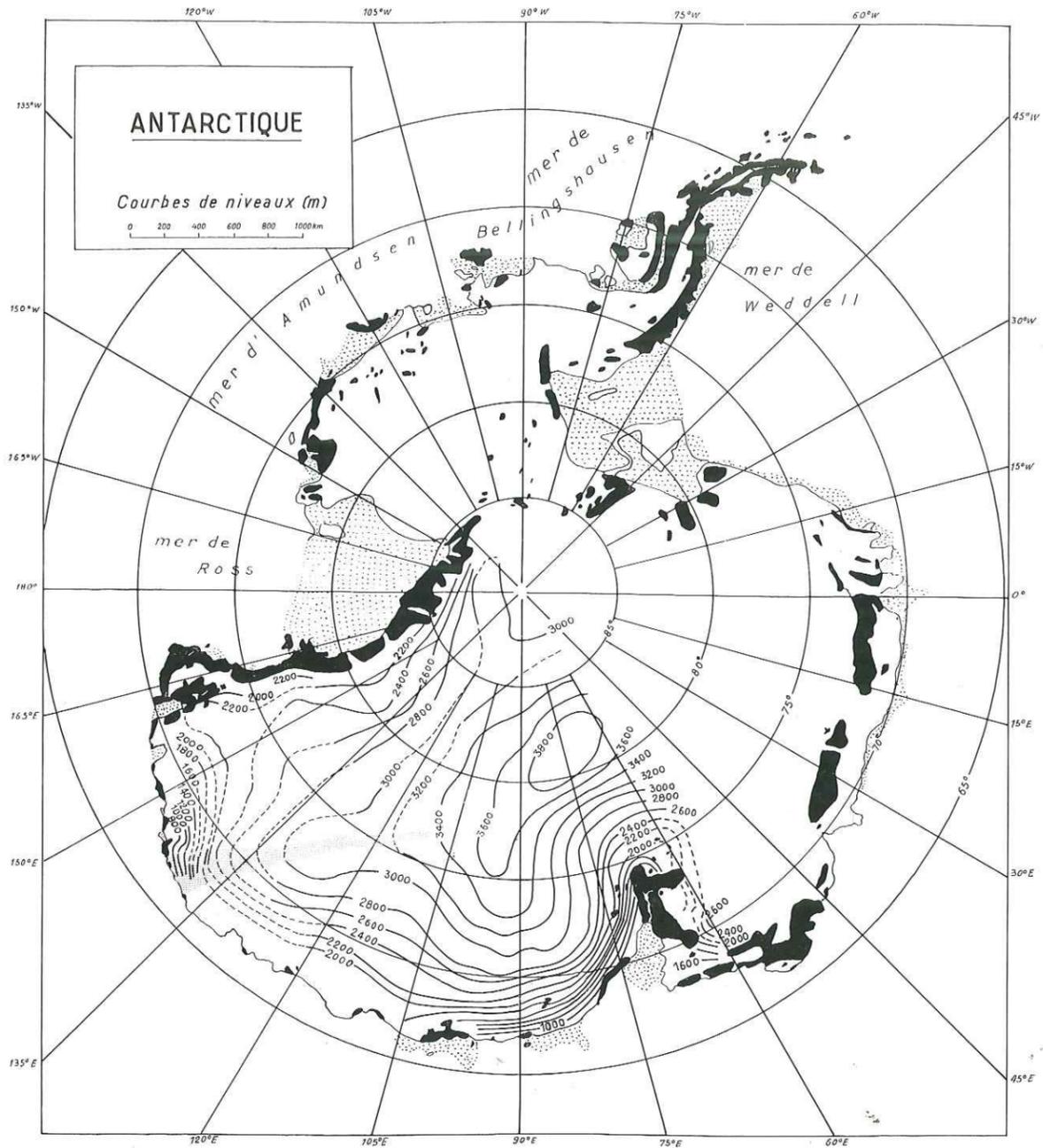
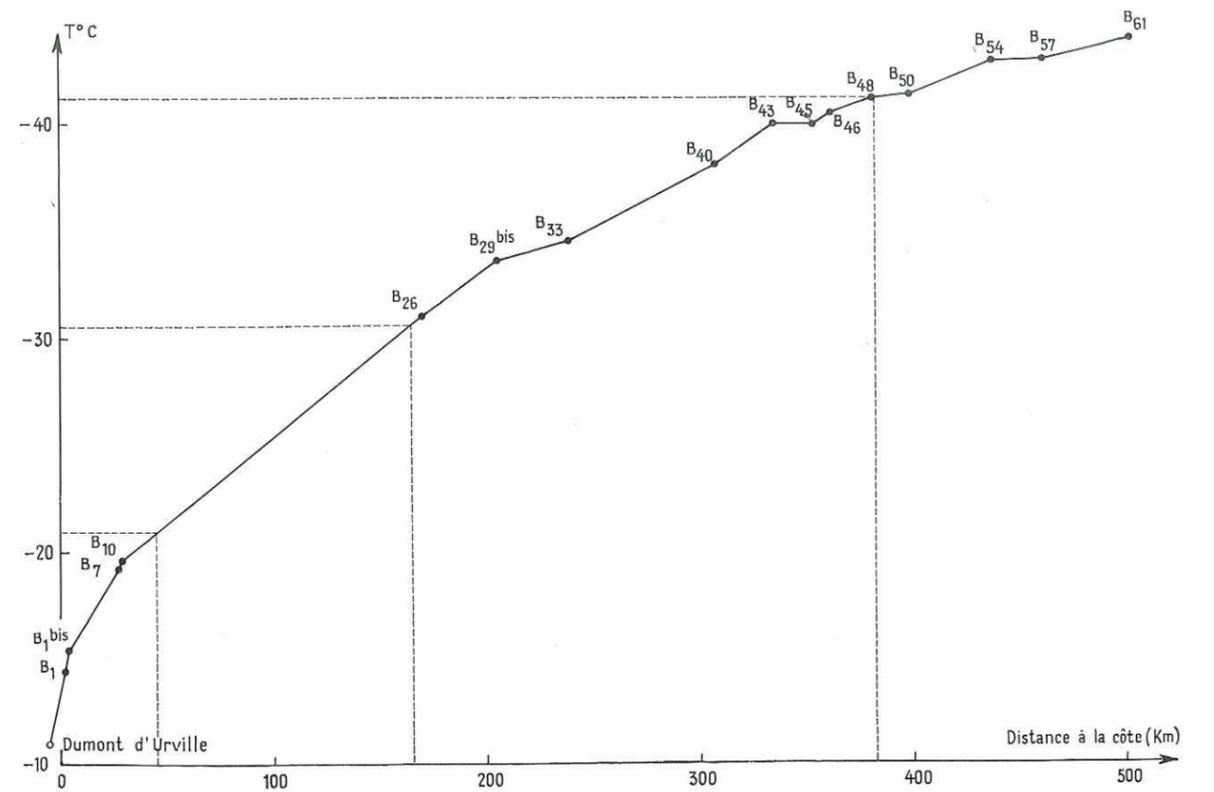


FIG. 49. — D'après C. R. BENTLEY, 1962.



TEMPERATURE (°C) EN FONCTION DE LA DISTANCE A LA COTE
TERRE ADELIE

FIG. 50

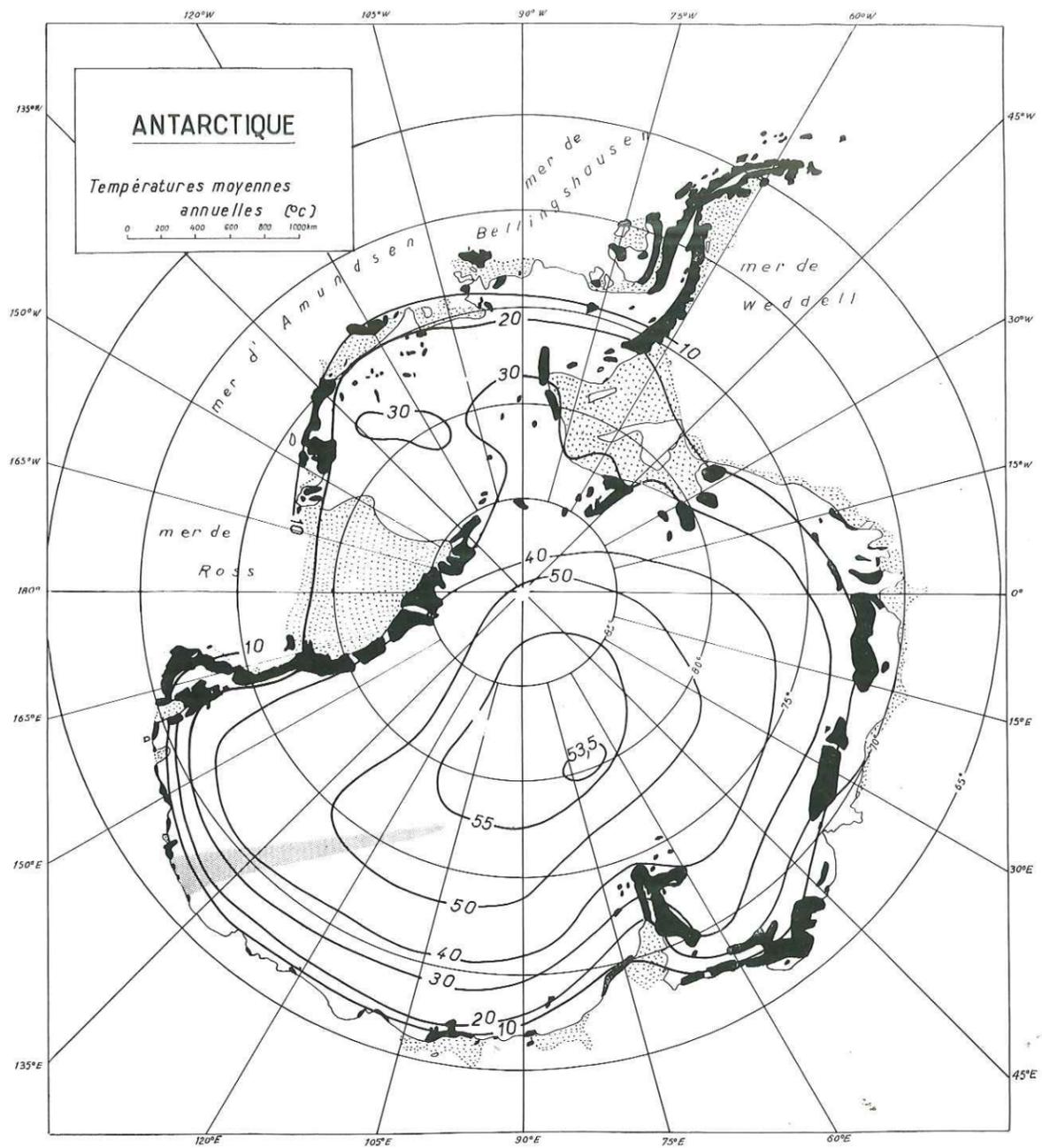


FIG. 51. — D'après R. L. CAMERON et R. P. GOLDTHWAIT, 1961.

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

P R O F E S S E U R S

Doyen : M. ZAMANSKY

JULIA G.	T	Analyse supérieure et algèbre supérieure.	CAGNIARD	T	Géophysique appliquée.
PRENANT	T	Anatomie et Histologie comparée.	CHAMPETIER	T	Chimie macromoléculaire.
GRASSÉ	T	Évolution des êtres organisés.	CUVILLIER	T	Micropaléontologie.
PRÉVOST	T	Chimie organique.	JUNG	T	Pétrographie.
WYART	T	Minéralo. et cristallog.	TRILLAT	T	Microscopie et diffraction électronique.
TEISSIER	T	Zoologie.	WIEMANN	T	Chimie organique et struct.
MANGENOT	T	Biologie vég. (Orsay).	JACQUINOT	T	Spectroscopie et physique céleste (Orsay).
AUGER	T	Physique quantique et relativité.	VASSY	T	Physique de l'atmosphère.
MONNIER	T	Physiologie générale.	DESTOUCHES	T	Théories physiques.
PIVETEAU	T	Paléontologie.	AMIEL	T	Chimie générale.
ROCARD	T	Physique (E.N.S.).	HOCART	T	Minéralogie et cristallog.
CARTAN	T	Mathématiques (E.N.S.).	MATHIEU J. P.	T	Physique optique.
LAFFITTE	T	Chimie générale.	COUTEAUX	T	Biologie animale (P.C.B.).
FAVARD	T	Géométrie supérieure.	MAY	T	Zoologie (Orsay).
COULOMB	T	Physique du Globe.	CHOQUET	T	Théorie des fonctions et topologie.
Mlle COUSIN	T	Biologie animale (S.P.C.N.).	FELDMANN	T	Biologie végét. marine.
CHRETIEN	T	Chimie minérale.	GUINIER	T	Physique des solides (Orsay)
DRACH	T	Zoologie.	JOST	T	Physiologie comparée.
KASTLER	T	Physique (E.N.S.).	FORTET	T	Calcul des probabilités et physique mathématique.
EPHRUSSI	T	Génétique.	SCHARTZ	T	Calcul diff. et intégral.
RIVIÈRE	T	Géologie S.P.C.N. et sédim.	CHOUARD	T	Physiologie végétale.
GAUTHERET	T	Biologie vég. (P.C.B.).	MALAVARD	T	Aviation (techn. aéronaut.).
LUCAS R.	T	Recherches physiques.	BRELOT	T	Calcul diff. et intégral.
THOMAS A.	T	Biologie cellulaire.	NORMANT	T	Chimie organique.
ARNULF	T	Optique appliquée.	BENARD	T	Chimie minérale.
MORAND	T	Physique enseignement.	BUVAT	T	Botanique (E.N.S.).
SOLEILLET	T	Physique (P.C.B.).	DUGUE	T	Statistiques mathématiques
FORTIER	T	Mécanique Exp. des fluides.	SOULAIRAC	T	Psychophysiologie.
DANJON	T	Astronomie.	ULRICH	T	Physiologie végétale.
PETT	T	Biologie maritime.	MARÉCHAL	T	Optique théori. et appliq.
QUENEY	T	Météorologie et dynamique atmosphérique.	KIRRMANN	T	Théories chimiques.
GALLIEN	T	Embryologie.	CHADEFAUD	T	Botanique.
EICHHORN	T	Botanique.	Mlle LE BRETON	T	Physio. de la nutrition.
DE CUGNAC	T	Biologie vég. (S.P.C.N.).	LELONG	T	Application de l'analyse à la géométrie.
Mlle CAUCHOIS	T	Chimie physique.	DEVILLERS	T	Anatomie et histol. Comp.
THELLIER	T	Physique du Globe.	EHRESMANN	T	Topologie algébrique.
L'HERITIER	T	Biologie gén. (Orsay).	FRANÇON	T	Physique (S.P.C.N.).
GRIVET	T	Radioélectricité (Orsay).	GLANGEAUD	T	Géographie phys. et géol. dynamique.
PONCIN	T	Mécanique générale.	GODEMENT	T	Mathématiques (M.P.C.).
DUBREIL	T	Arithm. et théorie des nombres.	PISOT	T	Tech. mathém. de la phys.
QUELET	T	Chimie organique.	ROCH	T	Géologie.

SCHATZMAN	T	Astrophysique.	LENDER	T	Biol. anim. S.P.C.N. (Orsay).
TERMIER	T	Paléontologie stratig.	MAGAT	T	Physico-chimie des radio-éléments.
ZAMANSKY	T	Mathématiques générales.	Mlle QUINTIN	T	Électrochimie.
LENNUIER	T	Physique (M.G.P.).	MONOD	T	Chimie du métabolisme.
RIZET	T	Génétique.	BENOIT	T	Physiol. anim. (Orsay).
ROUTHIER	T	Géologie appliquée.	DE POSSEL	T	Analyse numérique.
Mme TONNELAT	T	Physique théorique.	CHARLOT	T	Chimie analytique.
DIXMIER	T	Mathématiques (M.P.C.).	LEMEE	T	Physiol. Vég. B.M.P.V. (Orsay).
SOUCHAY	T	Chimie générale.	GUERIN	T	Chimie M.P.C. (Orsay).
AIGRAIN	T	Électrotechnique géné.	CHATELET M.	T	Chimie P.C.B.
BRUSSET	T	Chimie systématique.	JEAN	T	Physique nucl. (Orsay).
LEVY M.	T	Physique théorique des hautes énergies (Orsay).	MATTIER	T	Physique S.P.C.N.
Mme CHAIX	T	Chimie biologique.	BERGERARD	T	Zoologie (Orsay).
Mme HUREL-PY	T	Biologie végétale (P.C.B.).	BERTIN	T	Électronique (Orsay).
PIAUX	T	Chimie (M.P.C.).	BOUSSIÈRES		Chimie des radioéléments (Orsay).
BRUN	T	Mécan. théor. des fluides.	Mme COUTURE	T	Thermodynamique et Méc. physique.
LEDERER	T	Chimie biologique.	ELLENBERGER	T	Géologie des grandes régions du Globe.
Mme DUBREIL	T	Mathématique (Agrég.).	FRANC	T	Biologie animale P.C.B.
Mme LELONG	T	Mathématiques II (E.N.S.).	SCHNELI		Botan. tropicale (Orsay).
BELLAIR	T	Géologie (S.P.C.N.).	STOLKOWSKI	T	Physiologie végétale.
COTTE	T	Physique électricité.	ACHER		Chimie biol. (Orsay).
DUBOIS J. E.	T	Chimie organique.	BAUDOIN		Biologie animale P.C.B.
LAMOTTE	T	Zoologie (E.N.S.).	BEAUMONT		Biologie animale S.P.C.N.
MICHEL A.	T	Chimie minérale (Orsay).	BLAMONT	T	Géophysique ionosphère.
OLMER	T	Énergétique générale.	BOURREAU		Botanique.
ROUAULT	T	Électricité (Orsay).	CURIE D.		Physique M.G.P.
GAUTHIER	T	Mécanique appliquée.	DURAND-DELGA	T	Géologie.
BARCHEWITZ	T	Chimie physique.	FRÉON	T	Chimie organique (Orsay).
BROSSEL	T	Physique atomique.	HELLER	T	Physiolog. végétale.
BUSER	T	Physiologie comparée.	TORTRAT	T	Calcul des probabilités.
CAMUS	T	Physiol. végétale B.M.P.V.	CAILLEUX		Géologie (S.P.C.N.).
CASTAING	T	Physique II thermod. (Orsay).	MAGNAN	T	Physique S.P.C.N.
CURIEN	T	Minéralo. et Cristallog.	DAUDEL	T	Mécanique ondulatoire appli. à la chimie théorique et à la physique nucléaire.
MOYSE	T	Physiologie végét. (Orsay).	Mlle FOURCROY		Biologie végétale S.P.C.N.
NOIROT	T	Évolution des Êtres org.	Mme CHOQUET-BRUHAT	T	Mécan. analytique et mécanique céleste.
PANNETIER	T	Chimie générale.	Mlle VEIL		Physiologie générale.
POSSOMPES	T	Zoologie.	LWOFF	T	Microbiologie.
PULLMANN	T	Chimie quantique.	SIESTRUNCK	T	Mécan. phys. et expérim.
TEILLAC	T	Phys. nucl. et radio-activité	LACOMBE	T	Métallurg. des métaux nucl.
TONNELAT	T	Biologie physico-chimie.	BROCHARD	T	Physique P.C.B. (Orsay).
VILLE	T	Économétrie.	CABANNES	T	Mécanique générale.
WILLEMART	T	Chimie (P.C.B.).	LESIEUR	T	Mathématiques I (Orsay).
DODE	T	Chimie (Orsay).	MAZET	T	Mécan. générale (Orsay).
FREYMANN	T	Recherches physiques.	CAIRE		Géographie phys. et géolog. dynamique.
GUINOCHET	T	Biol. vég. S.P.C.N. (Orsay).	COMOLET	T	Mécanique des fluides.
ROLLET	T	Chimie minérale.	CORABŒUF		Physiologie animale (Orsay).
Mlle JOSIEN	T	Chimie S.P.C.N.	DELLOUE		Physique de l'exosphère.
CHEVALLEY	T	Géométrie algéb. et théorie des groupes.	GORENFLOT		Botanique II (Orsay).
ARNOULT	T	Électronique (Orsay).	HOULLON		Biologie animale P.C.B.
CHAPELLE	T	Physique (Orsay).	JULLIEN J.		Chimie S.P.C.N. (Orsay).
DELANGE	T	Mathématiques I (Orsay).	MALGRANGE	T	Technique math. de la phys. (Orsay).
DENY	T	Mathématiques gén. (Orsay).	OLIVIER		Antropologie.
GERMAIN	T	Mécan. théor. des fluides.	NOZERAN	T	Botanique II (Orsay).
LUCAS G.	T	Géologie.			
ALLARD	T	Chimie physique.			
BERTHELOT	T	Phys. des particules fond.			
BRICARD	T	Météor. et phys. de l'atmosphère.			
Mme ALBE-FESSARD	T	Psychophysiologie.			
FRIEDEL	T	Phys. des solides (Orsay).			
JULIA M.	T	Études des moléculaires naturelles complexes.			

BLANC-LAPIERRE	T	Physique E.N.S. (Orsay).	FURON		Géologie S.P.C.N.
CHEVAUGEON	T	Botanique (Orsay).	Mme GANS	T	Génétique.
KAHANE	T	Mathématiques (Orsay).	GENEVES		Biologie végétale P.C.B.
SAMUEL	T	Mathémat. E.N.S. féminines.	GUILBERT		Physique (C.U.S. Orléans).
KOURGANOFF	T	Astronomie (Orsay).	HUPE		Pétrographie.
THIRY	T	Mécanique céleste.	HOLLANDE	T	Biologie générale.
ABELES		Physique S.P.S.C.N.	LIONS	T	Analyse numérique.
AMAT		Physique P.C.B.	MAITTE		Chimie P.C.B.
AUBOIN		Géologie.	MEYER		Physique propédeutique.
Mme BENOIT-GUEUTAL		Phys. nucl. et radioact.	NICOLAS		Géologie appliquée.
BOUGIS		Biologie marine (Villefranche sur-Mer).	PANIGEL		Biologie générale.
BRUHAT	T	Mathématiques M.P.C.	RAVIER	T	Pétrographie.
BRUNN	T	Géolo. historique (Orsay).	ROSEAU		Mécan. théor. des fluides.
CHABBAL		Physique M.G.P. (Orsay).	ROUBINE		Électronique.
DEHEUVELS	T	Mathém. propé. (Orsay).	SILBER	T	Chimie P.C.B.
D'ESPAGNAT		Physique théor. (Orsay).	UEBERSFELD	T	Électronique.
			YVON	T	Théories physiques.

Le Secrétaire Général
R. POUILLAIN.

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

BILAN DE MASSE
DES CALOTTES POLAIRES

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 30 Octobre 1963

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

Marc ZAMANSKY

Vu

ET PERMIS D'IMPRIMER :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

Jean ROCHE