Tabl. d. rapport n° 16623

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

LABORATOIRE DE GLACIOLOGIE ET GÉOPHYSIQUE DE L'ENVIRONNEMENT

Associé à l'Université Scientifique Technologique et Médicale de Grenoble

C.N.R.S. BIBLIOTHÈQUE 07. JUIN 1989 ARRIVÉE

88

RAPPORT D'ACTIVITE

Janvier 1986 - Décembre 1988

C.N.R.S.

Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement
Tél. 76.42.58.72 - Télex 98 0131 LGGE
B P 96 - 38402 Saint-Martin d'Hères Cedex France

DB120043

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

LABORATOIRE DE GLACIOLOGIE ET GÉOPHYSIQUE DE L'ENVIRONNEMENT

Associé à l'Université Scientifique Technologique et Médicale de Grenoble

R A P P O R T D ' A C T I V I T E

Janvier 1986 - Décembre 1988

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION

CHAPITRE I - ARCHIVES GLACIAIRES DU CLIMAT

I - OBJECTIF GENERAL A MOYEN ET LONG TERME 3

II - RESULTATS MAJEURS OBTENUS DEPUIS DE DERNIER RAPPORT 3

II.1 - LES VARIATIONS RECENTES DU CLIMAT 3

II.2 - LA DERNIERE PERIODE GLACIAIRE 6
- II.2.1 - Comparaison Vostok-Dôme C-Byrd et variations de l'accumulation 6
- II.2.2 - Forage côtier Caroline 8

II.3 - LE DERNIER CYCLE CLIMATIQUE 11
- II.3.1 - Paléotempératures 11
- II.3.2 - Gaz à effet de serre : CO_2, CH_4 et N_2O 14
- II.3.3 - Autres aspects relatifs à l'analyse des gaz 18
- II.3.4 - Aérosols 20

III - COLLABORATIONS ET CONTRATS 24

IV - PUBLICATIONS 26

CHAPITRE II - GLACIOCHIMIE

I - OBJECTIF GENERAL A MOYEN ET LONG TERME 31

II - RESULTATS MAJEURS OBTENUS DEPUIS DE DERNIER RAPPORT 32

II.1 - CYCLES BIOGEOCHIMIQUES 32
- II.1.1 - Cycle du soufre 32
- II.1.2 - Paléovolcanisme 34
- II.1.3 - Cycles des halogènes 36
- II.1.4 - Cycle de l'azote 38
- II.1.5 - Cycle du carbone : acides carboxyliques 39
- II.1.6 - Cycle des métaux lourds 41

II.2 - LA MATIERE EXTRATERRESTRE 45
II.2.1 - L'iridium 45
II.2.1 - Collecte des météorites 46

II.3 - GLACIOCHIMIE ALPINE 46
II.3.1 - Etude des dernières décennies au Mont-Blanc 46
II.3.2 - Evolution du manteau neigeux à moyenne altitude 47
II.3.3 - Bilan régional de l'accident de Tchernobyl 49

II.4 - SEDIMENTS LACUSTRES 49

III - COLLABORATIONS ET CONTRATS 51

IV - LISTE DES PUBLICATIONS 52

CHAPITRE III - RHEOLOGIE ET MODE DE DEFORMATION DES GLACES POLYCRISTALLINES

I - OBJECTIF GENERAL A MOYEN ET LONG TERME 57

II - RESULTATS MAJEURS OBTENUS DEPUIS LE DERNIER RAPPORT 58

II.1 - RHEOLOGIE DES GLACES POLAIRES 58
II.1.1 - Texture des glaces de Vostok 58
II.1.2 - Densification des glaces polaires 60

II.2 - ENDOMMAGEMENT DE LA GLACE EN COMPRESSION 61
II.2.1 - Nucléation et croissance des fissures en compression 61
II.2.2 - Endommagement de la glace au pic de contrainte 61
II.2.3 - Modélisation de la compression uniaxiale jusqu'au pic de contrainte 63
II.2.4 - Vitesse de fluage de la glace endommagée en compression uniaxiale 64

II.3 - COMPORTEMENT DES SOLS AU DEGEL 65

III - COLLABORATIONS ET CONTRATS 66

IV - LISTE DES PUBLICATIONS 67

CHAPITRE IV - GLACES EXTRATERRESTRES

I - OBJECTIF GENERAL A MOYEN ET LONG TERME 69

II - RESULTATS MAJEURS OBTENUS DEPUIS LE DERNIER RAPPORT 69

II.1 - EVOLUTION DE LA MATIERE COMETAIRE 71
II.1.1 - Modélisation de l'évolution thermique et de la différenciation chimique 71

II.1.2 - Acquisition de données physicochimiques pour la modélisation de l'évolution des noyaux cométaires 72

II.2 - SPECTROSCOPIE ET PHYSICOCHIMIE DES GRAINS INTERSTELLAIRES 76
II.2.1 - Evolution de grains CO:H_2O - Mécanisme d'éjection de H_2O 76
II.2.2 - Spectroscopie infrarouge des glaces interstellaires 77
II.2.3 - Synthèse moléculaire par photolyse UV des grains interstellaires 77

III - COLLABORATIONS ET CONTRATS 79

IV - LISTE DES PUBLICATIONS 80

CHAPITRE V - FLUCTUATIONS DES GLACIERS ALPINS

I - OBJECTIF GENERAL A MOYEN ET LONG TERME 85

II - RESULTATS MAJEURS OBTENUS DEPUIS LE DERNIER RAPPORT 91

II.1. - VARIATIONS SPATIOTEMPORELLES DES BILANS DE MASSE 91
II.1.1 - Structure régionale de répartition 91
II.1.2 - Téléconnexion 92
II.1.3 - Application de l'imagerie satellitaire au suivi des fluctuations glaciaires 93

II.2 - RECONSTRUCTION DES BILANS DE MASSE A PARTIR DE DONNEES ANCIENNES 93

II.3. - METHODOLOGIE DE MESURE 95
II.3.1 - Balises profondes type fil d'ariane 95
II.3.2 - Mesures de vitesse sur le lit 95
II.3.3 - Circulation de l'eau à l'intérieur des glaciers 96
II.3.4 - La dynamique glaciaire 96

II.4 - APPLICATIONS PRATIQUES 96

II.5 - LA LOGISTIQUE ALPINE - LES REFUGES 97

III - COLLABORATIONS ET CONTRATS 97

IV - LISTE DES PUBLICATIONS 98

V - AUTRES FORMES DE PARTICIPATION A LA RECHERCHE 101

CHAPITRE VI - MODELISATION NUMERIQUE DES ECOULEMENTS DE GLACE

I - OBJECTIF GENERAL A MOYEN ET LONG TERME 103

II - RESULTATS MAJEURS OBTENUS DEPUIS LE DERNIER RAPPORT 103

II.1 - MODELISATION DES CALOTTES POLAIRES 103
II.1.1 - Objectif 103
II.1.2 - Paramétrisation des conditions aux limites dépendantes du temps pour la modélisation du champ de températures dans les calottes polaires 104
II.1.3 - Interprétation du profil de température mesuré à Vostok 105
II.1.4 - Modèle de comportement pour la couche basale 106
II.1.5 - Outil de calcul 107

II.2 - MODELISATION ET GEODYNAMIQUE DES ZONES DE SUBDUCTION 107
II.2.1 - Zone de subduction Tonga-Kervadec-Ikurangi 108
II.2.2 - Zone de subduction Okinawa 109

II.3 - REACTION D'UNE CALOTTE A UNE MODIFICATION CLIMATIQUE 109

III - COLLABORATIONS ET CONTRATS 110

IV - LISTE DES PUBLICATIONS 111

CHAPITRE VII - TELEDETECTION

I - OBJECTIF GENERAL A MOYEN ET LONG TERME 113

II - RESULTATS MAJEURS OBTENUS DEPUIS LE DERNIER RAPPORT 114

II.1 - GLACE DE MER 114
II.1.1 - Algorithmes de traitement des données radar 114
II.1.2 - Arctemiz 115

II.2 - ANTARCTIQUE 115
II.2.1 - Accumulation de neige 116
II.2.2 - Températures de surface 117
II.2.3 - Cartographie en Terre Adélie 117

III - COLLABORATIONS ET CONTRATS 118

IV - LISTE DES PUBLICATIONS 118

CHAPITRE VIII - TECHNOLOGIE

I - BUREAU D'ETUDES ET ATELIER 121
II - LABORATOIRE D'ELECTRONIQUE 123
III - NOUVEAUX LABORATOIRES REFRIGERES 125
IV - MACHINE D'ESSAI 126
V - INFORMATIQUE 128

++++
++

INTRODUCTION

Les activités du Laboratoire ont comme point commun la glace naturelle avec une ouverture toujours plus large vers les questions d'Environnement (climat, chimie atmosphérique notamment). Il est certain que les menaces que fait peser l'activité humaine sur les équilibres naturels de la planète et sur le fonctionnement des cycles biochimiques ont créé tout récemment une conjoncture favorable pour les recherches que nous développons depuis quelque vingt ans, cela en liaison avec le rôle que jouent les régions polaires pour le climat du globe et avec l'intérêt des multiples informations atmosphériques archivées dans les calottes polaires.

L'accès direct aux carottes et le regroupement sous un même toit de chercheurs de différentes disciplines (Physique, Chimie, Mécanique...) et de techniciens permet à notre Laboratoire d'aborder les problèmes sous des angles variés. La modélisation des calottes et de l'atmosphère globale, ainsi que depuis peu la télédétection, complètent notre panoplie. Par ailleurs l'originalité et l'intérêt de nos recherches ont été une excellente carte de visite pour nous insérer toujours plus avant dans les grands programmes internationaux.

Avec l'analyse et l'interprétation de la carotte de Vostok, le Laboratoire a réussi une première : celle de reconstituer en détail les variations des paramètres climatiques majeurs sur l'intégralité d'une période glaciaire et du précédent interglaciaire. Pour prévoir l'évolution future du système Terre, il faut en connaître la variabilité naturelle dans le Passé. On peut estimer que Vostok a fourni dans ce domaine un ensemble de données d'exceptionnel intérêt pour les spécialistes des modèles atmosphériques globaux. Le journal "Nature" a d'ailleurs employé le terme de "corne d'abondance" pour qualifier la carotte de Vostok.

Dans le domaine de la glaciologie alpine, nos travaux visent à modéliser l'évolution récente des glaciers en réponse aux fluctuations climatiques des derniers siècles.

En chimie atmosphérique, nos recherches permettent de suivre le fonctionnement et l'évolution du maillon atmosphérique des grands cycles biogéochimiques (C, S, N) ; les carottages glaciologiques représentent d'ailleurs une méthode de choix pour en retracer les tendances récentes, fortement marquées par l'impact des activités humaines. Nous avons donc fait porter nos efforts non seulement sur le passé lointain mais aussi sur les dernières décennies.

Les glaciers et les calottes polaires réagissent au climat en suivant des lois de comportement mécanique qu'il convient de maîtriser parfaitement avant d'entreprendre les travaux de modélisation. C'est pourquoi le Laboratoire possède une équipe s'intéressant aux propriétés physiques du matériau glace. Une importante application de ces recherches a été trouvée dans le domaine des interactions glace-structure dans le cadre de l'exploitation des ressources naturelles en régions polaires.

La présence dans l'espace de corps extraterrestres, composés essentiellement de glace, comme les comètes, justifie le développement au sein du Laboratoire d'une équipe spécialisée dans l'étude de ce type de glace.

On notera donc que les activités du Laboratoire embrassent un très vaste domaine tant au plan géographique (Alpes, régions polaires, espace) que scientifique (climatologie, physico-chimie, chimie atmosphérique, physique des matériaux, mécanique notamment). Avec les différentes modélisations développées, notre Laboratoire est bien armé pour valoriser les résultats expérimentaux obtenus.

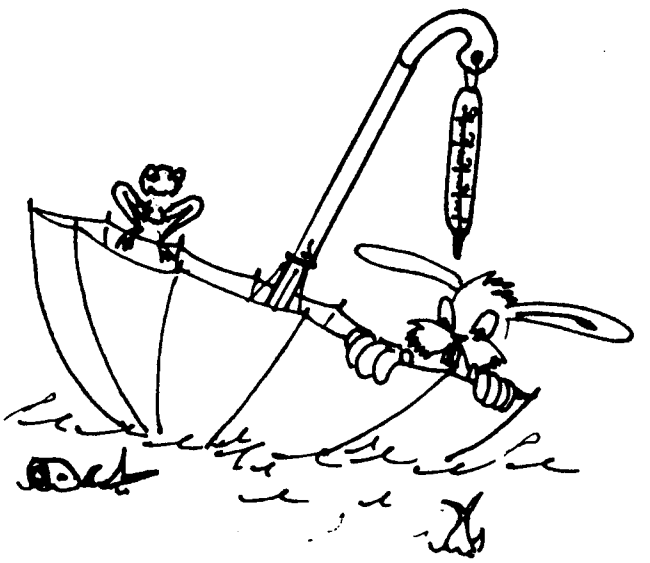
La présentation qui va suivre des activités du Laboratoire correspond au panorama général qui vient d'en être donné avec un regroupement en 7 thèmes scientifiques distincts auxquels s'ajoute un chapitre relatif à la technologie :

- Archives glaciaires du climat,
- Approche glaciochimique des cycles biogéochimiques,
- Rhéologie et mode de déformation des glaces polycristallines,
- Glaces extraterrestres,
- Fluctuations des glaciers alpins,
- Modélisation numérique des écoulements de glace,
- Télédétection,
- Technologie

Compe-tenu de la date très récente (1/01/89) du changement survenu dans la Direction du Laboratoire, on considèrera le présent rapport comme un bilan à mettre à l'actif de la précédente Direction, arrêté au 31 décembre 1988.

++++
++

CHAPITRE I



ARCHIVES GLACIAIRES DU CLIMAT

I - OBJECTIF GENERAL A MOYEN ET LONG TERME

Une caractéristique unique des sédiments glaciaires est d'avoir stocké sur de très longues échelles de temps des informations concernant l'évolution du climat et de l'environnement atmosphérique. Ces informations ont parfois une signification locale mais sont le plus souvent représentatives à l'échelle hémisphérique ou globale.

La reconstruction quantitative de paramètres **climatiques** (températures, précipitations..) en même temps que des facteurs de **forçage** (composition de l'atmosphère gazeuse, teneurs en aéosols,...) a pour objectif d'aider à la **compréhension du système climatique. Les données obtenues permettent de tester les modèles climatiques pour certains états particuliers** et leur interprétation contribue à une meilleure connaissance de la dynamique du climat.

Grâce à une collaboration avec des équipes soviétiques de Leningrad et Moscou, nous disposons d'une série d'échantillons provenant de l'Antarctique et couvrant les 150.000 dernières années Le forage de Vostok permet de décrire l'ensemble d'un cycle caractéristique des variations climatiques au cours du Quaternaire.

L'analyse de ces carottes permet de plus d'étudier les variations d'épaisseur de la glace et donc l'interaction entre climat et calottes polaires.

II - RESULTATS MAJEURS OBTENUS DEPUIS LE DERNIER RAPPORT

II.1 - LES VARIATIONS "RECENTES" DU CLIMAT

(J.R. Petit, J. Jouzel, C. Lorius, F. Pinglot, M. Pourchet, A. Aristarain)

. La teneur isotopique en deutérium (δD) et en oxygène 18 ($\delta^{18}O$) des précipitations en Antarctique est principalement liée à la tempéra-

ture à laquelle elles sont formées. Cette idée, d'abord essentiellement basée sur une relation empirique linéaire obtenue sur un axe Dumont d'Urville - Dôme C, a été confortée par une approche théorique développée par l'équipe de Saclay (Jouzel et Merlivat, 1984) et plus récemment à partir de simulations basées sur l'utilisation de modèles de circulation générale de l'atmosphère (Thèse S. Joussaume, travaux de Jouzel et collaborateurs au GISS).

. La reconnaissance de certains produits spécifiques, émis sporadiquement dans l'atmosphère, permet de dater les couches de neige avec lesquelles ils ont été entraînés. C'est ainsi que depuis plusieurs années nous recherchons dans les carottes les horizons radioactifs provoqués par les essais thermonucléaires atmosphériques. Cette méthode nous fournit pour l'Antarctique deux repères chronologiques principaux : janvier 1955 et janvier 1965. La reconnaissance dans la neige de produits volcaniques formés au cours d'un épisode éruptif violent daté par ailleurs, fournit des repères chronologiques du même type (cf. chapitre II).

C'est sur la combinaison de ces deux approches (qui donnent potentiellement accès aux deux paramètres clés température et accumulation) qu'est basé notre travail sur les variations "récentes" du climat. Ce thème regroupe en fait des études de surface et celles, généralement détaillées, effectuées sur des forages peu profonds ou sur les parties supérieures des forages profonds. Nous avons étendu l'échelle de temps à laquelle nous nous intéressons d'un à quelques siècles et jusqu'au dernier millénaire.

. Grâce à des collaborations soviétiques et australiennes, la couverture géographique des échantillons de surface (représentant de 10 à 20 années d'accumulation) a été étendue à un large secteur de l'Antarctique de l'Est (Dumont d'Urville - Vostok - Mirny). Des échantillons ont été obtenus au Law Dome et le long des axes Mirny - Vostok, Mirny-Dôme C, Casey-Vostok et d'un raid (GM04 - GD15) parallèle à la côte. La distribution de l'excès en deutérium $d = \delta D - 8\ \delta^{18}O$ a pu aussi être documentée de façon détaillée. L'excès en deuterium est un paramètre important car il peut donner accès aux conditions d'humidité et de température dans les régions sources et contient donc des informations supplémentaires par rapport à celle sur la température du site obtenue à partir de δD ou de $\delta^{18}O$ pris séparément.

. Une reconstitution des variations de la température en Péninsule Antarctique sur les 400 dernières années a été proposée à partir du profil de teneur en deutérium le long d'un forage de 150 m au sommet de l'Ile de James Ross (collaboration avec A. Aristarain de l'Institut Antarctique Argentin). La datation, déduite d'un modèle glaciologique, a été confirmée par la présence, dans la partie inférieure du forage, d'un repère volcanique. La relation deutérium-température a été calibrée sur la période récente (gradient de 4,4 °/..$/°C$ pour la période 1953-1978) ; la comparaison avec l'enregistrement d'Orcadas montre une bonne corrélation entre anomalies isotopiques et anomalies de températures sur la période 1903-1978. Pour l'ensemble du forage (1617 - 1978) la caractéristique marquante est le refroidissement d'environ 2°C indiqué par l'enregistrement isotopique, entre le milieu du XIXème siècle et le XXème siècle.

Cette caractéristique est à l'opposé de la tendance au réchauffement bien documentée en particulier pour l'Hémisphère Nord. L'enregistrement de James Ross, qu'il serait indispensable de confirmer sur d'autres forages de la Péninsule antarctique, n'a donc qu'un caractère régional, ce que nous attribuons au relatif isolement de l'Antarctique par rapport à l'atmosphère globale.

. Une autre étude concerne une série Pôle Sud plus longue (approximativement le dernier millénaire) reportée sur la figure 1.1 (teneur en deutérium en fonction de l'âge). La datation établie sur le dernier siècle à partir des variations isotopiques saisonnières s'appuie ensuite sur une série de repères volcaniques (cf.II chimie). L'interprétation climatique détaillée de ce profil reste à faire ; nous noterons néanmoins :

1) la relative stabilité du climat sur l'ensemble du dernier millénaire,

2) l'absence d'une période froide très marquée à l'époque du petit âge glaciaire dans l'Hémisphère Nord (~ 1400 - 1800 AD). L'existence d'un tel refroidissement, suggéré par les résultats obtenus au Dôme C ne semble pas devoir être confirmée au Pôle Sud.

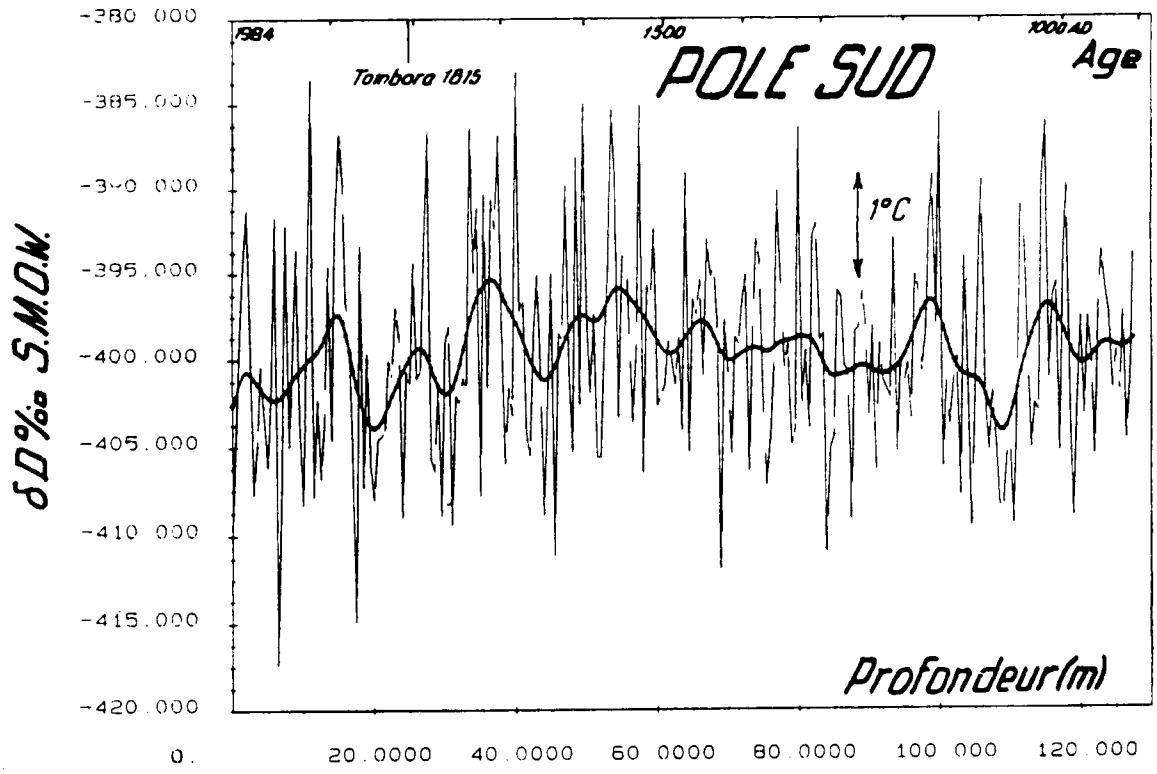


FIGURE 1.1.
TENEUR EN DEUTERIUM AU POLE SUD EN FONCTION DE L'AGE ET DE LA PROFONDEUR (ENSEMBLE DES POINTS ET COURBE LISSEE)
AVEC UNE INDICATION DE L'AMPLITUDE DE TEMPERATURE

. D'un point de vue général, nous avons noté l'absence de corrélation et donc d'une tendance à caractère général entre les différentes séries climatiques "court-terme" pour l'Antarctique (outre James Ross, Pôle Sud et Dôme C, 2 autres séries, au Ross Ice Shelf et à D15 en Terre Adélie, couvrent les 2 derniers siècles). Plusieurs explications peuvent être proposées :

1) Le bruit isotopique (histoire microphysique et dynamique différentes des masses d'air en fonction du site, influence de l'érosion éolienne sur le signal isotopique, variabilité temporelle du rapport précipitations d'été et d'hiver, etc...) reste relativement important par rapport au signal et variable d'un site à l'autre, aux échelles de temps concernées.

2) L'absence de datation précise au Dôme C, à Ross Ice Shelf et à D15 nuit évidemment à la comparaison des différentes séries.

3) L'absence réelle d'une corrélation entre les séries temporelles des températures dans les 5 sites étudiés est tout-à-fait possible dans la mesure où ceux-ci sont répartis sur un continent de 14 millions de km^2.

Nous n'avons pas acquis suffisamment de données pour pouvoir trancher entre ces différentes hypothèses. La comparaison de séries voisines, l'extension de la couverture géographique seront nécessaires pour préciser quels sont les facteurs qui contribuent à la variabilité isotopique dans le cadre de ces études court-terme.

II.2 - LA DERNIERE PERIODE GLACIAIRE

Nous sous sommes intéressés de façon spécifique à cette période à travers deux approches :

1) une comparaison des trois forages profonds de l'Antarctique (Vostok, Dôme C et Byrd), qui nous conduit à aborder l'aspect variations de l'accumulation.

2) l'obtention de glace du dernier glaciaire en région côtière (forage Caroline près de Dumont d'Urville qui couvre probablement les 80000 dernières années).

II.2.1 - Comparaison Vostok-Dôme C-Byrd et variations de l'accumulation

(J. Jouzel, J.P. Benoist, C. Lorius, J.R. Petit, et collaboration G. Raisbeck, F. Yiou, Orsay)

La découverte de pics ^{10}Be à la fois à Vostok et au Dôme C (collaboration Laboratoire René Bernas) offre la possibilité tout à fait nouvelle d'une corrélation stratigraphique entre les deux forages du Plateau Antarctique.

Le profil beaucoup plus détaillé que celui décrit précédemment confirme la similitude avec le profil isotopique (Figure 1.2 à comparer sur l'ensemble du cycle climatique au profil isotopique de la figure 1.6).

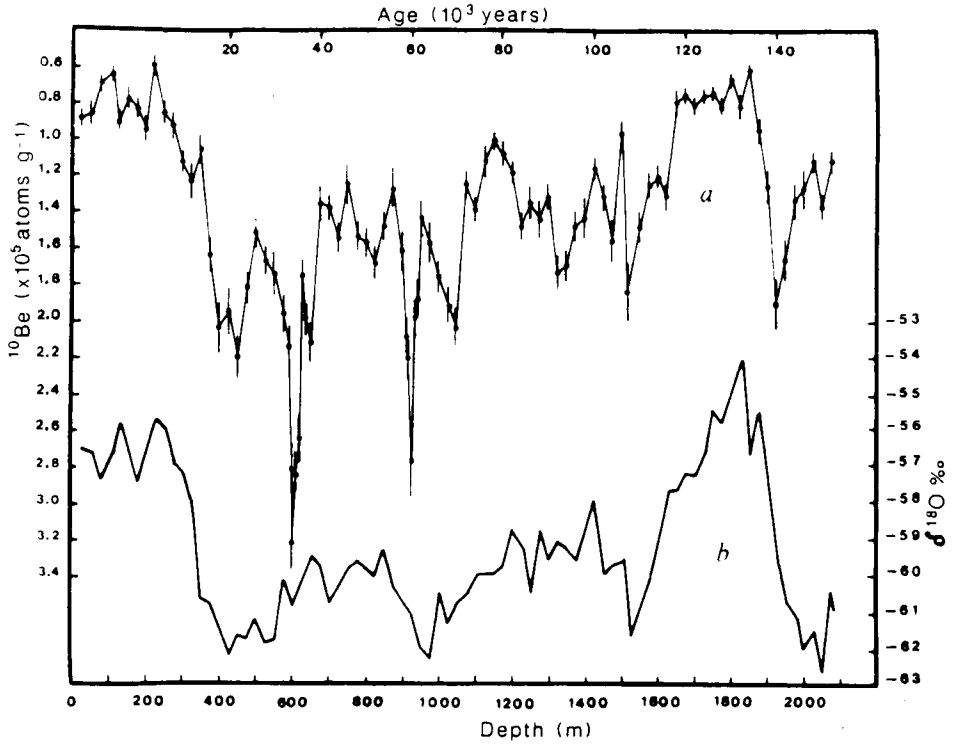


FIGURE 1.2
CAROTTE DE VOSTOK
CONCENTRATION EN ^{10}Be (ECHELLE INVERSEE POUR FACILITER LA COMPARAISON AVEC LE PROFIL ISOTOPIQUE) EN FONCTION DE LA PROFONDEUR (Raisbeck et al., 1987).

Ceci conforte l'interprétation selon laquelle les principales caractéristiques du profil des concentrations sont liées au taux d'accumulation de la neige qui conduit à une plus ou moins grande dilution des retombées de ce radioisotope cosmogénique. La relation avec le profil isotopique (lié aux températures) est due au fait que l'accumulation varie elle aussi avec la température : il tombait environ 2 fois moins de neige au cours du Dernier Maximum Glaciaire que maintenant, pour une température moyenne d'environ 10°C plus froide.

L'enregistrement isotopique et celui du ^{10}Be donnent l'un et l'autre accès à une estimation des variations d'accumulation. La figure 1.3 (relative à Vostok pour l'ensemble du cycle climatique) témoigne du bon accord entre ces deux estimations indépendantes et justifie de la prise en compte de cette variation d'accumulation pour la datation des forages.

On observe par ailleurs des maxima anormaux de concentration marqués vers 600 (35 000 ans BP) et 925 m (60 000 ans BP). Il semble probable que ces "pics", d'une durée de 1000 à 2000 ans, soient dus à un plus fort taux de production dans l'atmosphère. Dans ce cas on devrait les retrouver dans d'autres séries sédimentaires. Un résultat important a été obtenu : le pic situé vers 35 000 ans a été retrouvé dans la carotte du Dôme C. Cette approche stratigraphique est un des éléments qui a permis de modifier la datation du Dôme C (1-4). Elle a pleinement confirmé ce que des travaux antérieurs (Raisbeck et al. Duval et

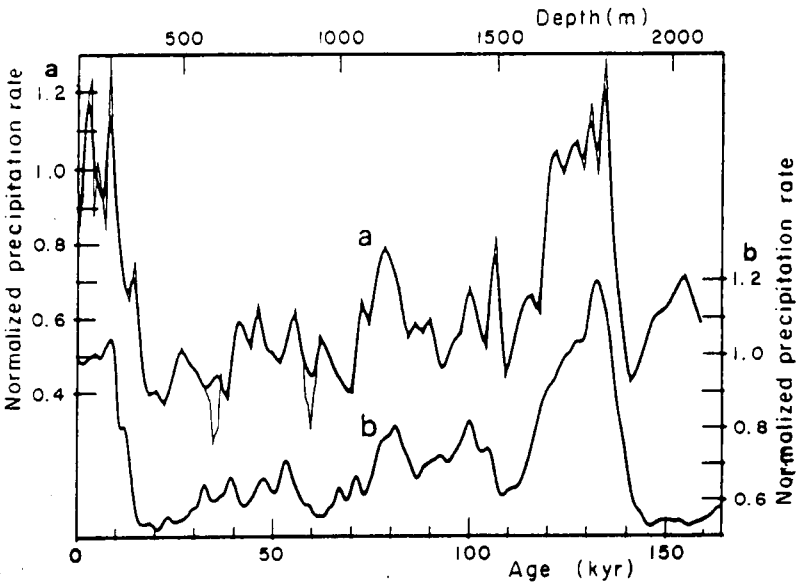


FIGURE 1.3
TAUX DE PRECIPITATION (NORMALISE PAR RAPPORT A LA VALEUR DE L'HOLOCENE) ESTIME :
a) A PARTIR DE L'ENREGISTREMENT ^{10}Be
b) A PARTIR DU PROFIL DE TEMPERATURE DEDUIT DE L'ANALYSE DE LA TENEUR EN DEUTERIUM
(Lorius et al., 1989 - Jouzel et al., 1989)

al. ; thèse de J.P. Benoist) avaient suggéré, à savoir que la datation établie en 1979 qui plaçait le fond du forage Dôme C à 32 000 ans était notoirement trop "jeune". En fait, la simple application au Dôme C de la méthode de datation suivie à Vostok place ce niveau à environ 40 000 ans. Les pics ^{10}Be (600 m à Vostok et 820 m au Dôme C) deviennent alors pratiquement synchrones. Cet accord des chronologies illustré sur la figure 1.2 met par ailleurs en évidence la remarquable similarité entre les courbes de température déduites indépendamment des deux forages. Il confirme la validité de la transformation teneur en deutérium - température et démontre la large représentativité géographique des courbes de température ainsi reconstituées. Nous avons proposé d'étendre cette comparaison au forage de Byrd (Antarctique de l'Ouest) en s'appuyant cette fois sur le parallélisme des séquences isotopiques. Cette approche stratigraphique nous a conduits à proposer une redatation du forage de Byrd pour sa partie glaciaire (figure 1.4)

II.2.2 - Forage côtier Caroline

(J.R. Petit, , J.M. Barnola, P. Duval, J. Jouzel, C. Lorius, Yao Tandong)

Certaines régions côtières recèlent en surface et à faible profondeur des glaces anciennes (glaces bleues) provenant des régions plus centrales. Etudier ces glaces anciennes peu profondes est attractif à double titre :

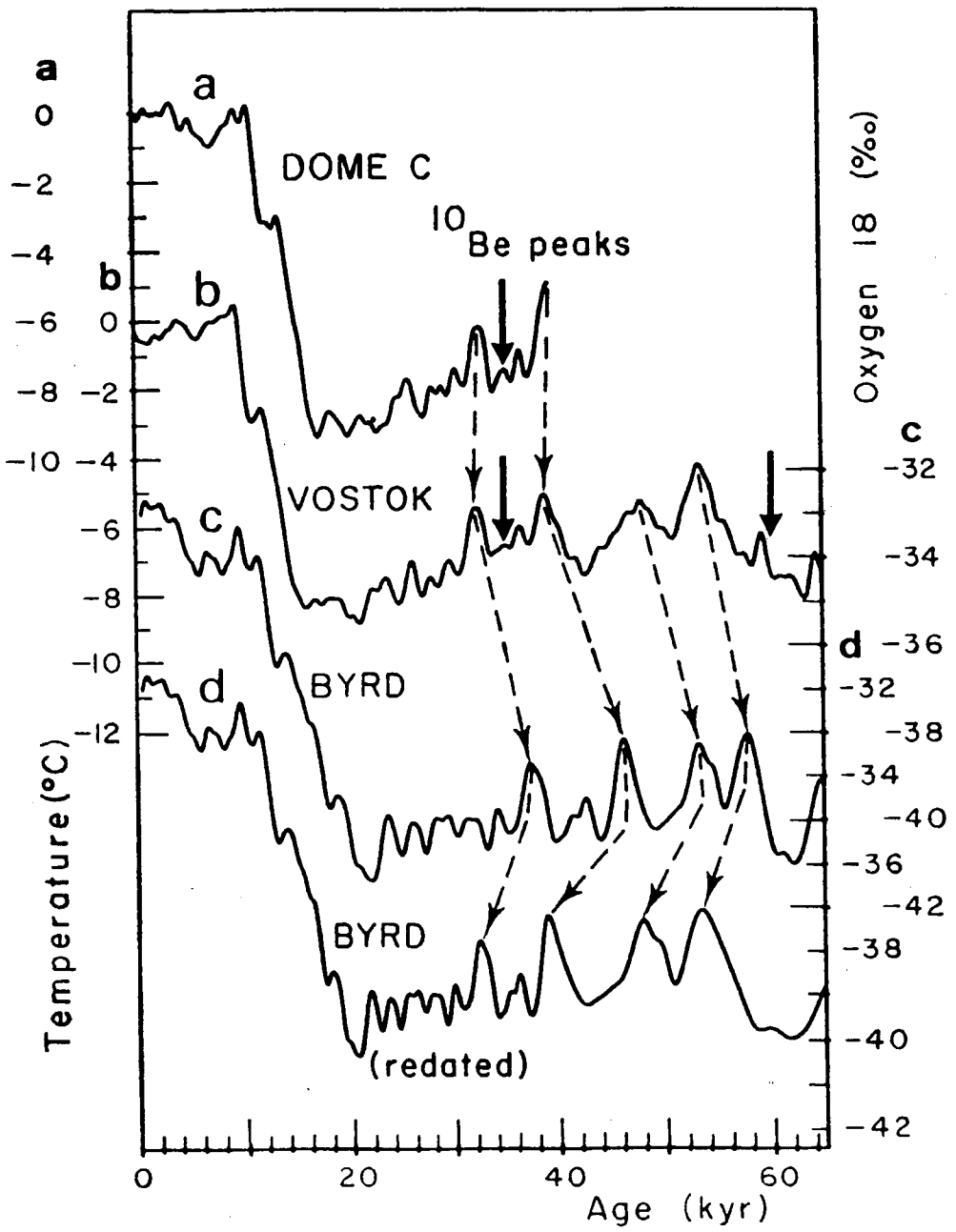


FIGURE 1.4

COMPARAISON DES FORAGES DE BYRD, DOME C ET VOSTOK SUR LEUR PARTIE COMMUNE (65000 ANS POUR BYRD ET VOSTOK, 40000 ANS POUR DOME C) AVEC POUR VOSTOK ET DOME C UNE ECHELLE DE TEMPERATURE (A GAUCHE) ET POUR BYRD UNE ECHELLE $\delta^{18}O$ (A DROITE). LES FLECHES INDIQUENT LES PICS DE ^{10}Be (FLECHES PLEINES) ET LES CORRESPONDANCES POSSIBLES ENTRE LES 3 FORAGES (FLECHES EN POINTILLES). LA COURBE D CORRESPOND AU FORAGE DE BYRD APRES REDATATION BASEE SUR L'UTILISATION DE CES CORRESPONDANCES COMME MARQUEURS STRATIGRAPHIQUES.

(Jouzel et al., 1989).

1) la comparaison d'une série de forages côtiers sur une même ligne d'écoulement est utile à la compréhension de la dynamique de la glace dans les régions côtières,

2) des forages peu profonds, ou même des transects en surface permettent un accès relativement aisé à de la glace du dernier glaciaire.

Ceci nous a incités à compléter les études antérieures de ce type effectuées dans le région côtière de Terre Adélie (G1 et D10) par un nouveau forage de 82 m (socle rocheux) réalisé au cours de l'été austral 1986-87. Nous avons mis en oeuvre sur ce forage CAROLINE un ensemble de méthodes analytiques (teneur en deutérium, contenu en aérosols, taille des cristaux, concentration des bulles (figure 1.5) dont les résultats suggèrent que ce carottage couvre environ les 80000 dernières années et permettent de relier ces différents enregistrements à ceux disponibles sur les forages effectués en amont et sur le Plateau Antarctique.

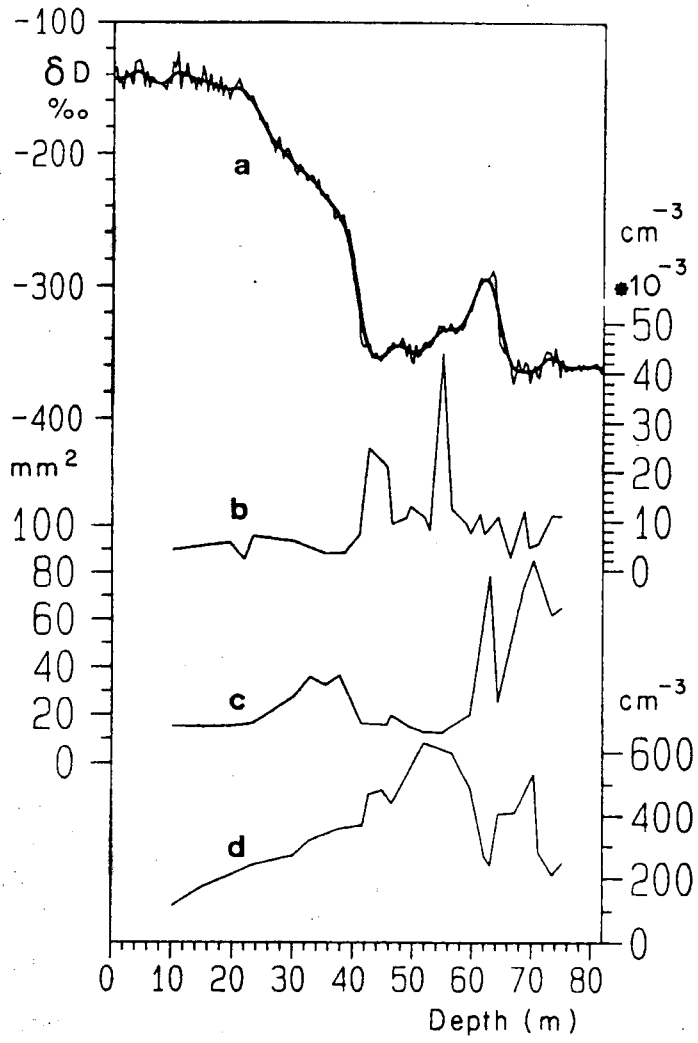


FIGURE 1.5
FORAGE CAROLINE
(TERRE ADELIE)
AVEC, EN FONCTION DE LA PROFONDEUR, (a) LA TENEUR EN DEUTERIUM (ENSEMBLE DES POINTS ET COURBE LISSEE) - (b) TENEUR EN AEROSOLS - (c) TAILLE DES CRISTAUX (d) CONCENTRATION DES BULLES D'AIR
LE FORAGE CAROLINE COUVRE PROBABLEMENT LES 80000 DERNIERES ANNEES
(d'après Yao et al., soumis)

II.3 - LE DERNIER CYCLE CLIMATIQUE

Ces résultats correspondent à l'étude de la carotte de Vostok qui couvre le dernier cycle climatique (~ 160 000 ans) et qui est réalisée en collaboration avec des scientifiques soviétiques.

II.3.1 - Paleotempératures

(C. Lorius, J.R. Petit, J. Jouzel, C. Genthon)

La teneur en deutérium (δ D) mesurée sur près de 2000 échantillons permet de reconstituer les variations passées de la température. Le rechauffement associé à la dernière déglaciation est d'environ 9°C, en bon accord avec l'estimation indépendante déduite de la croissance des cristaux de glace (Méthode développée au LGGE par J.R. Petit et collaborateurs).

Les principales caractéristiques du profil de paléotempératures ainsi obtenu montrent en particulier (Figure 1.6)

- l'existence d'un palier lors de la dernière déglaciation,
- le dernier complexe glaciaire caractérisé par 3 minima de température, celui situé vers 110 000 ans BP étant d'environ 2°C plus chaud que les conditions glaciaires les plus froides que l'on trouve vers 20 000 BP. Ces stades froids sont séparés par deux interstades qui sont respectivement de 4 et 6°C plus chauds que le dernier maximum glaciaire. On ne retrouve des conditions climatiques semblables à celles de l'actuel que lors du précédent interglaciaire, il y a 125 000 ans. Le pic de cet interglaciaire semble plus chaud (environ 2°C) que l'Holocène actuel.

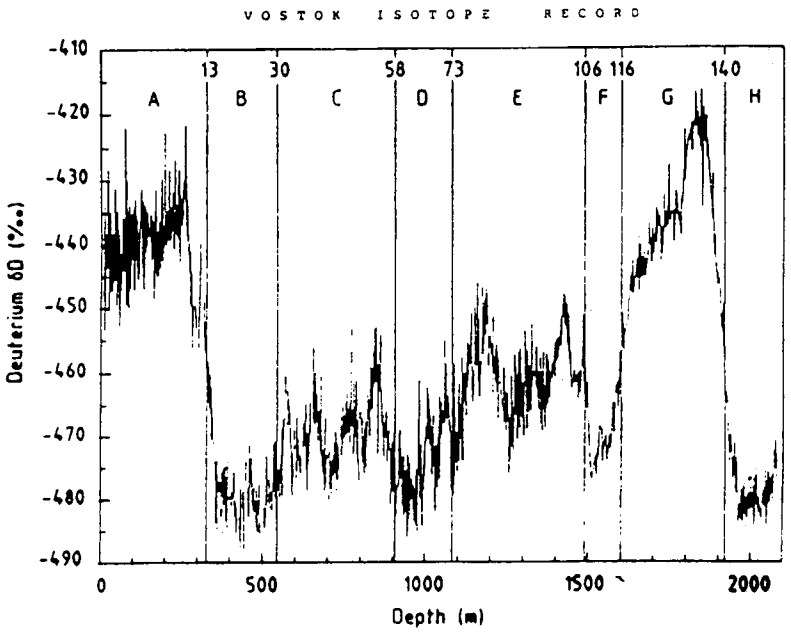


FIGURE 1.6
STATION VOSTOK : TENEUR EN DEUTERIUM EN FONCTION DE LA PROFONDEUR. LES AGES DES DIFFERENTS STADES CLIMATIQUES SONT INDIQUES.

Cette carotte permet enfin d'examiner pour la première fois à partir de paléotempératures atmosphériques en milieu continental, le lien entre climat et forçage astronomique. L'analyse spectrale (Figure 1.7) montre en fait en plus du signal 100 Ka très marqué, des périodes de 20 et 40 ka qui sont caractéristiques des mouvements de la Terre autour du Soleil.

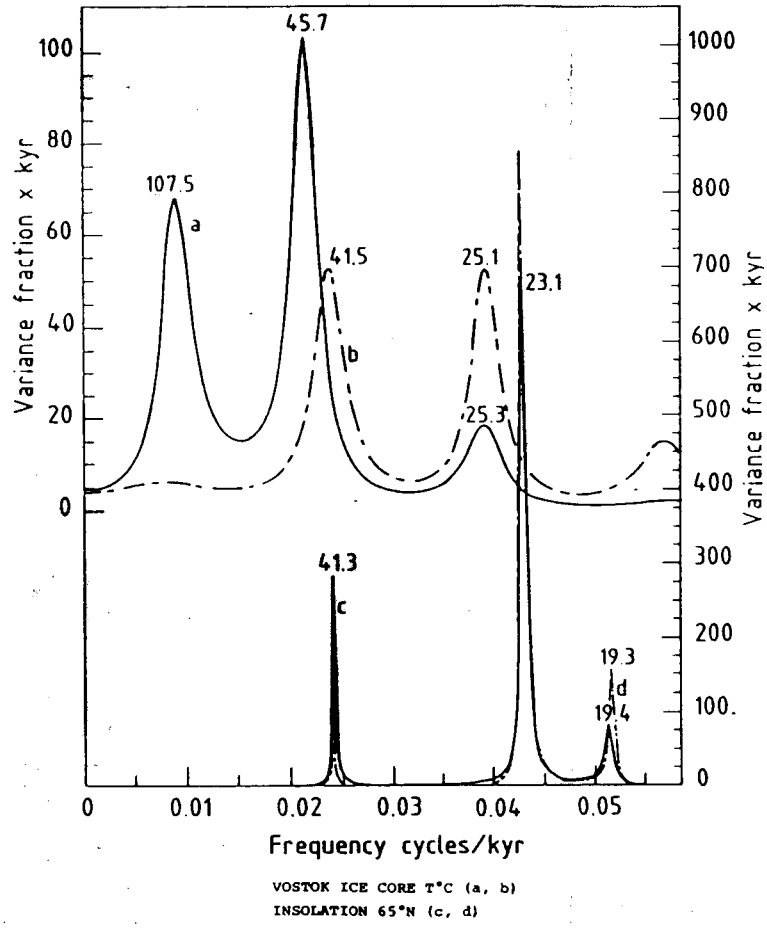


FIGURE 1.7
ANALYSE SPECTRALE DES PALEOTEMPERATURES (CAROTTE DE VOSTOK, A ET B). LA COURBE B (POINTILLES) EST OBTENUE APRES FILTRAGE. LES COURBES C ET D REPRESENTENT L'INSOLATION (MI-JUILLET) à 65°N.

Cette série climatique est en bon accord avec les variations du volume global de glace et de la température de surface dans l'Océan Indien Sud déduites par ailleurs de l'étude des sédiments marins (Figure 1.8) ce qui permet de penser que nos résultats ont une signification géographique étendue. On doit cependant signaler le problème posé par la différence de durée du précédent Interglaciaire, si l'on se refère aux échelles de temps indépendantes proposées.

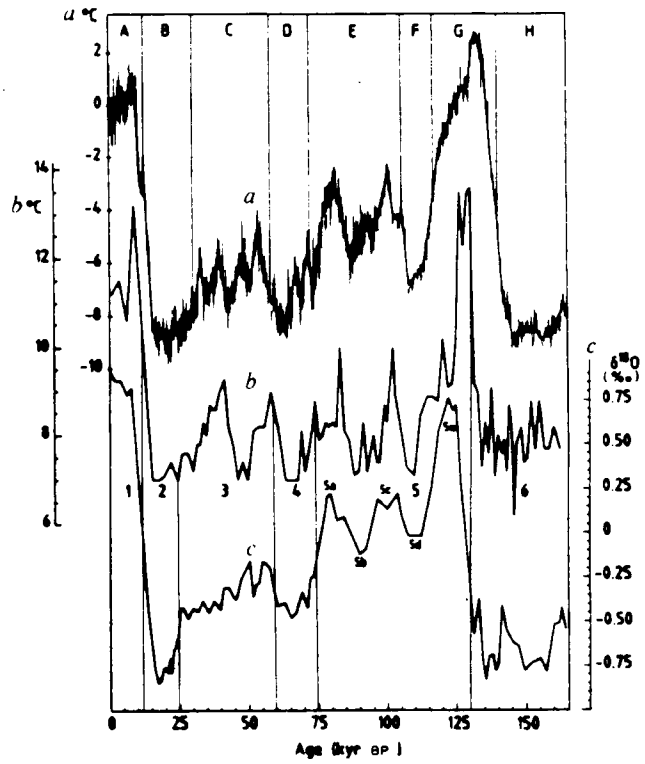


FIGURE 1.8
a) PALEOTEMPERATURES EN FONCTION DE L'AGE (10^3 ANS). CAROTTE DE VOSTOK - b) TEMPERATURES DE SURFACE DE L'OCEAN INDIEN SUBPOLAIRE (Martinsen et al.) - c) PROFILS NORMALISES DES TENEURS EN ^{18}O (Martinsen et al.) REPRESENTANT PRINCIPALEMENT LES VARIAITONS DU VOLUME GLOBAL DES GLACES.

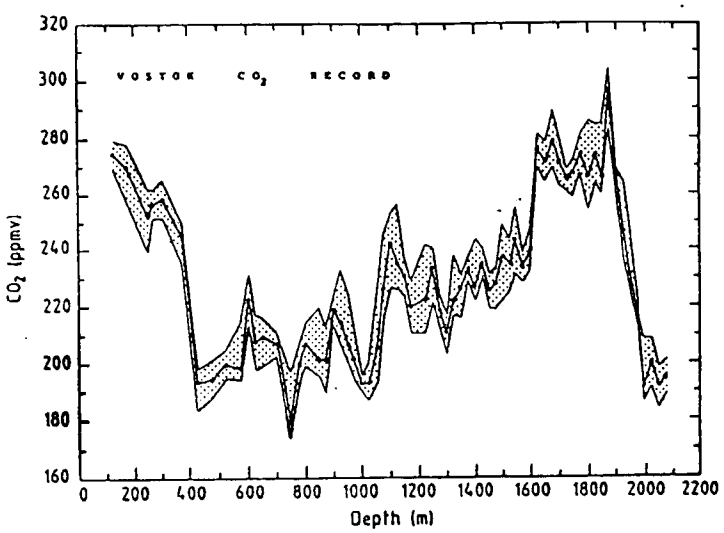


FIGURE 1.9
CAROTTE DE VOSTOK : TENEURS EN CO_2 DE L'AIR CONTENU DANS LES BULLES EN FONCTION DE LA PROFONDEUR. L'ENVELOPPE TRACEE TIENT COMPTE DES DIFFERENTES INCERTITUDES PORTANT SUR L'EVALUATION DES VARIATIONS RELATIVES
(d'après Barnola et al., 1987).

II.3.2 - Gaz à effet de serre : CO_2, CH_4 et N_2O

Cette recherche vise directement :

- à décrire, à partir de l'analyse des bulles d'air emprisonnées dans la glace, l'évolution au cours du passé de la composition de gaz atmosphériques radiativement actifs,

- à comparer les variations ainsi mises en évidence de l'atmosphère avec les changements climatiques étant intervenus au cours du passé.

Ces informations apparaissent désormais comme particulièrement privilégiées pour comprendre les interactions entre le climat et la composante atmosphérique de certains cycles biogéochimiques.

II.3.2.1 CO_2

(J.M. Barnola, D. Raynaud)

Cette description est importante car la connaissance des variations passées en CO_2, en relation avec les changements climatiques, devrait permettre, d'une part, d'évaluer dans quelles limites les réservoirs intervenant dans le cycle du carbone ont pu varier et d'autre part d'offrir une approche complémentaire à celle des modèles visant à analyser les effets du CO_2 sur le climat. L'analyse de l'air emprisonné dans la glace est le traceur le plus direct de ces variations en CO_2.

Nous nous sommes concentrés, au cours de ces 3 dernières années, sur la description des grandes tendances du CO_2 au cours du dernier cycle climatique (environ 150 000 ans). Les mesures ont été effectuées à 66 différents niveaux de profondeur le long de la carotte de Vostok (Figure 1.9). La Figure 1.9 montre les variations du CO_2 observées en fonction de l'âge. Ces variations peuvent être directement comparées avec les changements climatiques déduits de la mesure isotopique de la glace (cf. Figure 1.10).

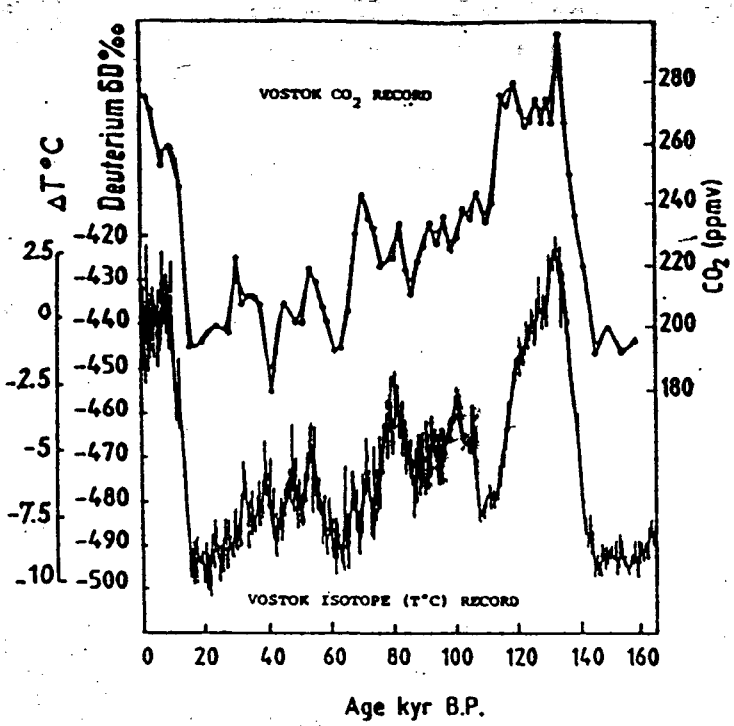


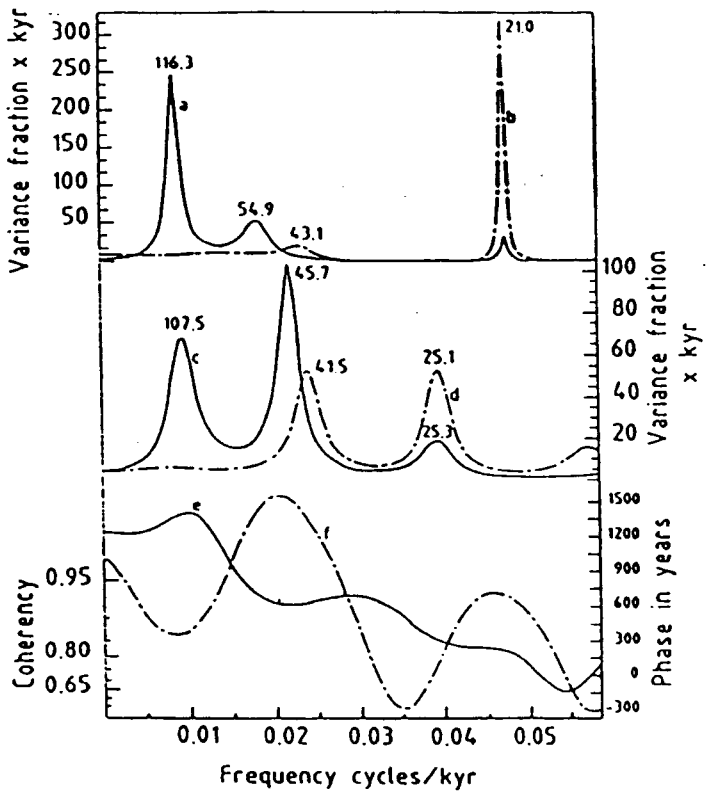
FIGURE 1.10
CAROTTE DE VOSTOK : CO_2 ET TEMPERATURE ISOTOPIQUE EN FONCTION DE L'AGE
(d'après Barnola et al., 1987).

Une des caractéristiques frappantes est l'excellente corrélation (r^2 = 0,79) qui existe entre les enregistrements du CO_2 et du climat. Les périodes chaudes de type "interglaciaire" sont caractérisées par des concentrations élevées en CO_2 (en moyenne 263 ppmv pour l'Holocène et 272 ppmv pour l'interglaciaire précédent) et de faibles teneurs en CO_2 (entre ~ 190 et 240 ppmv) au cours des périodes glaciaires. A l'intérieur même de la dernière glaciation les concentrations en CO_2 sont plus élevées durant la première partie (110000-65000 ans BP) que pendant la seconde (65000-150000 ans BP), cette dernière se trouvant être aussi celle qui présente des conditions climatiques généralement plus froides.

L'analyse spectrale du profil de CO_2 (Figure 1.11) indique des concentrations marquées de variance correspondant à certaines fréquences orbitales. En particulier on observe, à côté de la période 100000 ans, un pic bien défini pour une période d'environ 21000 ans qui peut correspondre aux fréquences liées à la précession. L'analyse spectrale vient donc conforter l'idée que CO_2 et climat ont interagi de façon significative au cours du dernier cycle climatique.

Le profil de CO_2 de Vostok fournit aussi des informations sur l'origine des variations en CO_2. Le fait d'observer une période de 21000 ans pourrait aider à localiser les régions critiques ayant pu engendrer ces variations. D'autre part l'étude comparative des spectres de CO_2 et température à Vostok (cf. Figure 1.11) indique que CO_2 et température varient de façon générale sans déphasages importants. En particulier il semble que ce soit le cas lorsque l'on passe d'un régime glaciaire à un interglaciaire ; ce qui suggère qu'alors l'augmentation en CO_2 correspondante n'ait pu être liée à la variation eustatique. Cependant le changement du niveau marin aurait pu influencer le CO_2 atmosphérique à d'autres périodes et, en particulier, à la fin du dernier interglaciaire alors que le CO_2 se mettait à décroître bien après que le climat de Vostok ait commencé à se refroidir (cf. Figure 1.10).

L'influence relative en tant que forçages climatiques du CO_2, de l'insolation locale (78°S) et de l'insolation (juillet) à 65°N (qui contrôle vraisemblablement les variations de volume des grandes calottes de l'Hémisphère Nord) a été examinée, en collaboration avec C. GENTHON et J. JOUZEL du Laboratoire de Géochimie Isotopique, à partir d'une analyse multivariée (Figure 1.12). Cette analyse suggère que le CO_2 a joué un rôle important dans l'évolution des températures qui s'est produite au cours des derniers 160 000 ans et bien antérieurement au cours des cycles climatiques qui ont pris place au cours du Quaternaire. Cependant nous avons montré plus récemment (voir le paragraphe sur CH_4) que le méthane avait lui aussi varié de façon importante au cours du passage entre un climat glaciaire et une période interglaciaire. En outre les concentrations en aérosols ont pu aussi avoir un impact climatique significatif, comme le suggèrent plusieurs travaux récemment publiés (cf. le paragraphe sur l'aérosol secondaire soufré et Harvey, 1988). Tous ces facteurs pourraient induire des effets de température allant dans le même sens que dans le cas du CO_2 et pourraient donc expliquer une partie de la variance climatique attribuée au seul CO_2 par l'analyse multivariée illustrée dans la figure 1.12.



. VOSTOK CO_2 RECORD (a, b)
. VOSTOK T°C (c, d)
. COHERENCY AND PHASE (e, f)

FIGURE 1.11

CAROTTE DE VOSTOK : ANALYSE SPECTRALE COMPAREE DU CO_2 (A ET B) ET DES PALAEOTEMPERATURES (C ET D). LES COURBES B ET D SONT OBTENUES PAR FILTRAGE. LES COURBES E ET F REPRESENTENT LA COHERENCE ET LA PHASE RESULTANT DE L'ANALYSE SPECTRALE CROISEE DES 2 PARAMETRES. (d'après Barnola et al., 1987).

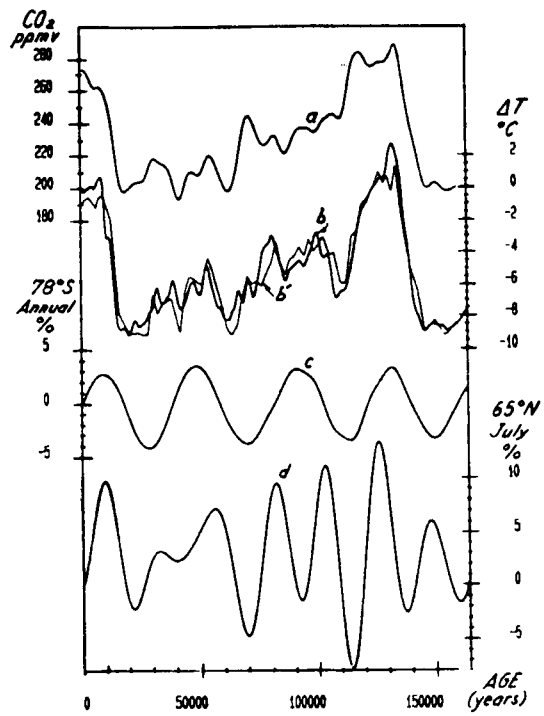


FIGURE 1.12

CAROTTE DE VOSTOK :

(a) TENEUR EN CO_2

(b) VARIATIONS DE TEMPERATURE OBSERVEES (b) ET CALCULEES (b') PAR AJUSTEMENT A PARTIR DES PROFILS A, C ET D

(c) INSOLATION ANNUELLE A 78°S (STATION VOSTOK)

(d) INSOLATION EN JUILLET A 65°N

(Lorius et al., 1988 d'après Genthon et al., 1987).

II.3.2.2 - CH_4

(J. Chappellaz, J.M. Barnola, D. Raynaud)

Dans la panoplie des gaz à effet de serre ayant pu varier au cours du dernier cycle climatique et dont la mesure est possible à partir de l'air extrait de la glace, le CH_4 tient avec le CO_2 une place privilégiée (en raison de ces teneurs et de ce que l'on sait sur son cycle). J. CHAPPELLAZ a donc, au cours de son DEA en 1987, mis au point la méthode analytique nous permettant de commencer l'étude du profil de Vostok. Nos premiers efforts ont porté en priorité sur l'étude de la teneur moyenne en CH_4 entre un maximum glaciaire et une période interglaciaire.

Pour cela nous avons choisi la période centrée il y a environ 140000 ans (avant dernière transition). Les résultats, Figure 1.13, indiquent que la concentration en CH_4 a pratiquement doublé (de 0,34 à 0,62 ppmv) entre les conditions glaciaires et interglaciaires. Nous avons alors tenté d'expliquer le pourquoi d'une telle variation, à partir des connaissances actuelles sur les sources et les puits de CH_4. Pour cela, nous nous sommes posés la question simple de savoir si un réchauffement climatique global de 4 à 5°C (ce qui correspond typiquement à une transition glaciaire-interglaciaire) peut a priori rendre compte de l'augmentation observée. A partir d 'hypothèses simplificatrices, nous avons estimé que le réchauffement pouvait, par sa réaction avec les radicaux OH dans l'atmosphère, conduire à une destruction du CH_4 troposphérique équivalant à une baisse de l'ordre de 20 % de la concentration en méthane. Pour contrebalancer cette efficacité accrue du puits et rendre compte de l'augmentation observée il faut donc envisager une production de CH_4 accrue d'un facteur 2,3.

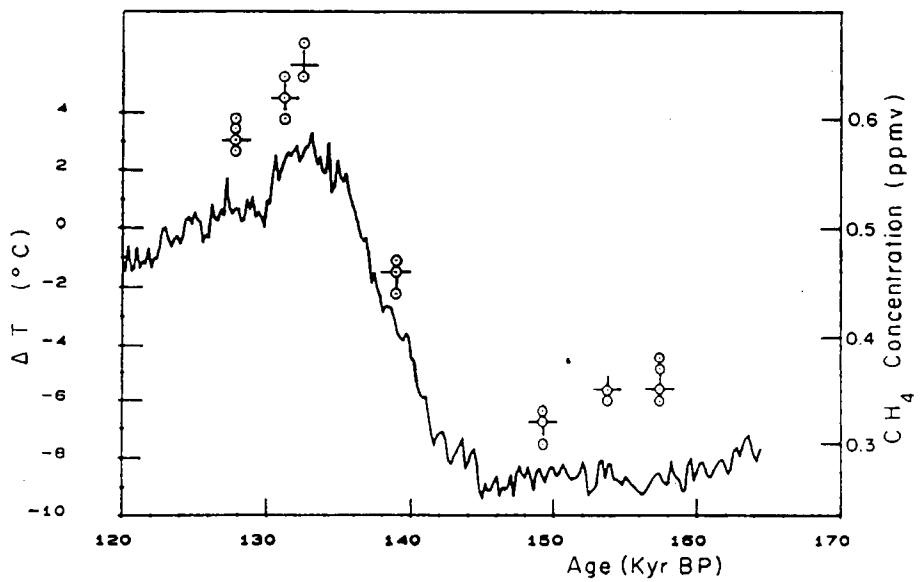


FIGURE 1.13
CAROTTE DE VOSTOK : TENEUR EN CH_4 ET VARIATION DE LA TEMPERATURE DEDUITE DU PROFIL ISOTOPIQUE AU COURS DE LA TRANSITION ENTRE LES PRECEDENTS AGES GLACIAIRE ET INTERGLACIAIRE
(Raynaud et al., 1988).

En faisant l'hypothèse que les sources de méthane avant la perturbation anthropique étaient essentiellement le fait des processus bactériologiques en milieu marécageux, nous avons estimé que l'accroissement de l'activité bactériologique dû au réchauffement, ajouté à une augmentation d'environ 35 % de la surface des marécages au cours de la transition glaciaire-interglaciaire, suffit pour expliquer ce facteur 2,3. Nous concluons donc que la variation en CH_4 observée peut s'expliquer en considérant l'effet du réchauffement climatique sur le cycle de CH_4.

Par contre le CH_4, en raison de l'effet de serre, peut avoir lui-même contribué au réchauffement. En comparant l'effet purement radiatif du CH_4 à celui du CO_2, nous concluons que la contribution CH_4 au réchauffement glaciaire-interglaciaire est d'environ 25 % de celle du CO_2.

Simultanément à la publication de ces résultats dans la revue Nature, nos collègues de Berne montraient qu'une augmentation semblable de CH_4 avait eu lieu au cours de la dernière transition il y a environ 18000 ans. Ceci suggère fortement le caractère global d'une relation CH_4-climat.

II.3.2.3 - N_2O

(D. Raynaud, D. Zardini)

En ce qui concerne le N_2O, autre gaz à effet de serre, qui augmente actuellement pour raisons anthropiques, nous avons initié depuis quelques années une collaboration avec l'équipe de W. SEILER en Allemagne. Les premiers résultats obtenus ont fait l'objet de la thèse de D. ZARDINI et d'une publication au Journal of Atmospheric Chemistry. Ils confirment les données obtenues par 2 autres laboratoires concernant l'augmentation d'origine anthropique, en montrant en particulier une augmentation d'une vingtaine de ppbv entre le 17e siècle et le début du 20e siècle. Ces résultats suggèrent en outre, pour la première fois, qu'au cours de la dernière transition glaciaire-interglaciaire, les concentrations en N_2O atmosphérique aient pu être en augmentation. Ainsi N_2O apparait comme ayant pu aussi contribuer à la variabilité climatique observée entre une période glaciaire et un interglaciaire. Cette contribution reste à être confirmée et quantifiée.

II.3.3 - Autres aspects relatifs à l'analyse des gaz

II.3.3.1 - EVOLUTION DU CYCLE DE L'OXYGENE

(D. Raynaud)

Le cycle de l'oxygène est abordé à partir de l'étude des variations en $\delta^{18}O$ de l'oxygène atmosphérique. L'idée de base est de Mike BENDER, de l'Université de Rhode Island, grâce à qui cette étude a été initiée aussi en collaboration avec L. LABEYRIE du CFR. La collaboration avec l'Université de Rhode Island (USA) qui se poursuit actuellement permet de faire oeuvrer ensemble des compétences complémentaires indispensables sur le plan théorique (glaciologie et océanographie) et technique (carottes de glace, techniques d'extraction des gaz et spectrométrie de masse).

L'oxygène de l'air, produit par photosynthèse, provient de l'oxygène de l'eau. On doit donc s'attendre à ce que toute modification liée aux molécules d'oxygène de l'eau de mer soit reflétée à plus ou moins long terme au niveau des molécules non combinées de l'oxygène atmosphérique. Nous avons donc, il y a quelques années (publication en 1985) mesuré la composition isotopique ($\delta^{18}O$) de l'oxygène atmosphérique piégé dans les bulles d'air de la glace de Dôme C au cours des 22000 dernières années et mis en évidence que la composition isotopique de l'oxygène de l'air était plus élevée au cours de l'âge glaciaire d'environ 1,3 ‰ par rapport à la composition actuelle. Ceci correspond très exactement à la variation isotopique de l'eau de mer, liée à la fusion de la glace continentale à la fin de l'âge glaciaire.

Cette observation suggère donc une grande stabilité des processus de fractionnement isotopique lors du recyclage de l'oxygène de l'air par la photosynthèse et l'oxydation de matières organiques. Elle doit permettre, d'autre part, d'estimer la productivité primaire globale au moment de la déglaciation et aussi le temps de renouvellement de l'oxygène atmosphérique correspondant. L'idée directrice est désormais d'étudier dans le détail l'ensemble du cycle climatique à partir de l'analyse de la carotte de Vostok afin de documenter la palaéoproductivité primaire et les déphasages entre signal atmosphérique et signal océanique. Les mesures viennent de débuter et nous espérons avoir en 1989 une bonne idée de l'ensemble du profil.

Nous avons au préalable, affiné la méthode (au niveau expérimental et dans la compréhension des corrections à introduire pour tenir compte du fractionnement prenant place au moment du piégeage du gaz par la glace). Ce travail fondamental au niveau de la méthode est actuellement sous presse au JGR.

II.3.3.2 - PALAEO-ALTITUDES ET PALEO-PRESSIONS
(P. Martinerie, D. Raynaud)

La motivation au départ de cette recherche est l'étude des interactions calotte-climat et plus précisément celle des corrélations entre les variations d'épaisseurs de la calotte et les changements climatiques. d'autre part, les variations climatiques correspondant au dernier cycle climatique et déduites des mesures isotopiques effectuées sur les carottes de glace peuvent dépendre partiellement de changements dans l'altitude à laquelle la glace s'est formée. Il est donc important de posséder un indicateur qui permettra de "nettoyer" le profil isotopique de sa composante altitude.

Nous détenons pour aborder ce thème un outil particulièrement original dont nous avons la maîtrise au niveau international : **la mesure de la teneur en gaz de la glace** qui reflète la pression atmosphérique et donc l'altitude à laquelle la glace s'est formée. Evaluant ainsi l'altitude de formation et en modélisant l'écoulement, on peut reconstituer le profil en surface de la calotte et donc les épaisseurs de glace au cours du passé.

Nous avions dans le passé interprété l'ensemble de nos résultats (Nord-Ouest du Groenland, Antarctique de l'Ouest, régions côtières de

l'Antarctique de l'Est) en faisant l'hypothèse que les champs moyens de pression atmosphérique au niveau du sol étaient restés constants au cours du temps. Les résultats obtenus sur la carotte de Vostok au cours des 3 dernières années (travail en cours) ne peuvent être uniquement expliqués par des effets d'altitude en surface et impliquent des pressions atmosphériques en surface au-dessus de l'Antarctique plus élevées au cours des périodes glaciaires. Si cela est confirmé ce serait, à notre connaissance, la première "évidence empirique" de variations significatives des champs de pression à cette échelle de temps. La confrontation avec les GCM devient alors intéressante.

II.3.4 - Aérosols

La motivation à la base de cette investigation des aérosols en fonction du climat est double :

. déterminer la réponse de l'atmosphère à une variation climatique,
. à l'inverse, appréhender le rôle possible des impuretés atmosphériques comme facteur de forçage du climat.

Dans le premier cas, les changements climatiques ont un impact sur la composition chimique de l'aérosol par modification soit des émissions d'impuretés (importance des flux d'émissions ou surface des zones sources), soit de la circulation atmosphérique.

II.3.4.1 - AEROSOL SECONDAIRE SOUFRE
(M. Legrand, R. Delmas, C. Lorius)

L'hypothèse récemment avancée que le nombre de noyaux de condensation des nuages (CCN) influence le climat par modification de l'albedo de la couverture nuageuse en zones marines a pu être examinée à partir de la carotte de Vostok. Les CCN sont essentiellement représentés par les très fines particules de sulfate (sulfate en excès) issus de l'oxydation atmosphérique de composés soufrés gazeux. Le profil de la teneur en sulfate en excès le long de la carotte de Vostok montre des augmentations significatives (voir figure 1.14) durant les stades climatiques très froids (B, D et H) en relation avec des émissions plus intenses vers l'atmosphère marine de composés gazeux soufrés (voir chapitre "Glaciochimie", § 2.1).

Moyennant certaines hypothèses (Legrand et al., 1988a) un refroidissement purement radiatif pouvant aller jusqu'à 1°C (à comparer avec 0,6°C induit par la variation du gaz carbonique) pourrait être attribué au rôle de cet aérosol soufré entre la période climatique actuelle (stade A) et le dernier maximum glaciaire (stade B).

II.3.4.2 - AEROSOL MARIN
(M. Legrand, J.R. Petit, M. de Angelis)

La teneur en sodium marin et en ^{18}O varient en sens inverse au cours des derniers 160 000 ans couverts par la carotte de Vostok ($r = -0,9$, Legrand et al., 1988b). De telles variations de la concentration en

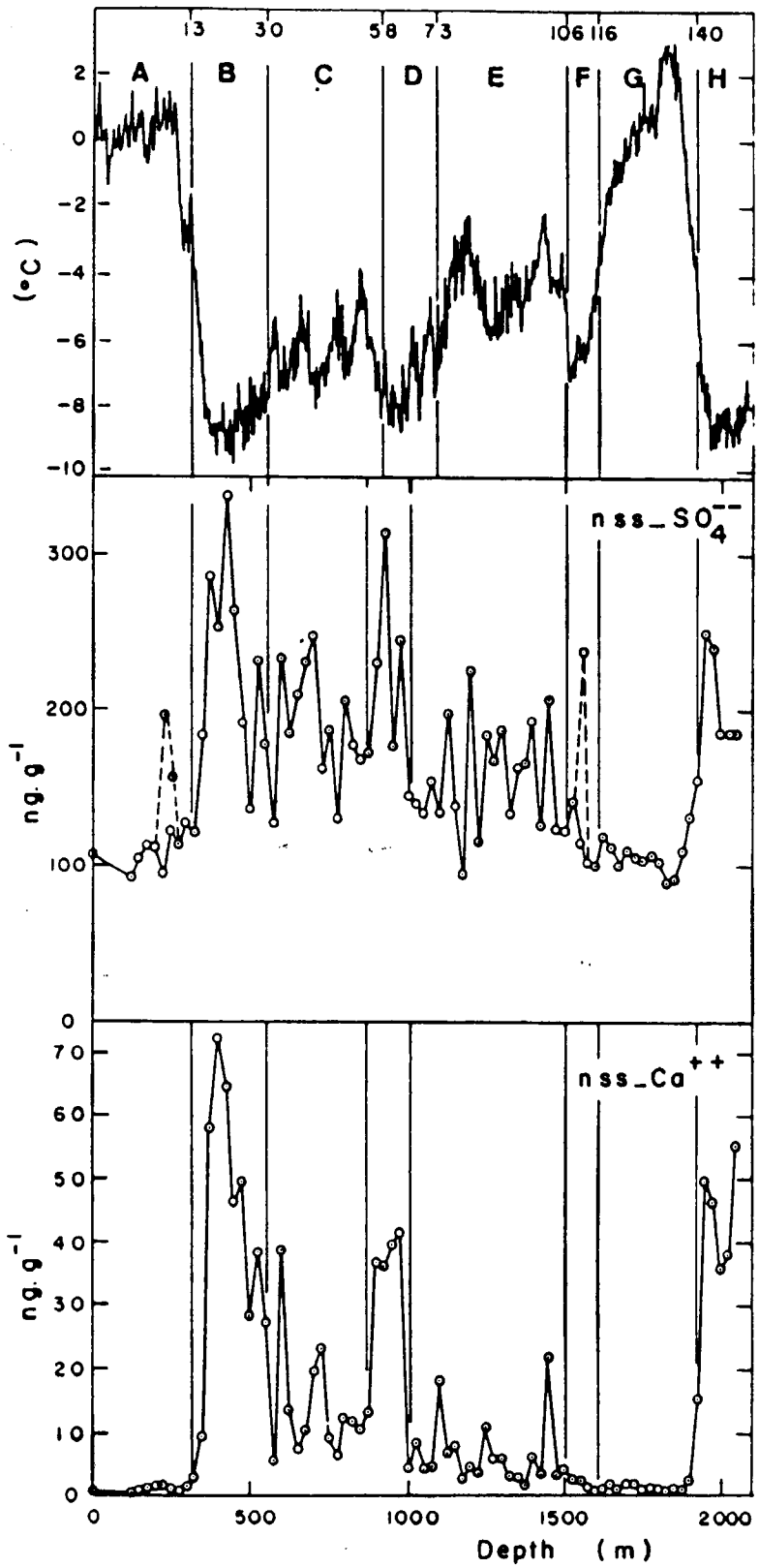


FIGURE 1.14
CONCENTRATIONS DE SULFATE EN EXCES DANS LA GLACE DE VOSTOK AU COURS DU DERNIER CYCLE CLIMATIQUE
(M. Legrand, R. Delmas and R. Charlson, 1988)

aérosol marin de la précipitation à Vostok correspondent à des changements globaux (intensité de l'émission d'aérosol marin en fonction du vent à la surface de l'océan ou intensité du transport atmosphérique entre les zones sources et le continent antarctique) ou même locaux (effet de dilution des concentrations observées dans la neige par un taux d'accumulation de neige variable au cours du temps). Après correction des teneurs en sodium marin des variations d'accumulation (Legrand and Delmas, 1988), la courbe obtenue (Figure 1.15) peut alors être considérée comme un reflet fidèle de la charge en aérosol marin de l'atmosphère antarctique. La forte anti-corrélation entre ce dernier profil et le profil isotopique (r = -0.86 au lieu de r = -0,9) pourrait être due au fait que la fréquence des advections d'air marin au dessus de l'Antarctique est en relation avec l'importance du gradient méridien de température ; ce dernier a probablement été, au cours du passé, très largement influencé par la température des hautes latitudes.

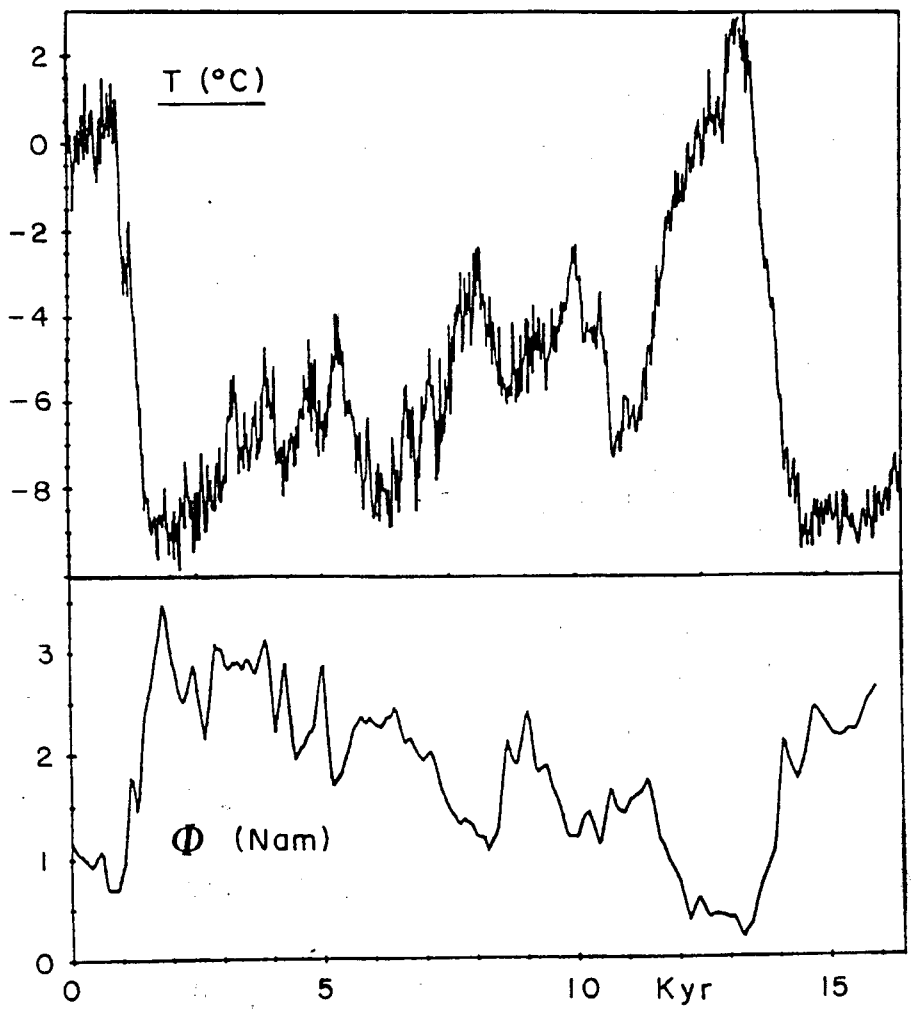


FIGURE 1.15
VARIATIONS DU FLUX DE SODIUM MARIN (UNITE RELATIVE) EN FONCTION DE LA TEMPERATURE A VOSTOK AU COURS DES DERNIERS 160.000 ANS
(M. Legrand, J.R. Petit, unpublished)

La bonne anti-corrélation "sodium-température" pourrait aussi être le reflet des émissions d'aérosol marin liées à la vitesse du vent à la surface de l'océan, ceux-ci ayant probablement été plus intenses au cours de la dernière période froide en liaison avec une atmosphère plus instable.

A cë stade de notre étude, il est clair que l'introduction des paléo-données de sodium dans un modèle de circulation générale (travail que va effectuer prochainement C. Genthon au GISS) sera une aide précieuse pour comprendre si la teneur en sodium à Vostok reflète l'intensité des transports azonaux ou la fonction source d'aérosol marin.

L'analyse spectrale du profil corrigé de sodium met bien en évidence deux fréquences (18 et 23 000 ans) qui semblent correspondre remarquablement aux fréquences liées à la précession. Cette donnée importante est actuellement en cours d'exploitation.

Enfin le profil du rapport Cl/Nam (voir chapitre 2 : glaciochimie) a confirmé la nature plus turbulente de l'atmosphère au cours des stades B, D et H.

II.3.4.3 - AEROSOL TERRIGENE

(J.R. Petit, L. Mounier, M. de Angelis)

Les études antérieures de la teneur en aluminium et en calcium (M. de Angelis et al., 1987 ; Legrand et al., 1988b) avaient montré qu'au cours de la période froide, la teneur en poussières d'origine terrigène augmentait régulièrement du stade F au stade B et présentait de plus de très fortes augmentations au cours des stades B et D (périodes de froid extrême).

Les variations des concentrations et des paramètres de distribution des microparticules insolubles ont été mesurées sur la carotte de Vostok en utilisant un compteur Coulter et un microscope optique (comptage sur filtre). Ces deux méthodes sont complémentaires et ont été mises en oeuvre pour la mesure sur les échantillons préalablement soumis à une sévère procédure de décontamination.

Les profils de concentrations (~ 280 points) montrent un accroissement significatif du flux de poussières au cours des trois épisodes glaciaires majeurs du dernier cycle climatique. Les poussières sont principalement des alumino-silicates d'origine continentale avec une faible proportion de particules d'origine volcanique. Les poussières seraient issues en majorité des zones arides et désertiques des continents de l'Hémisphère Sud, toutefois la présence de particules de taille anormalement élevée au cours du dernier maximum glaciaire (vers 20 000 BP) suggère la possibilité d'une contribution locale seulement au cours de cet épisode. Les augmentations du flux de poussières sont la conséquence directe des caractéristiques du climat glaciaire durant lequel l'aridité continentale s'est étendue et la circulation atmosphérique intensifiée. L'analyse spectrale du signal poussières indique la présence de périodes de 40 000 et 20 000 ans semblables aux cycles des paramètres orbitaux de la Terre.

La comparaison du profil de Vostok avec d'autres enregistrements de poussières éoliennes en milieu continental et marin, obtenus dans

l'Hémisphère Nord montre que la mobilisation et le transport d'aérosols d'origine continentale en période glaciaire seraient une caractéristique globale. Le flux de poussières à Vostok a également été comparé avec un enregistrement de susceptibilité magnétique mesuré à RC 11120 (Figure 1.16) que nous avons interprété en terme de flux éolien.

Malgré des différences probablement liées à la chronologie de Vostok et de RC 11120, les flux de poussières présentent la même allure générale à savoir la présence de trois maximums en périodes froides.

L'étude minéralogique des particules insolubles présentes dans la carotte de Vostok suggère au vu de l'absence remarquée de kaolinite, que l'Australie représenterait une source mineure de poussières durant les stades de froid extrême. Par ailleurs, la prédominance d'illite et la présence de verres volcaniques très altérés suggèrent plutôt l'Amérique du Sud comme source d'aérosols terrigènes pendant les périodes froides (Gaudichet et al., 1988).

III - COLLABORATIONS ET CONTRATS

III.1 - L'EXPLOITATION DES ARCHIVES GLACIAIRES DU CLIMAT

. Elle est réalisée en collaboration étroite avec différentes équipes françaises participant aux programmes du PNEDC sur la Paléoclimatologie aux hautes latitudes (Antarctique)

- températures et précipitations : séries séculaires et millénaire (responsable : J. Jouzel)
- évolution du climat et des paramètres atmosphériques au cours du dernier cycle climatique (responsable : C. Lorius)

En dehors de nombreux contacts spécifiques l'ensemble des participants (on ne cite ci-après que quelques noms) se réunit une fois par an pour faire le point et établir les projets :

- Laboratoire de Géochimie Isotopique (C. Genthon, J. Jouzel)
- Laboratoire René Bernas d'Orsay (F. Yiou, G. Raisbeck, M. Maurette)
- Laboratoire de Microscopie Analytique de Créteil (R. Lefèvre)
- Centre des Faibles Radioactivités et Tandetron (J.C. Duplessy, L. Labeyrie).

Cette collaboration permet de plus le lien avec les paléoclimatologues marins et la modélisation de l'atmosphère (LMD : S. Joussaume).

. La réalisation de campagnes en Antarctique bénéficie du soutien de la Mission de Recherche des Terres Australes et Antarctiques Françaises et des Expéditions Polaires Françaises. Les programmes associés aux carottages profonds et aux régions centrales de l'Antarctique ont par ailleurs nécessité un soutien logistique important de la part des Expéditions Antarctiques Soviétiques (Institut Arctique et Antarctique de Léningrad) et de la NSF (Division of Polar Programs).

. Au plan international, les résultats obtenus sur la carotte de Vostok ont notamment conduit à une série de présentations dans les Universités américaines.

Un certain nombre de scientifiques ont par ailleurs visité notre laboratoire et y ont donné des séminaires :

. N.I. Barkov, V. Ya. Lipenkov, et B.A. Krutskih de l'Institut de Recherches Arctiques et Antarctiques de Léningrad,
. V.M. Kotlyakov de l'Institut de Géographie de l'Académie des Sciences de Moscou
. M. Ram de l'Université de New-York à Buffalo
. R. Souchez de l'Université Libre de Bruxelles
. J. Imbrie (Brown University)
. Yao Tan Dong de l'Université de Langzhou (Chine) a effectué un séjour de 6 mois au laboratoire.

III.2 - ETUDE DES GAZ ATMOSPHERIQUES

. Les travaux sur le CO_2 ont été effectués dans le cadre de l'action incitative PIREN/MRT sur le cycle du carbone, et dans celui du programme de la CCE dans le domaine de la climatologie. Les travaux sur la composition isotopique de l'oxygène des bulles d'air ont bénéficié d'un soutien du PNEDC.

. les collaborations nationales et internationales engagées sur l'étude des gaz atmosphériques incluent :

- une série d'intercomparaisons avec l' Institut de Physique de Berne pour la mesure du CO_2 dans les bulles d'air de la glace (laboratoire de H. Oeschger)
- Une collaboration avec G. Holdsworth (National Hydrology Research Institute, Calgary, Canada) pour l'étude en CO_2 de la carotte du Mont Logan.
- une collaboration avec l'équipe de W. Seiler (Fraunhofer Institut à Garmisch) sur les traces gazeuses,
- une collaboration étroite avec l'Université de Rhode Island aux USA (M. Bender) sur la composition isotopique de l'oxygène atmosphérique.Dans ce cadre T. Sowers (University of Rhode Island) a fait un séjour de 8 mois au laboratoire.

. Au plan national, D. Raynaud assure la responsabilité du sous

programme CO_2 du PNEDC.

III.3 - CONTRATS

L'équipe bénéficie du soutien du PNEDC, du PIREN, du Ministère de l'Environnement et des Communautés Européennes.

IV - LISTE DES PUBLICATIONS

IV.1 - REVUES A LECTEUR

Aristarain, A.J., Jouzel, J. and Pourchet, M., 1986 :
Past Antarctic Peninsula climate (1850-1980) deduced from an ice core isotope record, *Climatic Change, 8*, 1.

Gaudichet, A., J.R. Petit, R. Lefevre and C. Lorius, 1986 :
Investigation by analytical transmission electron microscopy of individual insoluble microparticles from Antarctic (Dome C) ice core samples. *Tellus, 3-4*, 250-261.

Pettre P., Pinglot J.F., Pourchet M. and Reynaud L., 1986 :
Accumulation distribution in Terre Adelie, antarctica : effect of meteorological parameters,*J. of Glaciology, 32*, 112, 486-500.

Petit J.R., Duval P. and Lorius C.,1987 :
Long term climatic changes indicated by crystal growth in polar ice, *Nature, 326*, 62-64.

Raisbeck G.M., Yiou F., Bourles D., Lorius C., Jouzel J. and Barkov N.I. 1987 :
Evidence for two intervals of Enhanced ^{10}Be Deposition in Antarctic Ice during the Last Glacial Maximum, *Nature, 326*, 273-277.

Raynaud, D. and Barnola, J.M., 1987 :
Are the abrupt CO2 changes recorded in the Dome C ice core near the last ice age. Holocene transition of atmospheric significance ? In :" Abrupt Climatic Change, Report on the Conference, october 1985, Grenoble" . W.H.Berger and L. Labeyrie (conveners), SIO-Reference 86 -

Jouzel J., Lorius C., Merlivat L. and Petit J.R., 1987 :
Abrupt climatic changes the antarctic ice record during the late pleistocene, NATO ASI series, Vol. 216, Abrupt climatic change : evidence and implications, W.H. Berger and L.D. Labeyrie ed. Reidel Publishing Company, 135-146.

Jouzel J., Lorius C., Petit J.R., Genthon C., Barkov N.I., Kotlyakov V.M. and Petrov V.N., 1987 :
Vostok ice core : a continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160,000 years), *Nature, 329,* 403-408.

Barnola J.M., Raynaud D., Korotkevich Y.S. and Lorius C., 1987 :
Vostok ice core : a 160,000 year record of atmospheric CO_2, *Nature, 329,* 408-414.

Genthon C., Barnola J.M., Raynaud D., Lorius C., Jouzel J., Barkov N.I., Korotkevich Y.S. and Kotlyakov V.M., 1987 :
Vostok ice core : the climate response to CO_2 and orbital forcing changes over the last climate cycle (160,000 years), *Nature, 329,* 414-418.

Aristarain A.J., Pinglot J.F. and Pourchet M., 1987 :
Accumulation and temperature measurements on the James Ross Island ice cap, Antarctic Peninsula, *J. of Glaciology, 33,* 115, 1-6.

Lorius C., N.I. Barkov, J. Jouzel, Y.S. Korotkevich, V.M. Kotlyakov and D. Raynaud, 1988 :
Antarctic ice core : CO_2 and climatic change over the last climatic cycle, *EOS, 69,* n°26, 683-684.

Ram, M., R. Gayley and J.R. Petit, 1988 :
Insoluble particles in antarctic ice : background aerosol size distribution and diatom concentration, *J. Geophys. Res., 93,* D7, 8378-8382.

Raynaud, D., J. Chappelaz, J.M. Barnola, Y.S. Korotkevich and C. Lorius, 1988 :
Climatic and CH_4 cycle implications of glacial-interglacial CH_4 change in the Vostok ice core, *Nature, 333* 655-657.

Lorius C., 1988 :
Polar ice cores and climate, Symposium on Climate and Geosciences, NATO, Bruxelles (mai 1988), Reidel Publ. Co (in press).

Lorius C., G. Raisbeck, J. Jouzel and D. Raynaud, 1989 :
Long-term environmental records from antarctic ice cores, Dalhem workshop, Berlin March 13-18, 1988, *The Environmental Record in Glaciers and Ice Sheets, Report 8,* (H. Oeschger and C.C. Langway Jr. eds.), 343-362.

Lorius C., J.M. Barnola, C. Genthon, J. Jouzel, M. Legrand, J.R. Petit, G. Raisbeck, D. Raynaud, C. Ritz, F. Yiou, N.I. Barkov, Y.S. Korotkevich, V.M. Kotlyakov, V.N. Petrov, 1989 :
Long term climatic and environmental record from antarctic ice, in : *Geophysical Monograph, AGU,* (A. Berger, R. Dickinson eds).

Jouzel J., N.I. Barkov, J.M. Barnola, C. Genthon, Y.S. Korotkevith, V.M. Kotlyakov, M. Legrand, C. Lorius, J.R. Petit, V.N. Petrov, G. Raisbeck, D. Raynaud, C. Ritz and F. Yiou, 1989 :
Global change over the last climatic cycle from the Vostok ice core record (Antarctica), *Quaternary Science Reviews* (in press)

Jouzel, J., G. Raisbeck, J.P. Benoist, F. Yiou, C. Lorius, D. Raynaud, J.R. Petit, N.I. Barkov, Y.S. Korotkevich and V.M. Kotlyakov, 1989 :
The Antarctic climate over the late glacial period, *Quaternary Research* (in press).

Sowers T., Bender M. and Raynaud D., 1989 :
The elemental and isotopic composition of occluded O_2 and N_2 in polar ice, *J. of Geophs. Res. - Atmosphere*, (in press).

Zardini D., Raynaud D., Scharffe D. and Seiler W., 1989
N_2O measurements on air extracted from antarctic ice cores ; implications on atmospheric N_2O back to the last glacial-interglacial transition, *J. of Atmos. Chem.*, (in press).

IV.2 - COLLOQUES-SYMPOSIUM

WMO (avec participation de D.Raynaud), 1986 :
Report of the international conference of the assessment of the role of carbon dioxide and of other greenhouse gages in climate variations and associated impacts, World Climate Programme, WMO N° 661. 78 p.

Lorius, C., Jouzel, J., Ritz, C., Merlivat, L., Petit, J.R., Barkov, N.I., Korotkevich, Y.S. et Kotlyakov, V.M., 1986 :
Stratigraphie isotopique du dernier cycle climatique (150000 ans) dans les sédiments glaciaires de l'Antarctique, Société Hydrotechnique de France, Paris, 11-12 février 1986.

Lorius, C., 1986 :
Les archives glaciaires : climat et environnement atmosphériques au cours des derniers 150.000 ans, Symposium " Changements globaux en Afrique durant le Quaternaire (INQUA-ASEQUA), Dakar. 21-28 Avril 1986. H. Faure, L. Faure E.S. Diop, eds., 269-272.

Petit J.R., Duval P. and Lorius C., 1987 :
Temperature dependence of the crystal growth rate in polar glaciers, VIIe Conférence sur la Physique et la Chimie de la Glace, 1 au 5 septembre 1986, *Journal de Physique*.

Lorius C., Barnola J.M., Legrand M., Petit J.R., Raynaud D., C. Ritz, C. Genthon, J. Jouzel, G. Raisbeck, F. Yiou, N.I. Barkov, Y.S. Korotkevich, V.N. Petrov, V.M. Kotlyakov, 1987 :
Global change over the last climatic cycle from ice core records INQUA Symposium, Aug. 1987, Ottawa.

Jouzel J., C. Lorius, D. Raynaud, J.R. Petit, G. Raisbeck, F. Yiou, N.I. Barkov, Y.S. Korotkevich and V.M. Kotyakov, 1987 :
The last glacial maximum conditions as deduced from Antarctic deep ice core, INQUA Symposium, Aug. 1987, Ottawa.

Raynaud D., Mazaudier D., Barkov N.I., Lipenkov V. and Lorius C., 1987
Elevation changes over the past 160000 years near Vostok (East Antarctica) from air content in ice, *IUGG Symposium* Vancouver August 1987.

Mounier L., J.R. Petit, J. Jouzel, C. Lorius, Y.S. Korotkevich, N.I. Barkov, 1987 :
Vostok ice core : the dust record over the last climatic cycle, FISAG Bremerhaven, Sept. 1987

Martinerie P., Raynaud D., Mazaudier D., Gow A.J., Holdsworth G., Lipenkov V.Ya. and Young N.W., 1988 :
The relationship between total gas content of polar ice atmospheric pressure and surface elevation (abstract), *Annals of Glaciology, 11,* 203.

Jouzel J., Lorius C., Petit J. R., Genthon C., Barkov N.I., Korotkevich Y. S. and Kotlyakov V.M., 1988 :
Climatic interpretation of a continuous deuterium profile obtained from the Vostok ice core, Antarctica (160 000 years), Symposium on ice core analysis, Berne, 1987, (Extended Abstract), *Annals of Glaciology,* 10, 206-207.

Barnola J.M., Genthon C., Raynaud D., Jouzel J., Korotkevich Y.S. and Lorius C., 1988 :
Atmospheric CO_2 variations over the last climatic cycle (160 000 years) deduced from the Vostok ice core, Antarctica. Symposium on ice core analysis, Berne, 1987, *Annals of Glaciology (extended abstract),* 10, 199-200.

Aristarain A.J., J. Jouzel, M. Pourchet, C. Lorius, 1988 :
Antarctic Peninsula climate over the last 400 years, deduced from an ice core record, (Extended abstract), *Annals of Glaciology, 10,* 198.

Sowers T.A., M.L. Bender, D. Raynaud and C. Lorius, 1988 :
Elemental and Isotopic composition of O_2 and N_2 gases in ice cores (Abstract), *Annals of Glaciology, 10.*

Zardini D., D. Raynaud, D. Scharffe and W. Seiler, 1988 :
N_2O measurements on air extracted from Antarctic ice cores (Abstract), *Annals of Glaciology, 10.*

Barnola J.M., Genthon C., Raynaud D., Jouzel J., Korotkevich Y.S. and Lorius C., 1988 :
Atmospheric CO_2 variations over the last climatic cycle (160000 years) deduced from the Vostok Ice core, Antarctica (Extended Abstract), *Annals of Glaciology, 10* 199-200.

IV.3 - AUTRES PUBLICATIONS

Benoist J.P., 1986 :
Analyse spectrale de signaux glaciologiques : étude des glaces sédimentaires déposées à Dome C ; morphologie du lit d'un glacier, Thèse de Doctorat d'Etat, USTMG, Grenoble, 30 octobre 1986.

Lorius, C., 1986 :
La glace du Pôle Sud raconte la Terre. Supplément n° 493 à la BT 981. Bibliothèque de Travail, Publications de l'Ecole Moderne Française, CNRS et Expéditions Polaires Françaises.

Zardini D., 1987 :
Analyse du protoxyde d'azote de l'air emprisonné dans la glace. Mise au point d'une méthode expérimentale. Applications à l'analyse des variations au cours du passé. Nouvelle Thèse, Université de Paris VII, 30 Novembre 1987.

Lorius C. et Jaubert J.L., 1988 :
Terres et Océans Polaires, *Périscope* PEMF, 50 p.

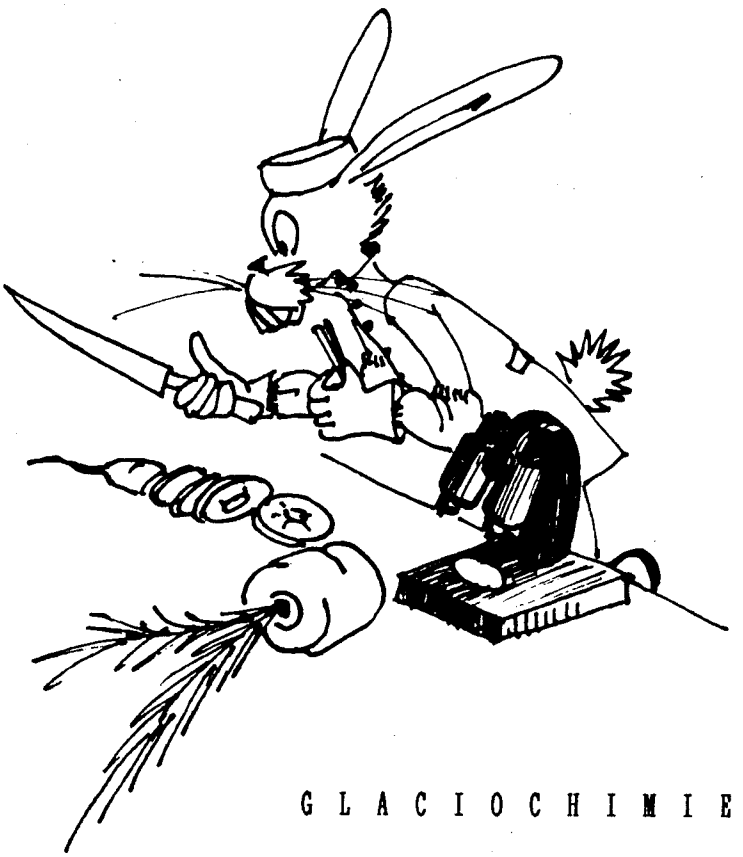
Mounier L., 1988 :
Etude des microparticules insolubles déposées dans la glace antarctique au cours des derniers cycles climatiques, thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 27 septembre 1988.

Raynaud D., 1988 :
Climatic information obtained from air trapped in Antarctic ice. *Antarctic Climate Research* Newsletter of the SCAR group of Specialists on Antarctic Climate Research, *3, 3-5.*

Raynaud D., 1988 :
Les calottes glaciaires : des archives du climat et de l'environnement de la planète. *Arts et Manufactures*, Mars.

++++
++

CHAPITRE II



GLACIOCHIMIE

I - OBJECTIF GENERAL MOYEN ET LONG TERME

Le décryptage des informations chimiques enregistrées dans les couches de neige antarctique permet en principe de retracer la composition chimique présente et passée de l'atmosphère de ces hautes latitudes. Ce type d'études (la glaciochimie) permet d'appréhender la réponse de cette atmosphère dite "de bruit de fond" à des événements naturels (les éruptions volcaniques majeures ou les grands changements climatiques) ou d'origine anthropique. Il permet aussi de mieux appréhender la redistribution par le transport atmosphérique de composés dérivés des grands cycles biogéochimiques (C, S, N) ou encore de métaux lourds qui sont souvent émis par des sources très délocalisées géographiquement et variables dans le temps.

Cette approche glaciochimique des cycles biogéochimiques nécessite de traiter différentes problématiques, certaines d'entr'elles ayant été très largement abordées par le groupe de chimie du LGGE au cours des quatre dernières années.

Le développement de méthodes originales et adaptées à la mesure des très basses concentrations généralement rencontrées dans ces régions de bruit de fond a encore notablement progressé. En effet, après avoir été les premiers à mesurer l'acidité forte de la précipitation antarctique, nous sommes maintenant les premiers à savoir mesurer correctement le fluor, l'ammonium et certains acides organiques (formique, acétique et méthanesulfonique), ces derniers pourtant réputés très difficiles à déterminer suite à des problèmes de contamination mais aussi des problèmes de perte liés à l'activité microbiologique.
Rappelons par ailleurs les difficultés analytiques très grandes à surmonter pour obtenir des résultats fiables de la teneur en certains métaux (Pb, Cd, Cu, Zn) de la neige antarctique.

Le bilan ionique quasi complet et équilibré de la précipitation antarctique, que nous nous sommes attachés à établir dans les dernières années, nous a permis de considérer le système atmosphérique des différents cycles biogéochimiques comme un tout. Cette approche globale nous permet d'appréhender différents aspects touchant tant aux cycles de N et de S qu'à celui des halogènes.

L'étude, au cours des 2 dernières années, de nouveaux traceurs a été un atout indiscutable pour interpréter nos résultats, en particulier sur le cycle du soufre. La confrontation entre certains de nos résultats antarctiques et les modèles "chimie et transport" a permis

de faire progresser notre connaissance du cycle de l'azote aux hautes latitudes.

La fonction de transfert à l'interface air-neige n'est pas toujours une relation simple. Cette difficulté, dont nous sommes conscients, ne remet pas en question la validité de notre approche glaciochimique. En effet, même si la fonction de transfert dans ces régions très froides fait intervenir des phénomènes physiques très spécifiques et pas toujours bien compris, nous avons apporté une contribution essentielle à la chimie atmosphérique au cours des deux dernières années.

L'utilisation de techniques chimiques ou encore radiochimiques développées en régions polaires s'est révélée être très utile pour travailler aussi sur la neige des Alpes et les sédiments lacustres ou encore sur les couches de neige déposées près de sources telles que les volcans.

II - RESULTATS MAJEURS OBTENUS DEPUIS LE DERNIER RAPPORT

II.1 - CYCLES BIOGEOCHIMIQUES

II.1.1 - Cycle du soufre

(M. Legrand, C. Feniet-Saigne, R. Delmas)

Dans la neige antarctique, le sulfate est présent sous forme de sel de mer (embruns marins) et sous une autre forme appelée le sulfate "en excès". Notre effort pour établir systématiquement le bilan ionique de la précipitation antarctique (Legrand, 1987) a permis de déterminer les diverses origines du sulfate en excès (Na_2SO_4, H_2SO_4, $CaSO_4$; Legrand et al., 1988).

Ces différentes formes de sulfate en excès font appel plus ou moins directement à la présence d'acide sulfurique (Figure 2.1). Ce dernier, injecté sporadiquement au cours du temps dans la stratosphère par l'activité volcanique, vient perturber de manière importante mais brève (~ 2 ans) les teneurs en sulfate en excès de la neige antarctique (§ II.1.2.).

Nous avions antérieurement suggéré qu'en période "non volcanique" l'excès de sulfate (qui représente l'essentiel du sulfate présent dans la neige) provenait de l'oxydation atmosphérique du SO_2, lui-même produit d'oxydation du diméthylsulfure (DMS) émis par l'activité biogénique marine. L'étude des variations spatiotemporelles des teneurs

en acide méthanesulfonique (MSA), un autre produit d'oxydation du DMS, confirme cette hypothèse. L'étude de la teneur en MSA est un atout indiscutable pour départager, dans nos profils de sulfate, les dépôts de soufre volcanique de ceux provenant des émissions biogéniques marines.

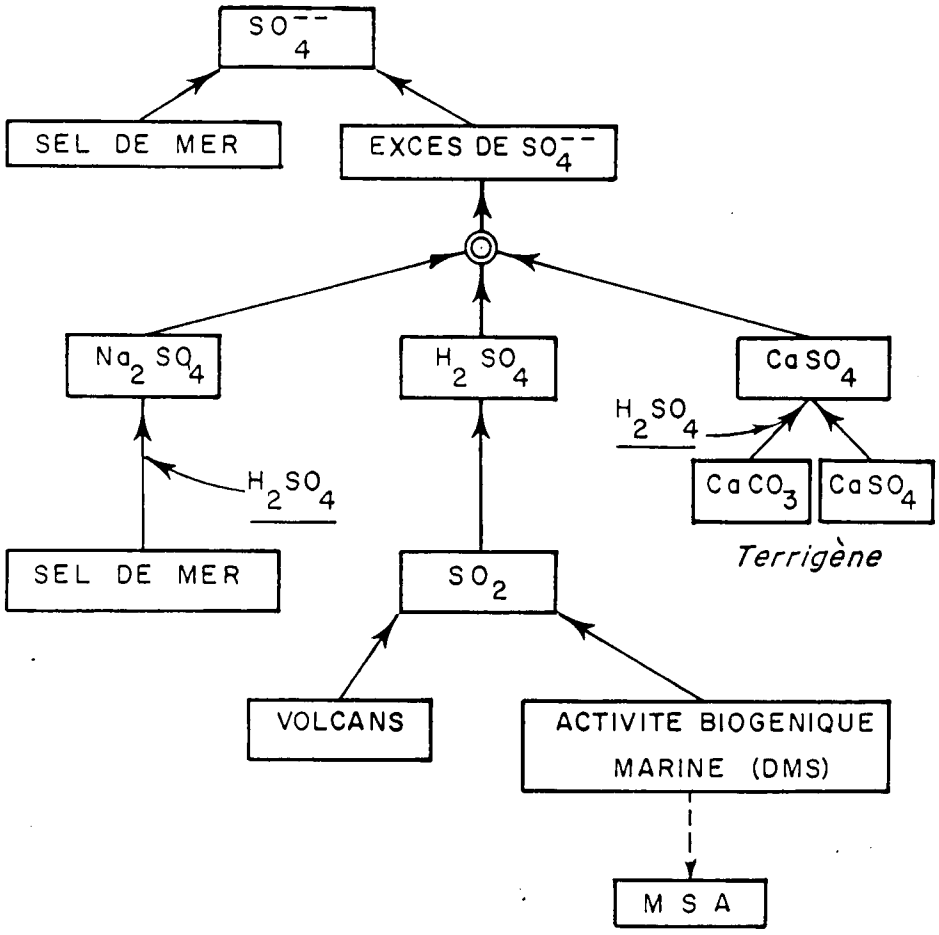


FIGURE 2.1
LES DIFFERENTES ORIGINES DU SULFATE PRESENT DANS LA NEIGE ANTARCTIQUE. LA CONTRIBUTIUON TERRIGENE ($Ca\ SO_4$) NE DEVIENT SIGNIFICATIVE QUE DURANT LES PERIODES TRES FROIDES.

Par ailleurs notre étude simultanée du sulfate en excès et du MSA dans la neige antarctique a, pour la première fois, montré la prédominance du MSA sur le SO_2 comme produit d'oxydation du DMS dans l'atmosphère des hautes latitudes (Saigne and Legrand, 1987). Ce résultat représente en soi une donnée importante car la connaissance des mécanismes exacts de l'oxydation atmosphérique du DMS est un problème que les chimistes de l'atmosphère ne sont pas encore parvenus à résoudre.

Le profil de MSA couvrant le dernier grand changement climatique (Figure 2.2) suggère une augmentation vers l'atmosphère des émissions biogéniques marines en soufre durant le dernier maximum glaciaire (Saigne and Legrand, 1987).

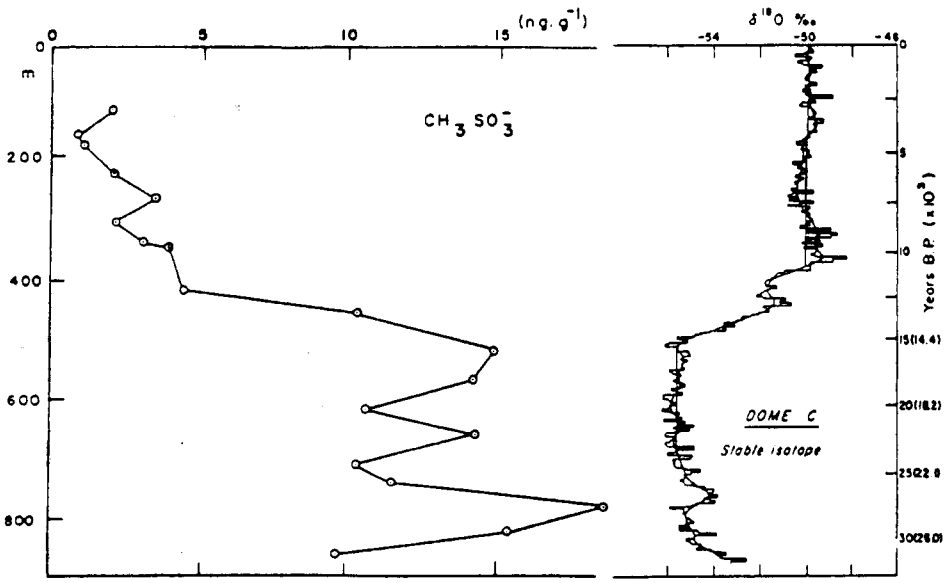


FIGURE 2.2
CONCENTRATION D'ACIDE METHANESULFONIQUE AU COURS DES 30 000 DERNIERES ANNEES DANS LA GLACE DU DOME C (Saigne et Legrand, 1987)

L'étude de la teneur en sulfate en excès le long de la carotte de Vostok conduit à la même conclusion (Legrand et al., 1988) pour la fin de la dernière période glaciaire.

Des difficultés d'ordre analytique (présence de kérosène dans les carottes) ont retardé l'étude du MSA sur cette carotte de Vostok. Il semble cependant que ces difficultés puissent être surmontées, nous ouvrant la possibilité de reconstituer l'histoire des émissions biogéniques marines soufrées au cours du dernier cycle climatique. De telles études peuvent permettre d'évaluer le rôle climatique potentiel joué par cet aérosol soufré au cours des changements climatiques (voir chapitre "climat").

II.1.2 - Paléovolcanisme

(M. Legrand, R. Delmas, S. Kirchner, J.R. Petit, M. De Angelis)

Principe

Le niveau de base de sulfate dans la neige antarctique est perturbé sporadiquement par des apports de sulfate d'origine volcanique ayant atteint les hautes latitudes, soit via la troposphère (cas rare des éruptions subantarctiques), soit via la stratosphère (cas des grandes éruptions explosives se produisant à différentes latitudes à raison de quelques unes par siècle). Les perturbations durent un à deux ans avec des maxima de sulfate pouvant atteindre plus de dix fois le niveau de base.

Ces repères volcaniques servent notamment à :

1) reconstruire l'histoire et évaluer l'impact atmosphérique du volcanisme explosif à l'échelle du globe,

2) dater les couches de neige (quand l'éruption repérée peut être identifiée, ce qui est très difficile pour des âges dépassant les mille dernières années),

3) intercomparer les datations de plusieurs carottages en y repérant les mêmes niveaux volcaniques exceptionnels.

Les régions centrales antarctiques à très faible taux d'accumulation présentent un intérêt exceptionnel pour ce type d'étude.

Résultats

Au Dôme C, sur les 200 dernières années, nous avons pu identifier la majorité des événements et estimer pour chacun d'eux les retombées d'acide sulfurique. Un doublet constitué du Tambora (1815) et d'une éruption inconnue de 1809 est identifié dans tous les sites Antarctiques étudiés.

ERUPTION	ANNEE	H_2SO_4 (TG)
TAMBORA	1815	150
ARMAGURA	1846	17
KRAKATOA	1883	30 - 38
SANTA MARIA	1902	22
Agung	1963	30

Au Pôle Sud, le même type d'étude a porté pour la première fois sur les 1000 dernières années (Figure 2.3). Un événement, précisément daté 1259 grâce à une comparaison avec le Groenland, permet de recaler la datation de la carotte étudiée. Cette éruption est la plus puissante des 1000 dernières années (1,2 ppm d'acide sulfurique). Notre travail montre que la fréquence des éruptions du niveau Tambora n'est que de 4 par millénaire au maximum, parmi lesquelles certaines n'ont d'ailleurs eu qu'un impact régional.

L'identification des événements volcaniques repérés est un réel problème d'autant plus aigu que l'on remonte dans le temps. Des travaux (thèse L. Fehrenbach, stage de J. Palais) portant sur les couches acides d'origine volcanique démontrent qu'il est possible d'y trouver de très fines cendres ($\Phi < 10$ µm). L'analyse chimique des constituants majeurs de ces cendres par microscopie électronique permet alors d'identifier les éruptions (ou parfois seulement les zones éruptives) responsables des dépôts acides. C'est ainsi que le niveau Tambora a été formellement identifié.

Enfin des développements techniques originaux ont abouti à la

réalisation d'un dispositif très performant et maniable de mesure de la conductivité électrique des carottes de glace sur le terrain.

II.1.3 - Cycles des halogènes
(M. Legrand et R. Delmas)

La large couverture spatiotemporelle de notre étude simultanée du chlore et du sodium de la précipitation antarctique a montré que :

- Dans les régions côtières, le rapport Cl/Na de la neige restait voisin de 1,8 (valeur de l'eau de mer),
- Dans les régions centrales, et pour les conditions climatiques actuelles, le rapport varie largement de 0,2 à 10 (Legrand and Delmas, 1988).

Le bilan ionique équilibré nous avait montré que les rapports Cl/Na > 1,8 sont liés à la présence d'acide chlorhydrique, les rapports Cl/Na < 1,8 à la présence de sulfate de sodium.

Ainsi, ce que nous retrouvons dans la neige des régions centrales correspond aux produits formés lors de l'altération du sel de mer suivant le schéma :

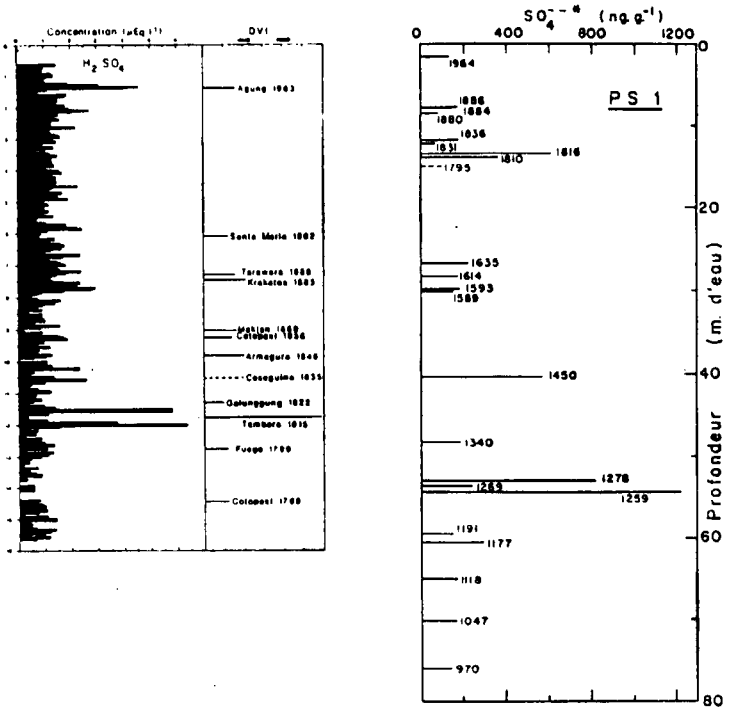


FIGURE 2.3
PRINCIPAUX EVENEMENTS VOLCANIQUES DECELES (PAR DES AUGMENTATIONS DE LA TENEUR EN ACIDE SULFURIQUE) AU COURS DU DERNIER MILLENAIRE DANS LA NEIGE DE POLE SUD (Thèse de S. Kirchner, 1988) AU COURS DES 200 DERNIERES ANNEES AU DOME C (Legrand and Delmas, 1987).

$$2\,NaCl \underset{\text{(sel de mer)}}{} + H_2SO_4 \rightarrow Na_2SO_4 + HCl$$

Le mécanisme exact d'incorporation de l'acide chlorhydrique dans la neige demeure mal connu. Pour cette raison, il est encore difficile de comprendre pourquoi durant le précédent interglaciaire (stage G, Figure 2.4) la précipitation à Vostok présente des valeurs très élevées du rapport Cl/Na alors qu'au contraire durant la période chaude actuelle (stade A, Figure 2.4) le rapport est souvent très faible.

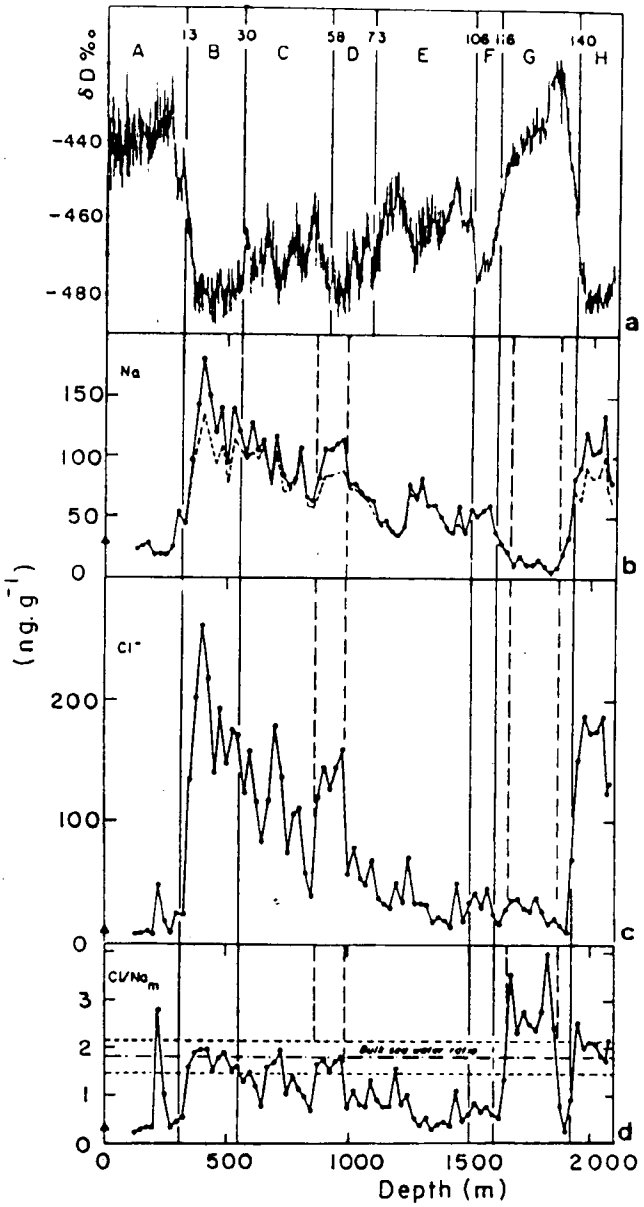


FIGURE 2.4
RAPPORT Cl/Na LE LONG DE LA CAROTTE DE VOSTOK (DERNIER CYCLE CLIMATIQUE)
Legrand et al., 1988)

- Dans les régions centrales, durant les périodes de froid extrême, le rapport Cl/Na de la précipitation demeure voisin de 1,8 suggérant l'absence d'altération du sel de mer, probablement en liaison avec les conditions météorologiques très turbulentes.

Une interprétation plus approfondie de nos résultats requiert maintenant d'effectuer des mesures tant sur la neige que dans l'atmosphère des régions centrales (mesure de l'aérosol mais aussi du gaz HCl).

II.1.4 - Cycle de l'azote

(M. Legrand, S. Kirchner, R. Delmas)

Les oxydes d'azote jouent un rôle clef dans la chimie de la troposphère de par leur influence sur le budget des OH^- via la chimie de l'ozone. Leurs sources sont très délocalisées géographiquement et souvent variables dans le temps. L'étude de l'acide nitrique (produit ultime de l'oxydation atmosphérique des NOx) aux hautes latitudes peut aider à comprendre la redistribution par le transport atmosphérique des NOx émis par les différentes sources. Deux hypothèses ont été avancées, concernant les contributions à l'origine des nitrates dans la précipitation antarctique 1) la haute atmosphère, 2) les éclairs. Nous avions suggéré antérieurement une contribution significative de la source éclairs (Legrand and Delmas, 1986).

Ce problème a notablement progressé au cours des deux dernières années, d'une part par l'obtention de nouvelles données de NO_3 dans la neige antarctique, d'autre part en utilisant un modèle 2D "chimie et transport" (stratosphère-troposphère) (stage de M. Legrand chez I. Isaksen à Oslo) pour simuler la redistribution aux hautes latitudes des NOx émis ou formés par les différentes sources.

De nombreux profils de nitrate établis à partir de forages réalisés au Pôle Sud, site particulièrement bien daté, permettent de rejeter l'hypothèse, antérieurement formulée par d'autres auteurs, d'une modulation de la teneur en NO_3 par l'activité solaire. A titre d'exemple, le profil de NO_3 (Figure 2.5) qui couvre les 1000 dernières années ne montre aucune réponse des nitrates aux périodes de très faible activité solaire telles que le Maunder et le Sporer minimum au Pôle Sud.

L'étude réalisée à Oslo avec le modèle norvégien par M. Legrand indique par ailleurs que la réponse des NOx aux variations solaires est essentiellement liée au rôle des UV sur la production de NOx à partir de N_2O et qu'elle est faible (Figure 2.6) et en opposition de phase avec le cycle solaire. Cette modélisation a en outre confirmé le rôle significatif des NOx produits par les éclairs sur le budget des oxydes d'azote en Antarctique.

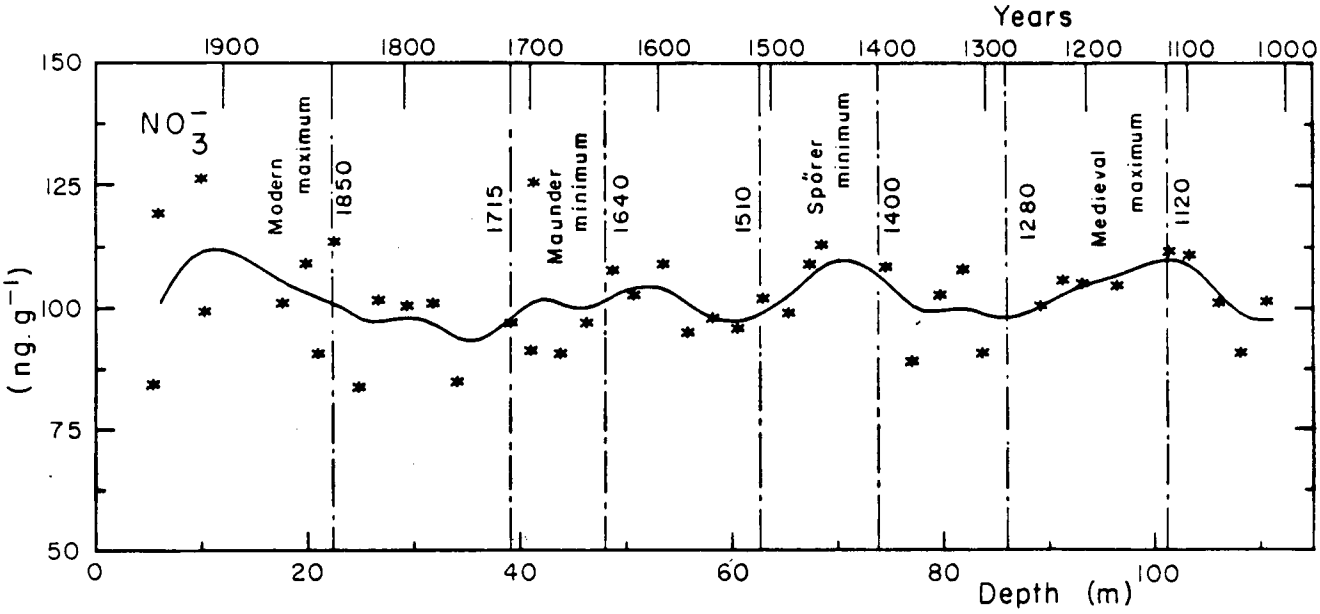


FIGURE 2.5
TENEUR EN SULFATE AU POLE SUD AU COURS DU DERNIER MILLENAIRE
(Thèse de S. Kirchner, 1988)

Les profils très détaillés 1959-1982 (définition temporelle de l'ordre du mois) du nitrate à Pôle Sud suggèrent certaines anomalies de la variation saisonnière habituellement caractérisée par un maximum en été. Ces années, durant lesquelles un maximum secondaire de NO_3^- apparaît au printemps, correspondent assez bien aux années durant lesquelles la basse stratosphère était particulièrement froide (Legrand and Kirchner, 1988). Ces résultats préliminaires montrent que cette approche peut contribuer à définir le rôle des nuages stratosphériques polaires dans la dénitrification de la basse stratosphère et le développement récent du "trou d'ozone antarctique".

Enfin, le profil de nitrate couvrant le dernier cycle climatique (Legrand et al., 1988) met en évidence de fortes augmentations des nitrates durant les stades de froid extrême. Ces variations sont liées à la présence de nitrate neutre (et non d'acide nitrique) accompagnant les fortes arrivées d'impuretés terrigènes. Ce résultat suggère que les impuretés terrigènes lors de leur transport longue distance dans la troposphère subissent une neutralisation par les gaz acides présents dans la troposphère libre (NOx, SO_2).

II.1.5 - Cycle du carbone : acides carboxyliques
(C. Feniet-Saigne, M. Legrand)

Du fait de leur rôle important en photochimie troposphérique, nous avons choisi de nous intéresser à deux acides organiques particuliers : l'acide formique et l'acide acétique qui interviennent dans les grands cycles naturels tels que celui du carbone ou sur le budget des espèces oxydantes à vie courte.

D'importants problèmes de contamination (matériaux plastiques, gaz ambiants) ont rendu nécessaire la mise au point d'un protocole expé-

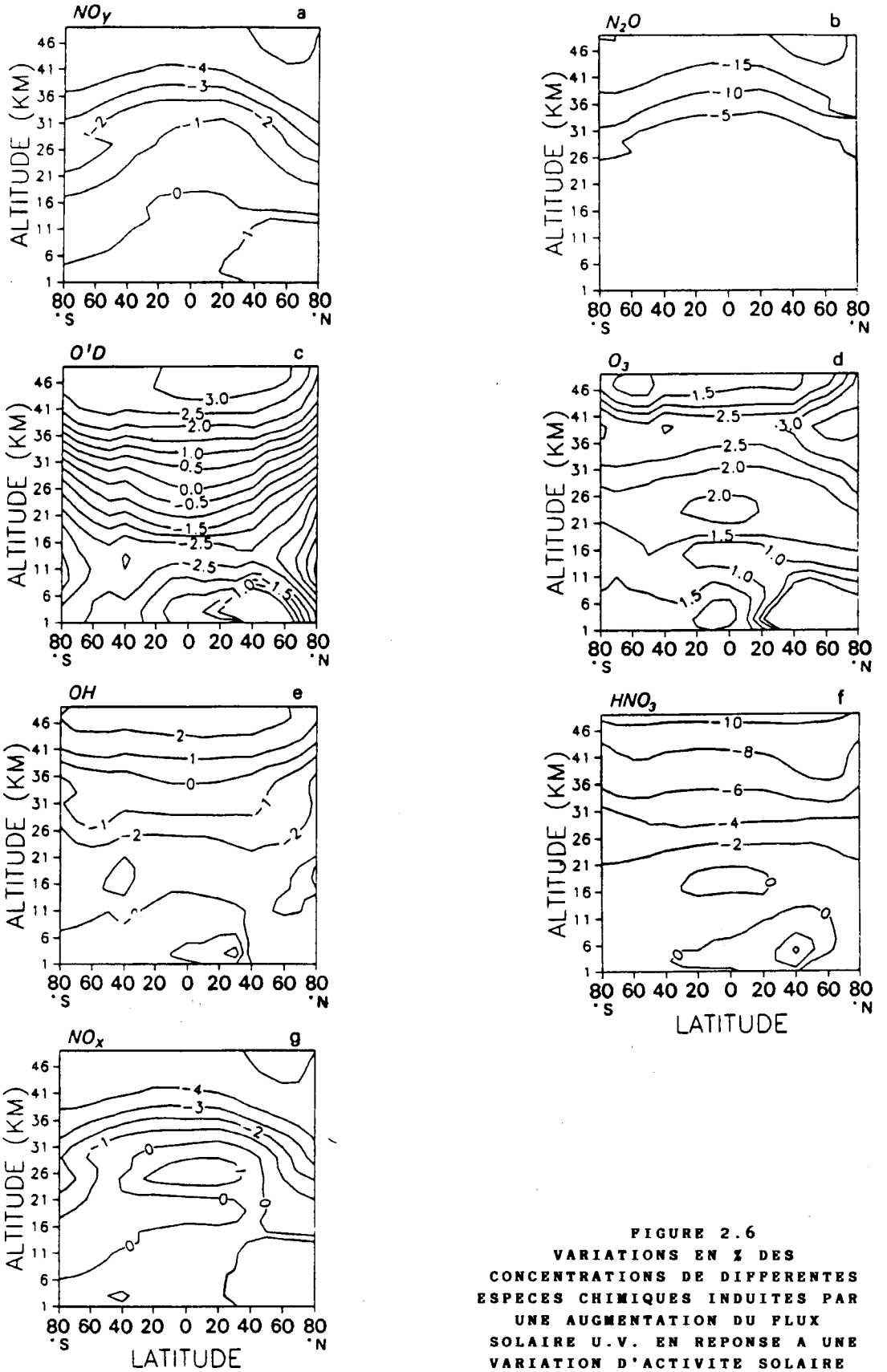


FIGURE 2.6
VARIATIONS EN % DES CONCENTRATIONS DE DIFFERENTES ESPECES CHIMIQUES INDUITES PAR UNE AUGMENTATION DU FLUX SOLAIRE U.V. EN REPONSE A UNE VARIATION D'ACTIVITE SOLAIRE (CYCLE DE 11 ANS).

L'AUGMENTATION DE L'OZONE EST DUE A UNE PHOTOLYSE ACCRUE DE L'OXYGENE ET A UNE DESTRUCTION PLUS LIMITEE PAR LES NOx. CETTE FIGURE MONTRE QUE MALGRE L'AUGMENTATION DE O(δD) (LIEE A L'AUGMENTATION D'OZONE), LA REPONSE DES NOx EST EN OPPOSITION DE PHASE PAR RAPPORT AU CYCLE SOLAIRE CAR LA PHOTOLYSE DE N_2O EST TRES IMPORTANTE.

rimental adapté au conditionnement d'échantillons de glace ou de névé en vue de mesures par chromatographie ionique. Cette méthode a également été testée pour l'ammonium et semble convenir de manière générale à l'analyse des espèces ioniques sensibles à une contamination gazeuse.

Par la suite, nos mesures dans la précipitation antarctique ont mis en évidence des concentrations extrêmement faibles (0.5 ppb) en comparaison de celles obtenues par les Américains en zone tempérée. Il semblerait bien que la température troposphérique puisse jouer un rôle au niveau de la reprise de ces acides par la précipitation expliquant ces grandes différences entre les moyennes (précipitation liquide) et hautes latitudes (précipitations solides).

En l'absence de mesures atmosphériques des acides formique et acétique aux hautes latitudes, il paraît encore hasardeux de tirer des conclusions concernant les sources, le transport et le rôle de ces espèces en atmosphère de bruit de fond.

II.1.6 - Cycle des métaux lourds

II.1.6.1 - METHODES ANALYTIQUES

(C. Boutron, F. Batifol, U. Gorlach, M. De Angelis)

L'analyse des métaux lourds tels Pb, Cd, Cu, Zn dans les neiges et glaces de l'Antarctique et du Groenland est particulièrement difficile par suite des très faibles concentrations à mesurer . Nous avons poursuivi l'amélioration des techniques analytiques précédemment mises en place au LGGE et développé de nouvelles procédures.

En ce qui concerne la décontamination des carottes, 3 techniques complémentaires ont été mises au point :

a) pour les carottes de glace ou de neige, ou pour les gros échantillons (blocs) de neige de surface : découpage de couches successives de l'extérieur jusqu'à l'intérieur des carottes ou des blocs (dans le cadre du séjour d'un an effectué par C. Boutron dans le groupe de C. Patterson au California Institute of Technology),

b) pour les carottes de glace : élimination des couches extérieures par rinçage avec de l'eau ultrapure,

c) pour les carottes de névé de faible densité, sous échantillonnage à partir d'une surface vierge à l'aide de tubes de petite taille.

L'efficacité de ces techniques a pu être évaluée grâce à l'étude des variations des concentrations de l'extérieur jusqu'à l'intérieur des échantillons. L'obtention d'un plateau de concentrations dans les parties centrales d'un échantillon permet d'affirmer que ces parties centrales n'ont pas été atteintes par la contamination extérieure (Figure 2.7).

Au LGGE, Pb, Cd, Cu et Zn sont déterminés par spectrométrie d'absorption atomique sans flamme, après préconcentration par évaporation calme, l'étalonnage de la préconcentration étant maintenant effectif (jusqu'à des niveaux de concentration beaucoup plus bas que précédem-

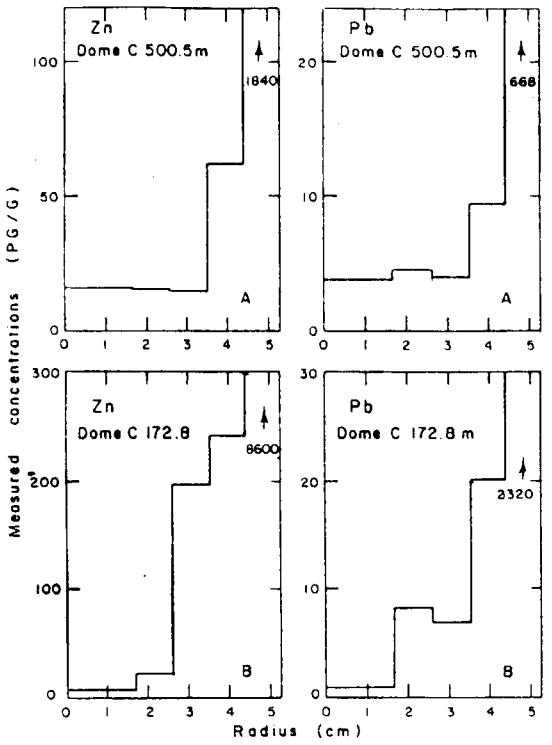


FIGURE 2.7

VARIATIONS DES CONCENTRATIONS DE Pb ET DE Zn EN FONCTION DU RAYON DANS UNE CAROTTE DU DOME C ET UNE DE VOSTOK. DANS LA PREMIERE CAROTTE, UN PLATEAU DE CONCENTRATIONS EST OBTENU POUR Zn, MAIS PAS POUR Pb : POUR CE DERNIER METAL, LA CONCENTRATION MESUREE AU CENTRE DE LA CAROTTE NE REPRESENTE DONC QU'UNE LIMITE SUPERIEURE DE LA CONCENTRATION QUI EXISTAIT REELLEMENT DANS LA GLACE ANTARCTIQUE. POUR LA DEUXIEME CAROTTE, ON OBSERVE UNE SITUATION OPPOSEE : BON PLATEAU POUR Pb, MAIS PAS DE PLATEAU POUR Zn.

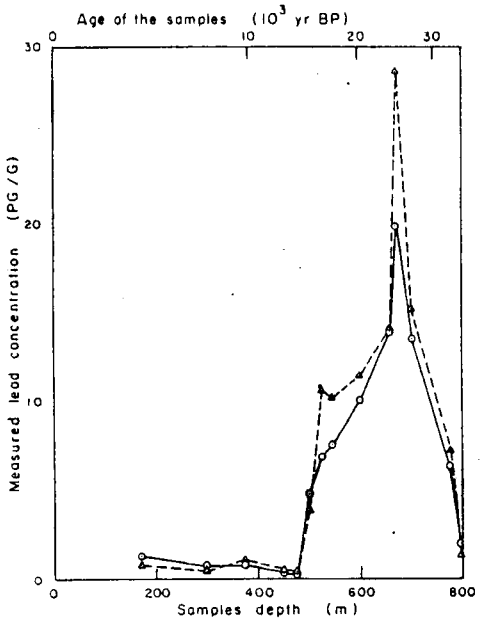


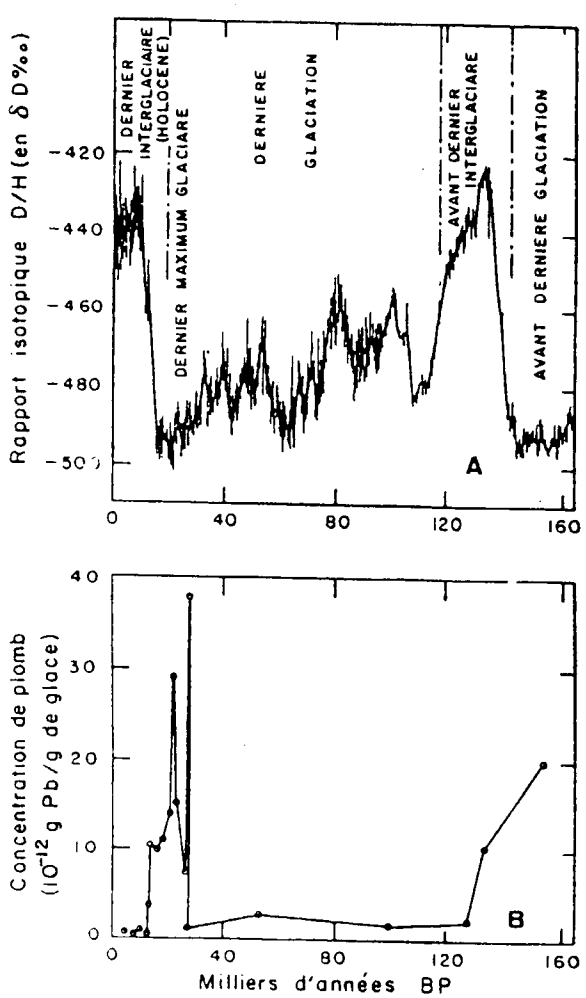
FIGURE 2.8

ANALYSE COMPARATIVE DE Pb PAR DILUTION ISOTOPIQUE AVEC SPECTROMETRIE DE MASSE (IDMS) ET PAR SPECTROMETRIE DE FLUORESCENCE ATOMIQUE LASER (LAFA). LA MESURE PAR IDMS NECESSITE UNE MASSE D'ECHANTILLONS DE 100 à 200 g, ET UNE EXTRACTION CHIMIQUE PRELIMINAIRE. LA MESURE PAR LAFA SE FAIT DIRECTEMENT SUR 0,02 g D'ECHANTILLON SANS AUCUN TRAITEMENT PREALABLE.
(Apatin et al., in press)

ment : 10^{-13} g/g). En parallèle, de nombreuses analyses de Pb ont été réalisées sur nos échantillons par C. Boutron au California Institute of Technology par Dilution Isotopique avec Spectrométrie de Masse après extraction chloroforme-dithizone. Enfin, un certain nombre d'analyses de Pb et de Cd ont été effectuées par la toute nouvelle technique de fluorescence atomique laser à l'Institut de Spectroscopie de l'Académie des Sciences de l'URSS à Moscou (Drs. M. Bolshov et V. Koloshnikov) (Figure 2.8).

II.1.6.2 - CYCLES NATURELS PASSES DES METAUX LOURDS
(C. Boutron, F. Batifol, M. De Angelis)

Les premiers profils de variations naturelles couvrant les 160 000 dernières années pour Pb et Zn et les 40 000 dernières années pour Cd, Cu et Zn ont été obtenus.



Nos résultats montrent que les concentrations naturelles de métaux ont beaucoup varié au cours des périodes étudiées : elles étaient beaucoup plus fortes pendant la fin de la dernière glaciation et la fin de l'avant-dernière glaciation que pendant l'Holocène et l'avant-dernier interglaciaire (Figure 2.9). Les contributions relatives des diverses sources naturelles de métaux (poussières de sols et de roches, aérosols marins, aérosols volcaniques) ont pu être appréhendées à partir de traceurs spécifiques. Pendant les périodes très froides , la contribution des poussières de sol et de roches est prépondérante.

FIGURE 2.9
CONCENTRATIONS DE PLOMB AU COURS DES DERNIERS 160 000 ANS. LES CONCENTRATIONS SONT BEAUCOUP PLUS ELEVEES PENDANT LES PERIODES LES PLUS FROIDES QUE PENDANT LES PERIODES CHAUDES (NOTAMMENT L'HOLOCENE).
(Boutron et al., 1987)

Pendant l'Holocène, cette contribution n'explique qu'une par tie (du tiers à la moitié) des concentrations mesurées : les faibles excès de métaux alors observés pourraient provenir soit d'une contribution volcanique, soit d'une contribution biogénique.

Ces profils de variations permettent ainsi d'établir les niveaux de références naturels passés de ces métaux dans la troposphère globale, niveaux naturels dont la connaissance est indispensable si l'on veut évaluer l'influence actuelle de l'activité humaine.

II.1.6.3 - PERTURBATION RECENTE DES CYCLES GLOBAUX DE METAUX PAR L'ACTIVITE HUMAINE

(C. Boutron, U. Gorlach)

Les concentrations de Pb et Zn ont été mesurées dans un certain nombre de gros blocs de neige de surface prélevés en Terre Adélie et au Pôle Sud. Les résultats obtenus montrent que les concentrations de Pb auraient augmenté environ 5 fois au cours des derniers siècles (Figure 2.10). La pollution de la troposphère par le plomb aurait ainsi atteint même les régions les plus éloignées de notre planète. Pour le zinc, par contre, il ne semblerait pas y avoir d'augmentation marquée au cours des derniers siècles.

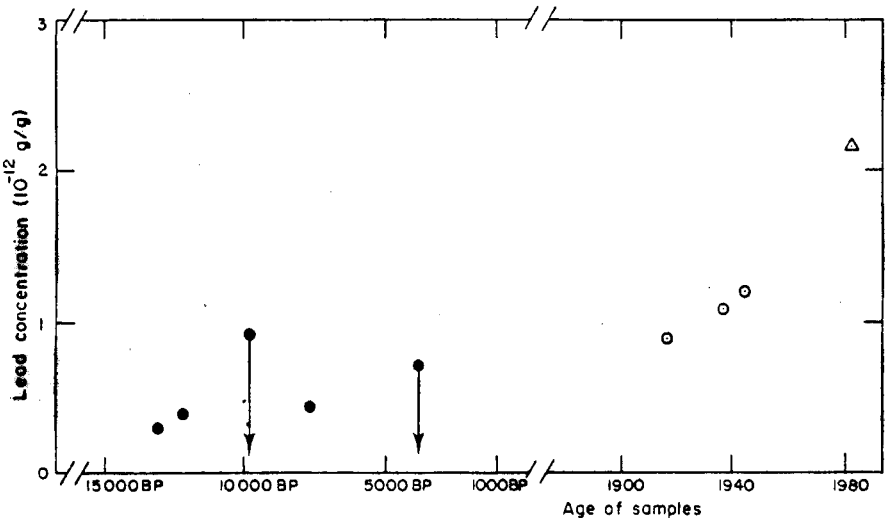


FIGURE 2.10
VARIATIONS DES CONCENTRATIONS DE PLOMB DANS LA NEIGE ANTARCTIQUE AU COURS DU DERNIER SIECLE. A TITRE DE NIVEAU DE GLACE NATUREL, ON A AUSSI REPRESENTE LES VALEURS OBTENUES POUR LA GLACE DE L'HOLOCENE. LES CONCENTRATIONS DE PLOMB ONT AUGMENTE D'ENVIRON 5 FOIS AU COURS DU DERNIER SIECLE.
(Boutron et al., 1987)

En vue de mieux préciser ces premiers résultats, nous réalisons actuellement l'analyse d'une séquence continue d'échantillons intégrant en continu le dernier siècle, prélevés en un site de Terre Adélie : ces analyses devraient permettre d'obtenir les premiers profils fiables de variations de Pb, Cd, Cu et Zn dans les régions éloignées de l'Hémisphère Sud au cours du dernier siècle.

Pour le plomb, nos résultats suggèrent que les concentrations mesurées dans les neiges antarctiques de surface seraient influencées dans de vastes zones par les émissions locales des stations scientifiques. Ces émissions sont principalement liées à la combustion des combustibles fossiles (essence, kérosène aviation, gasoil) et à l'incinération des déchets des bases. Pour Cd, Cu, Zn et S par contre, les émissions semblent limitées à des zones beaucoup plus limitées.

II.1.6.4 - ETUDE DES METAUX LOURDS DANS LA NEIGE DEPOSEE PRES DU CRATERE DE VOLCANS ACTIFS

(C. Boutron, P. Laj, F. Batifol)

En vue de préciser les ordres de grandeurs des flux d'émissions de métaux lourds par les volcans, nous avons poursuivi un programme d'analyse d'échantillons de neige prélevés à proximité du cratère de l'Etna (Italie) et du Nevado del Ruiz (Colombie).

Les résultats obtenus au Nevado del Ruiz ont permis de reconstituer les variations des flux et de la composition des émissions volcaniques durant une période de 3 ans à partir de 1983, notamment durant les éruptions de septembre et novembre 1985. La granulométrie des émissions particulaires du volcan nous a permis d'évaluer les flux efficaces d'aérosols de ce volcan. Par extrapolation, les flux volcaniques mondiaux suivants ont été obtenus (en tonnes/an) : Pb : 1800 ; Cu : 9500 ; Zn : 1800. Ces valeurs sont en bon accord avec les rares valeurs préalablement publiées pour ces flux.

A l'Etna, nos résultats ont pu être interprétés grâce à un modèle de condensation des gaz magmatiques établi par F. Le Guern du Centre des Faibles Radioactivités de Gif sur Yvette. Ils confirment que ce type d'étude peut permettre d'enregistrer en continu les manifestations de l'activité d'un volcan tout en permettant d'améliorer nos connaissances sur les processus d'émission et de transformation des produits volcaniques.

II.2 - LA MATIERE EXTRATERRESTRE

II.2.1 - L'iridium

(M. De Angelis)

L'iridium est un bon traceur de la matière extraterrestre et peut-être aussi de l'activité volcanique.

Une recherche dans les couches de neige déposées au Pôle Sud des débris consécutifs à la fameuse météorite de la Tunguska (1908) a été menée en collaboration avec le CFR de Gif-sur-Yvette (R. Rocchia).

Cette étude des teneurs en Iridium dans la neige du Pôle Sud a montré que, et ce contrairement à une étude antérieure, les débris de la Tunguska ne sont pas visibles en Antarctique (Rocchia et al., 1989). Par ailleurs le flux moyen d'iridium (10^{-15} g/cm^2/an) que nous avons observé est d'un ordre de grandeur plus faible que les valeurs antérieurement publiées par d'autres auteurs (à partir de mesures dans la

neige) mais serait par contre compatible avec les mesures atmosphériques de cet élément.

II.2.2 - Collecte des micrométéorites
(M. Maurette, M. Pourchet, M. De Angelis)

Une opération de reconnaissance au Groenland en 1984 avait permis de montrer que la zone de fusion estivale de la calotte glaciaire groenlandaise ouest était une mine particulièrement riche de poussières cosmiques. De fait, une deuxième expédition en 1987 a permis de collecter et de traiter environ 1 T de boue à cryoconite dans laquelle la poussière cométaire est encapsulée. Cette opération a livré la plus importante collection de gros grains cosmiques non fondus (taille > 600 µ) jamais recueillie ; ceux-ci appartiennent à la famille la plus intéressante des aggrégats chondritiques poreux.

Pour éviter un contact des micrométéorites avec le milieu aqueux susceptible de les altérer, une campagne de prélèvements a été faite en Antarctique en janvier 1988. La fusion d'environ 100 T de glace bleue ancienne nous a livré plusieurs milliers de grains de poussière cosmique. Nous avons également pu mettre en évidence un processus d'enrichissement de cette poussière dans la couche superficielle de glace (entre 20 et 150 cm) qui contient environ 100 grains cosmiques par tonne (cette valeur diminue d'un facteur 10 à une profondeur de 5 m).

II.3 - GLACIOCHIMIE ALPINE

II.3.1 - Etude des dernières décennies au Mt Blanc
(M. De Angelis, R. Delmas, M. Pourchet, F. Ronseaux)

La connaissance des tendances récentes de la composition chimique de l'aérosol de bruit de fond au-dessus de l'Europe peut être obtenue à partir de carottages à très haute altitude dans les Alpes. Dans ce but et avec l'aide financière conjointe de la CCE et de l'ATP "Aérosols désertiques", un carottage de 70 m a pu être réalisé en juin 1986 au Col du Dôme (altitude 4350 m) dans le massif du Mt Blanc. L'exploitation fine de ce carottage, qui couvre les 30 dernières années, n'est pas entièrement terminée mais il est déjà possible de tirer certaines conclusions qui viennent compléter notre connaissance de la chimie de la précipitation alpine.

Les poussières minérales, d'origine essentiellement saharienne, dominent largement les dépôts avec de très fortes variations saisonnières (maxima en été). Elles sont caractérisées par la présence de calcium probablement émis à partir des sols désertiques à l'état de carbonate et de gypse. Au cours de leur trajet au-dessus de la Méditerranée ces poussières alcalines sont neutralisées par les acides atmosphériques (anthropogéniques ou naturels) et retrouvées à l'état de sulfate, nitrate et carbonate de calcium dans la neige.

Les poussières sahariennes sont donc un tampon d'acidité extrêmement puissant pour les précipitations acides. Il en résulte une acidité résiduelle faible, très proche de la neutralité (en moyenne < 10 µEq.

l^{-1}). Cette valeur semble avoir peu évolué au cours des 30 dernières années, ce qui est surprenant compte-tenu de l'augmentation bien connue de la pollution acide en Europe. Le rapport SO_4/NO_3 (en µEq.) est relativement élevé (voisin de 5). Le programme Alptrac prendra le relais de ces travaux.

II.3.2 - Evolution du manteau neigeux à moyenne altitude
(V. Delmas, R. Delmas)

Le but de cette étude est la caractérisation du niveau de contamination du manteau neigeux et de l'eau de fonte printanière sur un site de moyenne montagne, éloigné de sources locales importantes de pollution. La station du Casset, station du Ministère de l'Environnement, située dans le Parc National des Ecrins, à une altitude de 1750 m, a été choisie comme site d'expérimentation.

Au cours de deux campagnes de terrain, il a été procédé au suivi physicochimique des précipitations, de la neige au sol et de la fonte printanière au Casset (hivers 1986-87 et 1987-88).

La conclusion principale de l'étude statistique des relations entre les différents ions majeurs analysés dans les précipitations est le lien entre l'acidité et le nitrate. En effet, le sulfate, pourtant plus concentré, semble avoir été neutralisé en grande partie dans l'atmosphère avant son dépôt. L'ammonium mais surtout la matière particulaire terrigène jouent des rôles importants dans ce mécanisme de neutralisation.

La détermination de l'origine de la pollution déposée au Casset s'appuie sur l'établissement par la Météorologie Nationale de trajectographies de masses d'air. Les précipitations qui drainaient le plus de pollution au Casset proviennent du centre de l'Europe ou du Nord de l'Espagne. Leur impact est d'autant plus important que la masse d'air se déplace lentement au-dessus de ces régions.

L'établissement de bilans de matière entre les quantités de matériaux mesurées respectivement dans les précipitations et dans l'eau de fonte a permis de mettre en évidence plusieurs processus intervenant sur la dynamique chimique de la neige au sol. Parmi eux, on remarque les phénomènes d'interaction entre l'eau de percolation et les particules retenues dans le manteau neigeux, avec d'une part les phénomènes d'échange cationique et de lessivage des débris végétaux entraînés par le vent en début de saison et d'autre part les phénomènes de neutralisation de l'acidité au contact de carbonates d'origine saharienne.

Des expériences de fonte sous conditions contrôlées au laboratoire nous ont permis d'écarter certains facteurs naturels de variabilité (vent, dépôts secs, pluie...) de manière à mieux dégager les mécanismes fondamentaux intervenant entre eau de percolation acide et particules neutralisantes au sein du manteau neigeux.

Les résultats indiquent que la quantité de particules minérales n'est pas l'unique facteur déterminant la qualité de l'eau de fonte mais qu'il faut aussi prendre en compte le temps de contact entre l'eau de

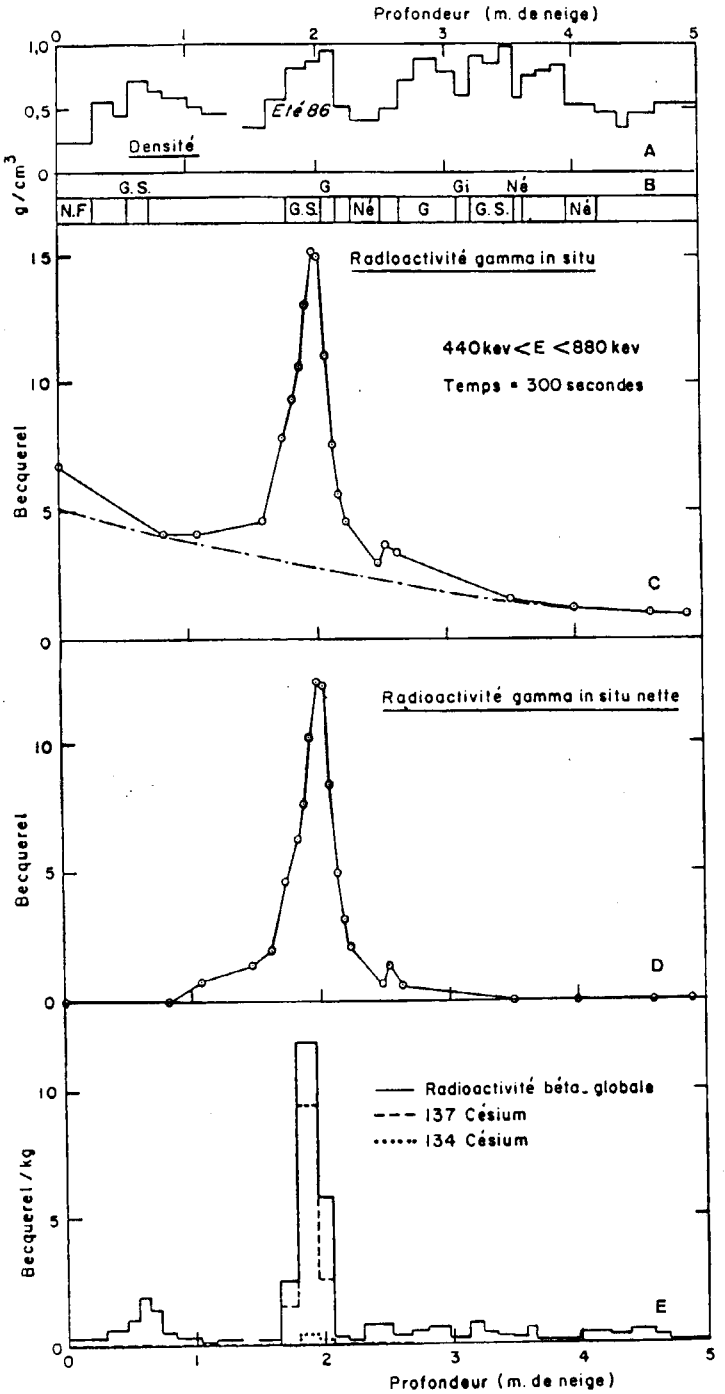


FIGURE 2.11

MESURES DE DENSITE (A), STRATIGRAPHIE (B), RADIOACTIVITE GAMMA IN SITU (C) ET (D), RADIOACTIVITE BETE-GLOBALE, CESIUM 137 ET CESIUM 134 (E), EN FONCTION DE LA PROFONDEUR EN NEIGE A LA STATION T3.

Légende (b) : N.F. : neige fraiche
G : glace
S : sale
NE : névé
GI : givre
espaces vides : névé très transformé

(J.F. Pinglot et M. Pourchet, C.R. Ac. Sci., soumis)

fonte et les particules.

L'ensemble de ces travaux ont été effectués en collaboration avec le Pr. Jones qui conduit des recherches similaires aux nôtres au Canada (Lac Laflamme, Laurentides).

II.3.3 - Bilan régional de l'accident Tchernobyl
(M. Pourchet, F. Pinglot)

Les mesures des radioactivités β-globale et γ d'échantillons de neige prélevés sur divers glaciers alpins ont permis d'établir que l'accident de Tchernobyl constitue un horizon repère pour les glaciers de l'hémisphère nord. L'activité spécifique atteint des valeurs comparables à celle des couches de neige correspondant aux retombées des essais thermonucléaires atmosphériques de 1954 et 1962-63. Des mesures de rayonnement γ in situ permettent également de déterminer le repère de Tchernobyl (Figure 2.11). L'étude du bilan glaciaire en zone d'accumulation a pu être menée en divers sites grâce à la détermination de l'horizon repère à Tchernobyl : Col du Dôme du Goûter, Dôme du glacier de Mont de Lans, glacier de la Girose, etc...

Le taux de retombée (Bq. m^{-2}) de Césium 137 a été mesuré à partir des échantillons de carottages. Tout en étant nettement inférieures aux valeurs mesurées par d'autres équipes sur les glaciers autrichiens et suisses, nos déterminations pour deux sites proches (glacier de Mont de Lans et lac Lérié) sont très semblables (~ 400 Bq. m^{-2}). Ces variabilités des bilans à l'échelle régionale sont probablement liées à la variabilité des processus de dépôt selon les versants, l'altitude.

II.4 - SEDIMENTS LACUSTRES
(M. Pourchet, F. Pinglot)

En février 1987, dans le cadre d'un programme pluridisciplinaire sur les paléoclimats et les paléoenvironnements du Cameroun (ORSTOM-UR-A3) placé sous la direction de J. Maley (ORSTOM-Montpellier) nous avons prélevé des carottes de sédiments dans 5 lacs camerounais, du sud au nord : Ossa, Barombi-Mbo, Bambuluwé, Oku et Nyos. La mesure de différents radioéléments naturels ou artificiels nous a permis de déterminer des vitesses de sédimentation ou de mettre en évidence des anomalies de cette sédimentation.

Concernant le lac de Nyos d'où une éruption de CO_2 en août 1986 avait provoqué la mort de plus de 1700 personnes, nos mesures ont permis d'éclairer certains points relatifs à la catastrophe. Les principales conclusions sont :

- que le sédiment a été mixé sur plusieurs mètres d'épaisseur (teneur en Cs 137 et en Pb 210 constantes sur toute la carotte) (figure 2.12),

- qu'il y avait une excès de Pb 210 dû à un flux additionnel de Radon à travers le sédiment (déséquilibre radiochimique observé entre Pb 210 et Ra 226),

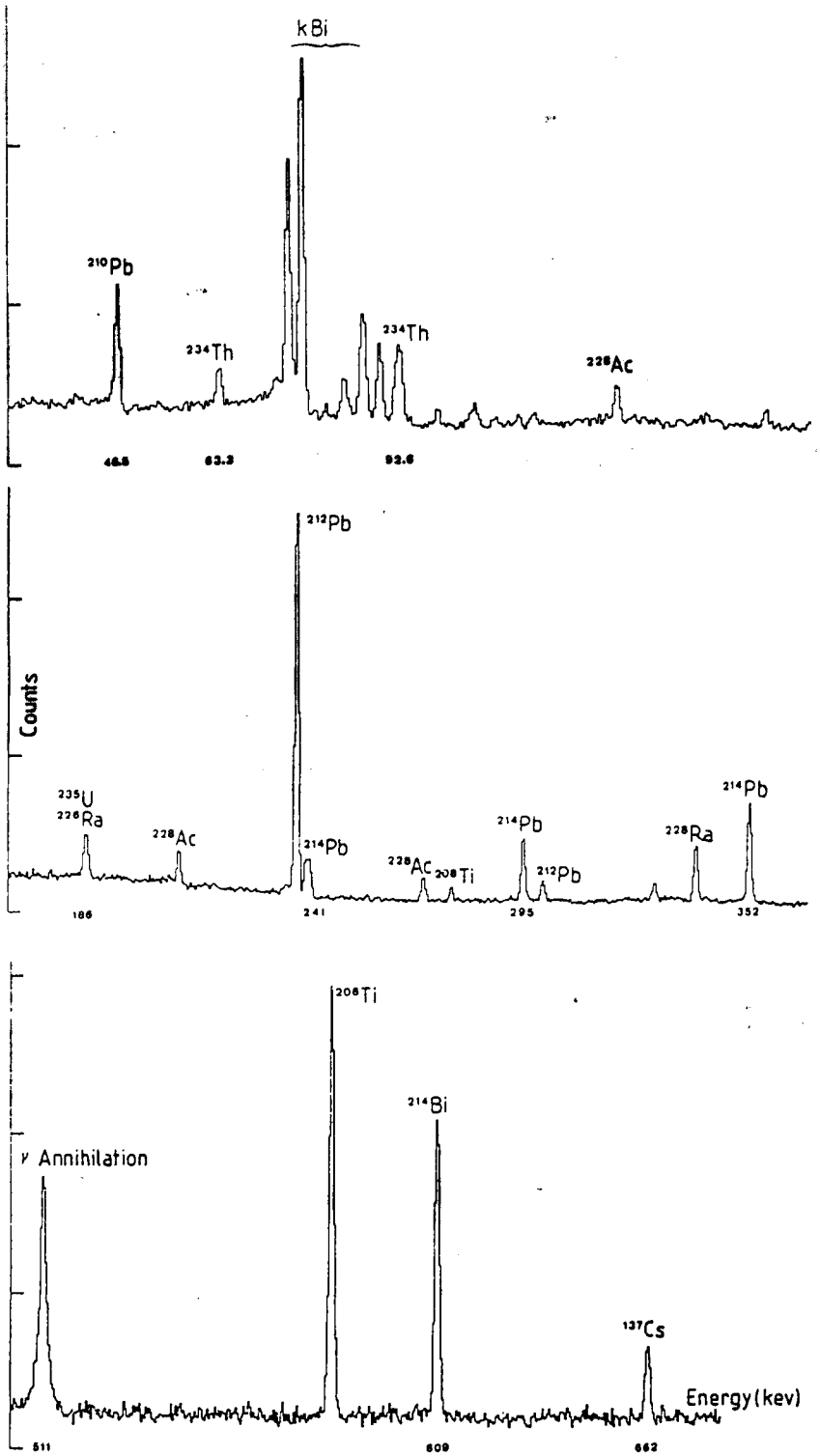


FIGURE 2.12
SPECTRE GAMMA D'UN ECHANTILLON DE SEDIMENT DE NYOS (128-130 cm). LA PRESENCE DE Cs 137 (662 kev) A CETTE PROFONDEUR INDIQUE QUE CES SEDIMENTS ONT ETE MIXES PAR LA CATASTROPHE DE 1986
(Piboule et al., in press)

- que cette émission de radon était antérieure d'au moins deux ans à l'accident (équilibre radiochimique entre Pb 210 et Po 210) et qu'elle pourrait être corrélée avec un flux local de CO_2 associé à l'évolution d'événements magmatiques profonds.

Ces données et ces conclusions sont importantes car elles montrent qu'il existerait des critères permettant de caractériser l'activité hydrothermale associée à un volcanisme actif et qu'il serait donc possible de déterminer les lacs potentiellement dangereux.

Cette possibilité d'une certaine prévision semblerait pouvoir s'appliquer au lac Bambuluwé où la mesure du Pb 210 sur une carotte prélevée dans ce lac montre une activité constante et anormalement forte sur les 15 premiers cm (370 Bq. kg^{-1}). Comme à Nyos, cette carotte de sédiments était saturée de gaz. La question importante qui se pose maintenant est la suivante : au lac Bambuluwé se met-il en place en ce moment un scénario identique à celui de Nyos, c'est-à-dire une augmentation du flux de Radon à travers les sédiments lacustres. Ce gaz serait-il précurseur, comme à Nyos, d'un brutal dégazage de CO_2 ?

III - COLLABORATIONS ET CONTRATS

Collaborations avec d'autres groupes de recherche :

Au plan national :

. Laboratoire Rene Bernas, Orsay (M. Maurette, L. Fehrenbach)
. Laboratoire de Microscopie Analytique appliquee aux Sciences de la Terre, Universite Paris Val de Marne à Creteil (R. Lefevre et A. Gaudichet)
. Centre des Faibles Radioactivites (P. Buat-Menard, H. Cachier, F. Le Guern)
. Centre National de Recherches Météorologiques (P. Pettre)
. Institut Dolomieu (M. Piboule)
. Institut des Sciences Nucléaires, Grenoble (R. Bouchez)
. Laboratoire de Palynologie, ORSTOM, Montpellier
. Laboratoire de Spectrométrie Physique, Grenoble (M.A. Mélières)
. CEN Saclay (R. Rocchia)

Au plan international :

. Isotopic Geophysics Laboratory (C. Hammer) Copenhague
. IANIGLA - Instituto Antarctico (A. Aristarain)

. California Intitute of Technology, Division of Geological and Planetary Sciences (Dr. Patterson)
. Dr.V.G. Koloshnikov, and M.A. Bolshov Institute of Spectroscopy, USSR Academie des Sciences, Moscou, URSS : coopération officielle dans le cadre de sous-groupe sectoriel Franco-soviétique en Instrumentation Scientifique)
. British Antarctic Survey, Cambridge, England (Drs E. Wolff, D. Peel et Alan Dick)
. Dr. Dong Soo Lu, Marine Chemistry Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, Panwol, Corée
. INRS Eau, Quebec (Pr Jones)
. NILU, Oslo (A. Semb, B. Ottar)
. Institut of Geology, Academy of Sciences, Estonie (J.M. Punning)
. Centre Géographique National du Cameroun (A. Zogning)
. Institut for Geophysics, Oslo (I. Isaksen)
. Institut fur Bioklimatologie, Gottingen (G. Gravenhorst)
. Université de Seattle, USA (R. Charlson)
. Université de Melbourne (N. Young)
. Université du New Hampshire (J. Palais, P. Mayewski)

Contrats

. CCE Environnement
. ATP Volcanisme Pollution de Fond PIREN
. PIRSEV
. Ministère de l'Environnement
. Ministère des Relations Exterieures
. PNEDC

IV - LISTE DES PUBLICATIONS

IV.1 - REVUES A LECTEUR

Boutron C., 1986 :
Atmospheric toxic metals and metalloids in the snow and ice layers deposited in Greenland and Antarctica from prehistoric times to present, In "Topic Metals in the Air", *Advances in Environmental Science and Technology Series*, Davidson C.I. and Nriagu J.O. Eds, John Wiley and Sons, 1111-1115.

Boutron C.F. and C.C. Patterson, 1986 :
Lead concentration changes in Antarctic ice during the Wisconsin/ Holocene transition, *Nature, 323*, 222-225.

Legrand, M. and R.J. Delmas, 1986 :
Relative Contributions of tropospheric and stratospheric nitrate sources to nitrate antarctic snow. *Tellus, 38 B*, 236-249.

Delmas R.J. , 1986 :
Past and present chemistry of North and South polar snow in *"Arctic Air Pollution"*, Cambridge University Press, 175-186.

Pourchet M. and Pinglot J.F., 1986 :
The northerly extend of Chernobyl contamination, *Nature, 323* 676.

Punnig M., Martma T.A., Tyugu K.E., Vaikmaye R.A., Pourchet M. and Pinglot J.F., 1986 :
Stratification in an ice core from Vestfonna, Nordanstlandet, *Polar Geography and Geology, 10,;* 39-43.

Legrand M., 1987 :
Chemistry of Antarctic snow, VIIe Conférence sur la Physique et la Chimie de la Glace, Grenoble, 1-5 sept. 1986, *Journal de Physique, 48* 77-86.

De Angelis, M , N.I. Barkov and V.N. Petrov, 1987 :
Record concentrations over the Last Climatic Cycle (160 kyr) from an Antarctic ice core, *Nature, 325* 318-321.

Boutron C.F., C.C. Patterson, V.N. Petrov and N.I. Barkov, 1987 :
Preliminary data on changes of lead concentrations in Antarctic ice from 155 000 to 26 000 years BP, *Atmospheric Environment, 21*,5, 1197 -1202.

Legrand M., Petit J.R. and Korotkevich Y.S., 1987 :
DC conductivity in Antarctic ice in relation to its chemistry, *J. de Physique, 48*, 605-611.

Boutron C.F., C.C. Patterson, 1987 :
Relative levels of natural and anthropogenic lead in recent Antarctic snow, *J. of Geophys. Res., 92*, D7, 8454-8464.

Legrand M. and Delmas R.J., 1987 :
Experimental protocol for the chemical analysis of snow, firn and ice cores. Proceedings of the NATO ASI, Les Arcs (July 1986), ed. H.G. Jones and W.J. Orville-Thomas, *Physics, Chemistry, Hydrology*, 225-254.

Legrand M. and Delmas R.J., 1987 :
Environmental changes during last deglaciation inferred from chemical analysis of the Dome C ice core, *Abrupt climatic change : evidence and implications*, W.H. Berger and L.D. Labeyrie eds., 247-259.

Legrand M. and Delmas R.J., 1987 :
A 220-yr continuous record of volcanic H_2SO_4 in the antarctic ice sheet, *Nature, 327*, 671-676.

Saigne C. and Legrand, M., 1987 :
Measurement of methanesulphonic acids in Antarctic ice, *Nature, 330*, 240-242.

Saigne, C., Kircher, S. and Legrand, M., 1987 :
Ion chromatographic measurements of ammonium, fluoride, acetate, formate and methanesulphonate at very low levels in Antarctic ice, *Analytica Chemica Acta, 203,* 11-21.

Melières M.A., Pourchet M., Pinglot J.F., Bouchez R. and Piboule P., 1988 :
Chernobyl ^{134}Cs, ^{137}Cs and ^{210}Pb in high mountain lake sediments : measurements and modelling of mixing process, *J. of Geophys. Res. 93,* 7055-7061.

Pourchet M., Pinglot J.F., Reynaud L. and Holdsworth G., 1988 :
Identification of Chernobyl fall-out as a new reference level in Northern Hemisphere glaciers, *J. of Glaciology, 34* 117, 183-187.

Pourchet M., Pinglot J.F., Maley J. and Mélières M.A., 1988 :
Another gas burst in a Cameroon lake ? *Nature, 334,* 655.

Kirchner S. and Delmas R.J., 1988 :
A 1000 yr glaciochemical Study at the South Pole, *Annals of Glaciology 10,* 80-84.

Legrand M. and Delmas R.J., 1988 :
Soluble impurities in four Antarctic ice cores over the last 30 000 years, *Annals of Glaciology, 10,* 116-120.

Legrand M., Lorius C., Barkov N.I., Petrov V.N., 1988 :
Vostok (Antarctica) ice core : Atmospheric chemistry changes over the last climatic cycle (160,000 yr), *Atmospheric Environment, 22,* 2, 317-331.

Legrand M. and Saigne C., 1988 :
Formate, acetate and methanesulphonate measurements in Antarctic ice : some geochemical implications, *Atmospheric Environment, 22,* 1011-1017.

Legrand M. and Delmas R.J., 1988 :
Formation of HCl in the Antarctic atmosphere, *J. of Geophys. Res., 93,* 7153-7168.

Legrand M. and Kirchner S., 1988 :
Polar atmospheric circulation and chemistry of recent (1957-1983) South Polar precipitation, *Geophys. Res. Lett., 15,* 879-882.

Legrand M., Delmas R. and Charlson R.J., 1988 :
Climate forcing implications from Vostok ice core sulphate data, *Nature, 334,* 418-420.

Boutron, C.C. Patterson, C. Lorius, V.N. Petrov and N.I. Barkov, 1988.
Atmospheric lead in Antarctic ice during the last climatic cycle, *Annals of Glaciology, 10,* 5-9.

Ronseaux F. and Delmas R.J., 1988 :
Chemical composition of bulk atmospheric deposition to snow at Col de la Brenva (Mt Blanc area) in *Nato "Acid deposition processes at high elevation sites",252,* 491-510.

Delmas V., Ronseaux F. and Delmas R.J., 1988 :
Chemical composition of the seasonal snow cover at the Southern French in *Nato "Acid deposition processes at high elevation sites", 252,* 511-516.

Boutron C., 1988 :
Comment on the paper "The Cometary breakup hypothesis re-examined" by P. A. Laviolette (Mont. Not. R. Astr. Soc. 224, 945-951, 1987), *Montly Notices Royal Astronomical Sty, 233,* 215-220.

Legrand M., Stordal F., Isaksen I.S.A., and Rognerud B. 1988 :
A model study of the stratospheric budget of odd nitrogen including effects of solar cycle variations, Tellus, in press.

Legrand, M. and R.J. Delmas, 1988 :
Reply to C.M. Laird, E.J. Zeller and G.A.M. Dreschhoff, *Tellus, 40,* 237-240.

Delmas R.J. and Legrand M., 1988 :
Long term changes in the concentrations of major chemical coumpounds (soluble and insoluble) along deep ice core, Dahlem Konferenzen, March 1988, *The Environmental record in glaciers and ice sheets,* 319-341.

Boutron C., 1988 :
Atmospheric lead, cadmium, mercury and arsenic in Antarctic and Greenland recent snow and ancient ice, *SCOPE - Heavy Metal Cycling* (Hutchinson T.C. and Subramanian V., eds), SCOPE Report 31, John Wiley and sons.

Apatin V.M., Arkhangelskii B.V., Bolshov M.A., Ermolov V.V., Koloshnikov V.G., Kompanetz O.N., Kuznetsov N.I., Mikhailov E.V., Shishkovskii V.S. and Boutron C., 1989 :
Automated laser exited atomic fluorescence spectrometer for determination of trace concentrations of elements in liquid and solid samples, *Spectrochimica Acta, B* (in press)

Pourchet M., Pinglot J.F., Maley J., Melières M.A. and Zogning A., 1989 :
Lake Bambulowe (Cameroon) : building-up the same scenario as lake Nyos *J. of Volc. and Geoth. Res.* (in press).

Piboule M., Pourchet M., Bouchez R., Amossé J., Brénac P., Maley J., Pinglot J.F. and Vincent C., 1989 :
Radiometric studies of Lake Nyos sediments : evidence of strong mixing and excess ^{210}Pb, *J. of Volc. and Geoth. Res.* (in press).

IV.2 - COLLOQUES : COMPTES-RENDUS, COMMUNICATIONS

Delmas R.J. , 1986 :
Antarctic precipitation chemistry, Chemistry of multiphase atmospheric systems, *Proceedings of the NATO Advanced Study Institute, Corfou, 1983, Chemistry of Multiphase Atmospheric Systems,* W. Jaeschke, Ed. Springer Verlag, 249-266.

Maurette M., Hammer C., Pourchet M. and Brownlee D.E., 1988 :
The Blue Lake II expedition of July-August 1987 in Greenland and the search for mm-size unmelted extraterrestrial particules, 19e Lunar and Planetary Sc. Conference, Houston.

De Angelis M., Maurette M. and Pourchet M., 1988 :
Assessment of biases in collection of Greenland micrometeorites ; the Blue Ice I project of January 1988 in Antarctica, 19e Lunar and Planetary Sc. Conference, Houston.

IV.3 - AUTRES PUBLICATIONS

Boutron C., 1986 :
Comments on "Specific activity of Pb 210 and historical changes of lead levels by Jaworowski Z., *Atmospheric Environment, 20,* 228-229.

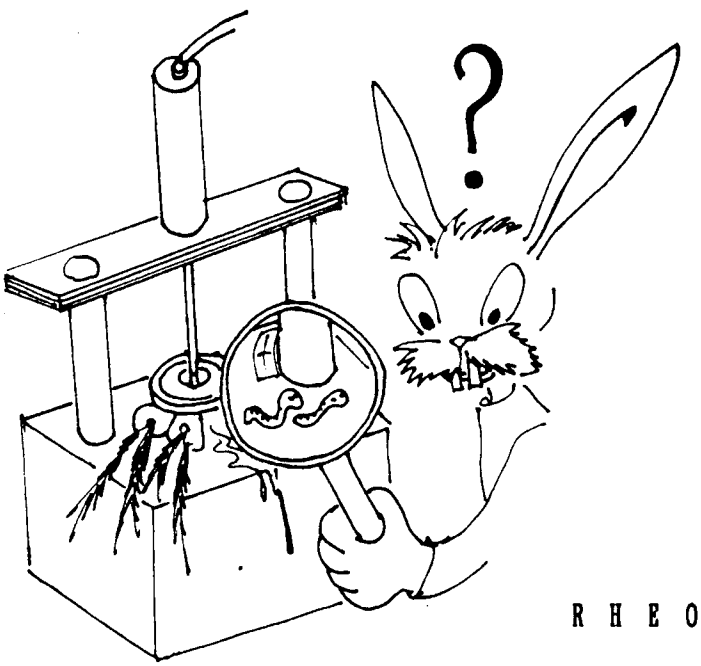
Batifol F., 1987 :
Etude des métaux contenus dans les précipitations déposées en Antarctique : contribution à la connaissance des cycles géochimiques du Cd, Cu, Pb et Zn. Nouvelle Thèse, USTMG .

Kirchner S., 1988 :
Chimie de la neige (Na, Cl, NO_3^-, and SO_4^{--}) à la Station Pôle Sud sur le dernier millénaire, Thèse de d'Université de Paris VII.

Boutron C., 1988 :
Le Plomb dans l'atmosphère, *La Recherche, 198,* 446-453.

++++
++

CHAPITRE III



RHEOLOGIE ET MODE DE DEFORMATION DES GLACES POLYCRISTALLINES

I - OBJECTIF GENERAL A MOYEN ET LONG TERME

Les caractéristiques essentielles de la glace sont sa très grande ductilité aux faibles vitesses de déformation et sa fragilité aux vitesses élevées. La transition entre ces comportements se déplace avec la température, la structure cristalline et le degré de confinement.

S'agissant de l'écoulement des calottes polaires, c'est essentiellement le comportement de glaces anisotropes à des vitesses de déformation inférieures à 10^{-10} s^{-1} qui doit être analysé.

Les conditions rendent très délicates les études en laboratoire. Mais celles-ci, complétées par diverses mesures in situ (inclinométrie, densification de la glace), nous permettent d'affirmer que la connaissance du comportement mécanique de ces glaces n'est plus un obstacle majeur à la modélisation de l'écoulement des calottes polaires. Les carottages profonds réalisés en Antarctique et au Groenland sont essentiels pour parfaire ces études.

L'implication de ces recherches dépasse largement la glaciologie. A titre d'exemple, la prépondérance d'un fluage-dislocation newtonien sur le fluage diffusionnel sur des glaces à grains fins pose un problème important sur le rôle des joints de grains dans les processus de déformation.

Pour ce qui concerne la modélisation des interactions glace-structure, la priorité est accordée à l'étude de l'endommagement de la glace en compression, avec pour objectif l'établissement d'un modèle d'endommagement permettant de décrire la formation de glace broyée. Cette étape est indispensable avant de modéliser la pénétration d'un indenteur dans un massif de glace. Des mesures in situ en Terre Adélie et sur des plateformes de forage en Arctique sont envisagées pour analyser les facteurs d'échelle et les processus physiques mis en jeu (écrasement de la glace et son extrusion) dans les interactions glace-structure.

II - RESULTATS MAJEURS OBTENUS DEPUIS LE DERNIER RAPPORT

II.1 - RHEOLOGIE DES GLACES POLAIRES

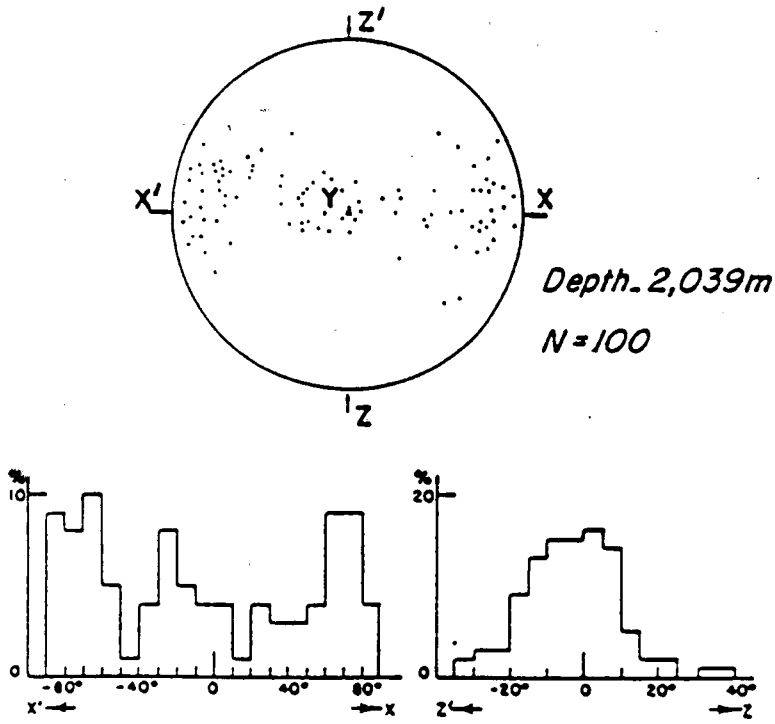
II.1.1 - Texture des glaces de Vostok

(P. Duval, V. Lipenkov, P. Pimienta)

Il est maintenant bien admis que le glissement intracristallin est le principal mode de déformation des glaces polaires. Aussi était-il très prometteur d'analyser la texture des glaces de la carotte de Vostok en vue de déterminer le type d'écoulement de la glace dans ce secteur de l'Antarctique de l'Est. En ce site le cisaillement horizontal contribue très peu à la déformation de la glace jusqu'à 2000 m de profondeur (la vitesse de déformation selon la direction verticale, déduite de la vitesse d'accumulation, est de l'ordre de 7×10^{-6} a^{-1} alors que l'âge de la glace à 2083 m dépasse 130 000 ans).

Les principaux résultats significatifs quant au comportement mécanique des glaces polaires sont :

. l'énergie de surface des grains est la force motrice du grossissement des grains jusqu'à 2083 m. Ceci est compatible avec les faibles vitesses de déformation,



les axes c se concentrent très rapidement autour d'un plan vertical tandis que les cristaux s'allongent le long de la normale à ce plan (Figure 3.1). L'orientation des grains résulte de leur rotation par la déformation intracristalline provoquée par une traction selon la direction d'écoulement (Figure 3.2),

FIGURE 3.1
ORIENTATION DES AXES C DES GLACES DE VOSTOK
A PARTIR DE 500 M DES AXES C SE REGROUPENT AUTOUR DU PLAN VERTICAL XY. CETTE FABRIQUE SE RENFORCE PROGRESSIVEMENT JUSQU'A 2039 M.

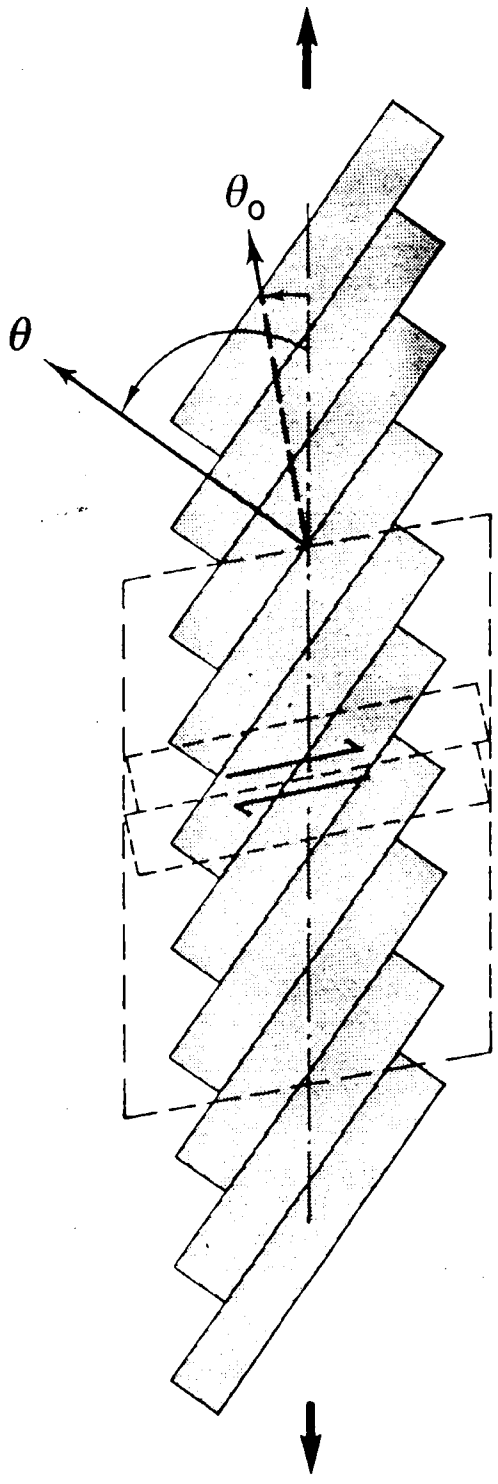


FIGURE 3.2
ROTATION DES PLANS DE GLISSEMENT SOUS L'EFFET D'UNE TRACTION SIMPLE

. une relation entre l'orientation des cristaux et la déformation a été établie, qui permet de déterminer l'évolution des paramètres rhéologiques avec la déformation.
L'amincissement des couches annuelles devient de plus en plus difficile au fur et à mesure que la glace s'enfonce. Ce durcissement, d'autant plus important que la déformation est grande, a pour effet d'atténuer toute variation de la viscosité. Ceci explique probablement l'absence de variations de la viscosité avec la teneur en impuretés, celle-ci étant toujours très élevée durant les périodes glaciaires.

Concernant la dynamique de la calotte glaciaire près de la station de Vostok, cette étude relative à l'orientation des cristaux implique un écoulement convergent. Les modèles d'écoulement devront être adaptés à ce type d'écoulement.

II.1.2 - Densification des glaces polaires
(P. Pimienta et P. Duval)

La transformation du névé en glace correspondant au passage d'un matériau à pores ouverts à celui à pores fermés est bien caractérisée pour les glaces polaires. Les mesures de densité et de la teneur en gaz permettent de connaître précisément les conditions au close-off (densité et pression de la glace). Disposant de ces données et d'un profil de densité bien au-delà du close-off à la station de Byrd (Antarctique) un modèle de pores sphériques a été adapté à la densification de la glace. Les résultats ont permis de simuler l'évolution de la pression effective $sP_c = P_i - P_b$ (P_i pression dans la glace et P_b pression dans les bulles) avec la profondeur. Au-delà du close-off les points expérimentaux s'ajustent bien avec la courbe calculée d'après une loi de fluage Newtonien (Figure 3.3). Cette approche confirme le comportement Newtonien des glaces polaires à grains fins déjà discuté antérieurement.

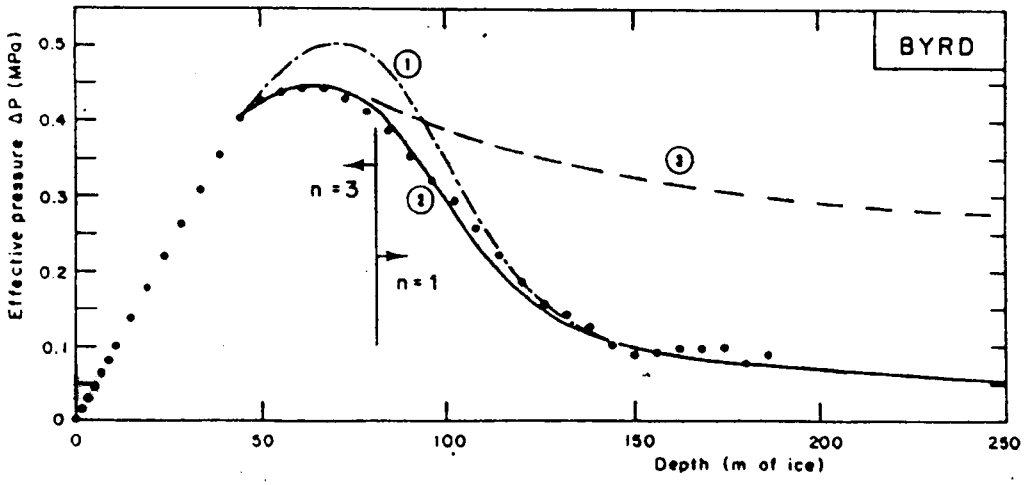


FIGURE 3.3
VARIATION DE LA PRESSION EFFECTIVE AVEC LA PROFONDEUR.
LES COURBES 1 et 3 ONT ETE OBTENUES POUR DES VALEURS DE L'EXPOSANT n DE LA LOI DE DEFORMATION EGALES A 3 ET 1. LA COURBE 2 A ETE OBTENUE EN PRENANT SUCCESSIVEMENT n = 3 ET n = 1 ; ELLE SE SUPERPOSE BIEN AVEC LES POINTS EXPERIMENTAUX.

II.2 - ENDOMMAGEMENT DE LA GLACE EN COMPRESSION

Cette étude s'intègre dans le programme développé depuis 1986 sur les interactions glace-structure. Elle se développe en collaboration avec l'Université Memorial et l'Institut de Dynamique Marine (NRC) de St John's (Canada) (stage de J. Meyssonnier en septembre 87-juin 88, stage de 2 ans de P. Kalifa comme attaché de recherche du NRC à l'IMD depuis décembre 88). La collaboration avec l'Institut Français du Pétrole va se concrétiser dès 1989.

II.2.1 - Nucleation et croissance des fissures en compression
(P. Kalifa, P. Duval)

Modéliser l'endommagement de la glace en compression implique une expérimentation largement basée sur des essais mécaniques triaxiaux. Les résultats ne concernent que la transition ductile-fragile correspondant à des vitesses comprises entre 10^{-5} et 10^{-3} s^{-1} et une pression de confinement inférieure à 10 MPa.

Les résultats relatifs aux conditions mécaniques de l'initiation des fissures (déformations et contraintes critiques) montrent que :

. la déformation et la contrainte critique augmentent avec la pression de confinement (Figure 3.3),

. les fissures ont une taille inférieure mais comparable à celle des grains et se forment préférentiellement suivant la direction de compression maximum,

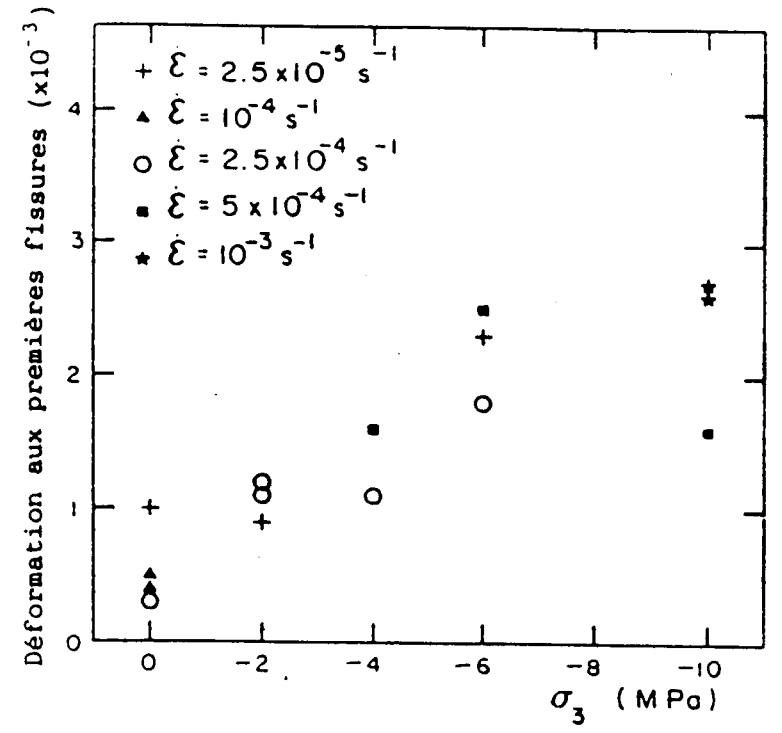
. la proportion de fissures intergranulaires augmente avec la vitesse de déformation.

Il est clair que, malgré le confinement, les fissures s'ouvrent en mode I. Leur modèle de nucléation des fissures rend compte des résultats obtenus tant que la fissure n'atteint pas des dimensions comparables à celles des grains. Les résultats indiquent que la contrainte critique d'initiation des fissures en traction est plus faible qu'en compression et que l'élasticité retardée joue un rôle prépondérant dans la concentration des contraintes.

Ces résultats ont fait l'objet d'une communication au Congrès de Mécanique Théorique et Expérimentale de Grenoble (août 1988) et seront publiés dans les Proc. of the International Offshore Mechanical and Arctic Engineering Symposium (article sous presse).

II.2.2 - Endommagement de la glace au pic de contrainte
(P. Kalifa, P. Duval)

La rupture fragile des céramiques implique souvent la présence de fissures branchées stables ; c'est leur interaction qui conduit à la rupture. Pour vérifier la présence éventuelle de telles fissures dans la glace, des essais de torsion-compression ont été réalisés. Malgré



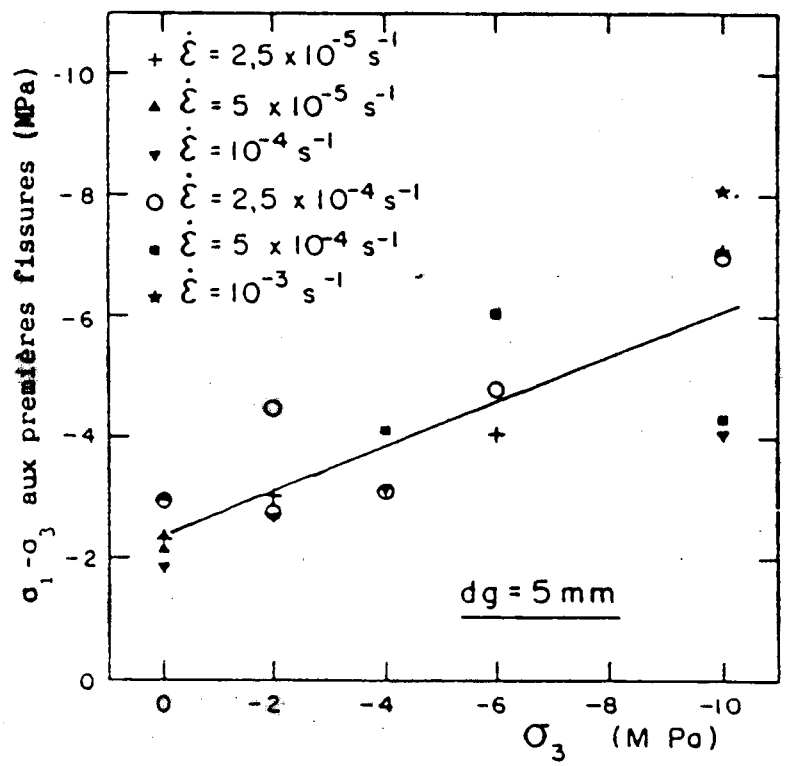


FIGURE 3.4
LA DEFORMATION ET LA CONTRAINTE AUX PREMIERES FISSURES AUGMENTENT SENSIBLEMENT AVEC LA PRESSION DE CONFINEMENT.

des conditions favorables à la formation d'ailes, aucune fissure branchée n'a pu être observée. Il semble donc que les contraintes critiques pour la formation d'ailes sont au moins deux fois plus élevées que celles requises pour l'initiation des fissures "mères". En définitive, un peu trop souvent pour la glace, le pic de contrainte se caractérise par une densité critique de fissures plus ou moins axiales. Il apparaît probable que cette densité critique permette l'interaction des champs de contrainte locaux et conduise à l'instabilité. L'étape suivante consistera en l'établissement ou en l'adaptation à la glace d'un modèle d'endommagement (cf. II.2.2).

II.2.3 - Modélisation de la compression uniaxiale jusqu'au pic de contrainte

(J. Meyssonnier)

La modélisation de l'essai de compression est un point de passage obligé vers celle du comportement sous sollicitations multiaxiales. Le travail décrit ici a été effectué en collaboration avec I.Jordaan et R. Mc Kenna (Memorial University of Newfoundland, Canada), dans le cadre du Programme de Coopération France-Canada.

En l'absence de résultats expérimentaux appropriés, le modèle d'endommagement proposé a été basé sur ceux disponibles dans la littérature et dont la dispersion ne permet que de dégager des lignes directrices :

- le pic de contrainte est fonction décroissante de la taille des grains lorsqu'on approche le domaine fragile ($\dot{\varepsilon} \sim 10^{-4}$ s^{-1}) et de la température et fonction croissante de la vitesse de déformation jusqu'à des valeurs de l'ordre de 10^{-3} s^{-1} ; il semble ensuite se stabiliser,
- la déformation au pic est fonction décroissante de la taille de grain et de la vitesse de déformation,

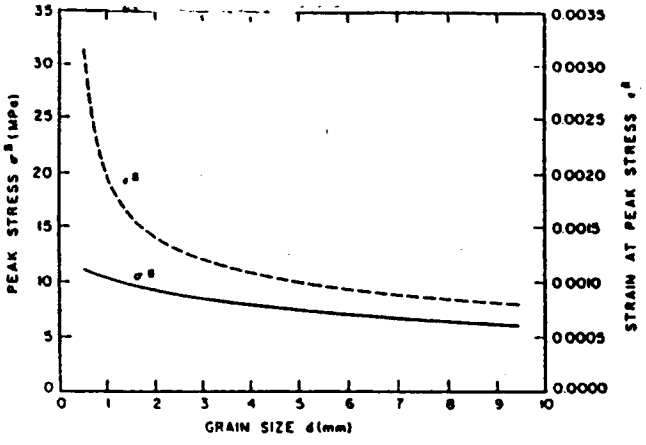


FIGURE 3.5
VARIATIONS DE LA CONTRAINTE ET DE LA DEFORMATION AU PIC AVEC LA TAILLE DES GRAINS DONNEES PAR LE MODELE D'ENDOMMAGEMENT.
($\dot{\varepsilon} = 10^{-3}$ s^{-1} ; T = - 10°C)

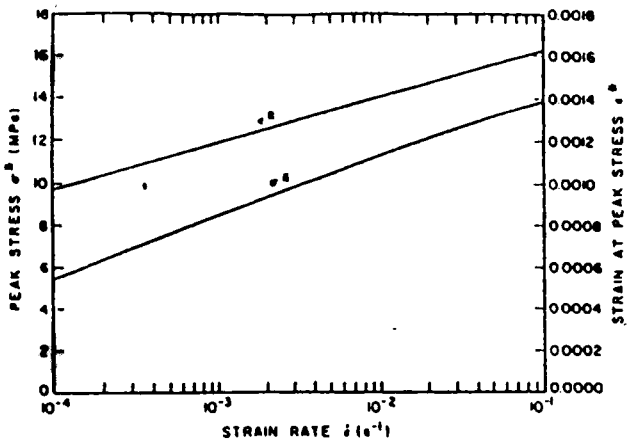


FIGURE 3.6
VARIATIONS DE LA CONTRAINTE ET DE LA DEFORMATION AU PIC AVEC LA VITESSE DE DEFORMATION DONNEES PAR LE MODELE D'ENDOMMAGEMENT
(T= -10°C ; d = 3 mm);

. la micro-fissuration de la glace est caractérisée par la nucléation de fissures qui se propagent (quasi) instantanément jusqu'à atteindre la taille du grain : une augmentation de la contrainte n'entraîne pas de propagation des micro-fissures déjà formées mais provoque l'apparition de nouvelles micro-fissures,

. les micro-fissures sont alignées dans la direction de compression.

En supposant que les micro-fissures sont toutes identiques, réparties de façon homogène, et qu'une section par un plan perpendiculaire à l'axe de compression ne montre pas d'orientation privilégiée des micro-fissures, l'influence de l'endommagement (en compression) peut être représentée à l'aide d'une variable scalaire D. Sous certaines hypothèses, cette variable D peut être reliée à la densité de fissures.

En l'absence de tout résultat expérimental, le modèle d'évolution de l'endommagement a été tiré de la littérature concernant l'impact sur matériaux métalliques. Il suppose une croissance exponentielle de la vitesse N "d'apparition" des fissures en fonction de la contrainte effective.

Ce modèle a été utilisé pour décrire le comportement d'une glace supposée parfaitement élastique, puis en introduisant le fluage et l'élasticité différée. L'influence de la taille des grains et de la vitesse de déformation est relativement bien décrite pour des vitesses de déformation allant jusqu'à 10^{-3} s^{-1}.

Ce travail fait l'objet d'une communication au congrès "Offshore Mechanics and Arctic Engineering-OMAE89", La Haye, mars 89.

II.2.4 - Vitesse de fluage de la glace endommagée en compression uniaxiale

(J. Meyssonnier, J.Y. Buffiere)

Une étude préliminaire a permis d'estimer l'effet d'un endommagement réalisé en compression uniaxiale sur la vitesse de fluage en compression.

Les tests de fluage à charge constante ont été réalisés pour des contraintes n'excédant pas la moitié de la contrainte enregistrée avant la décharge effectuée à la fin de la phase d'endommagement (elle même réalisée à vitesse de déformation imposée).

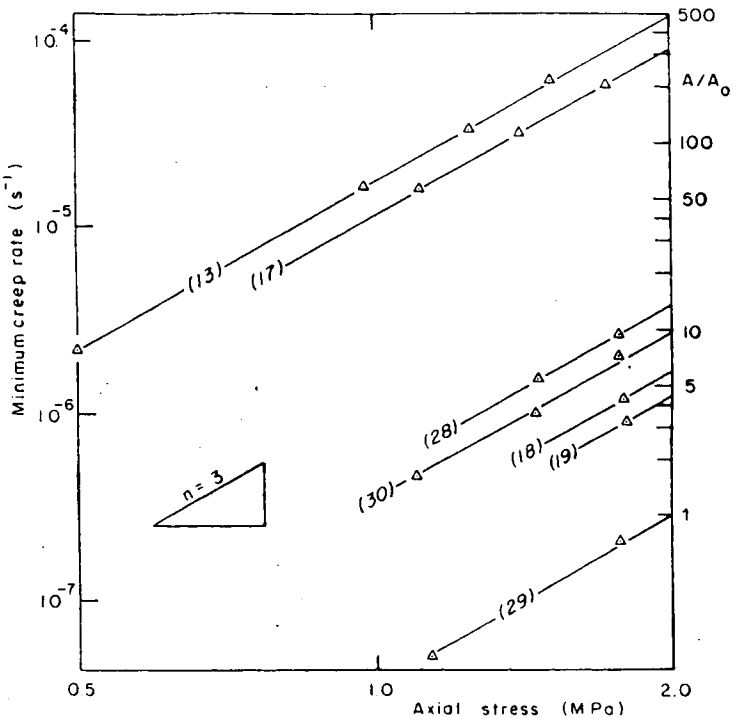


FIGURE 3.7
VITESSES DE FLUAGE DE LA GLACE ENDOMMAGEE EN COMPRESSION UNIAXIALE.

L'endommagement était caractérisé par la variation relative du module d'Young (selon l'axe de compression).

La vitesse de fluage paraît peu affectée par la présence des micro-fissures avant le pic de contrainte. Ensuite elle paraît être sensiblement plus élevée que ce que prédisent les modèles qui consistent à remplacer la contrainte σ par la contrainte effective σ (1-D) dans l'expression de la loi de fluage ou du potentiel de dissipation associé. L'exposant de la loi de Glen reste égal à 3 dans tous les tests effectués.

Ces résultats ne peuvent être affirmés avec certitude car encore trop peu nombreux. Ils devraient faire l'objet d'une communication au congrès "Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions-POAC89", Lulea, Suède, juin 89 (article soumis).

II.3 - COMPORTEMENT DES SOLS AU DEGEL

(P. Le Tirant et R. Montargis, Institut Français du Pétrole, P. Duval et M. Szymonski, LGGE)

Le développement des activités d'exploration et d'exploitation des hydrocarbures en mers arctiques soulève de nombreux problèmes de géotechnique. Si la stabilité des ouvrages sur un fond marin gelé peut être assurée, tel n'est pas le cas lorsque le sol dégèle par suite d'un réchauffement induit par les opérations de forage. Le but de l'étude réalisée pour l'IFP était de définir des procédures de préparation de gel-dégel d'échantillons de sol (silt sableux et argileux)

et de caractériser le comportement mécanique des sols au dégel.

Après plusieurs cycles gel-dégel la teneur en eau des échantillons a dépassé 140 % alors qu'elle était inférieure à 40 % avant gel. Il est à noter que la teneur en glace du permafrost dépasse souvent ces valeurs. La formation de lentilles de glace horizontales est clairement mise en évidence sur des lames minces observées en lumière polarisée.

Le tassement au dégel est directement relié à la masse volumique du sol gelé, c'est-à-dire à l'épaisseur cumulée des lentilles de glace. En outre l'alternance gel-dégel dégrade fortement les caractéristiques mécaniques des sols. Malgré un tassement important le sol ne recouvre pas ses propriétés initiales. Ces résultats sont en cours d'exploitation à l'IFP. Cette étude a présenté un double intérêt pour le LGGE. Elle a d'une part permis d'établir avec l'IFP une collaboration sur la mécanique des glaces qui va s'intensifier surtout en ce qui concerne la modélisation des interactions glace-structure. D'autre part les caractéristiques mécaniques des sols avant et après le dégel sont d'une grande importance pour la glaciologie (étude du permafrost, glissement des glaciers sur un lit déformable).

III - CONTRATS ET COLLABORATIONS

- Contrat IFP/LGGE 1987 (Sols gelés)

- Contrat PNEDC 1987-88

- La collaboration avec l'Université de St John's MUN et l'Institut de Dynamique Marine (IMD) s'est établie dans le cadre de la coopération France-Canada sur l'Ingénierie Arctique. Le séjour de J. Meyssonnier (1er septembre 87-juin 88) à St John's (MUN) a été très profitable au développement de nos recherches sur la modélisation de l'endommagement de la glace. Concernant l'étude de l'endommagement en compression, un programme tout à fait complémentaire à celui du LGGE se développe à l'IMD (Dr. S. Jones, Directeur scientifique NRC). P. Kalifa a obtenu un poste d'attaché de recherche du CNRC pour une période de 2 ans.

- En France, la collaboration avec l'Institut Français du Pétrole, amorcée avec l'étude du comportement des sols au dégel, va s'intensifier sur la modélisation de l'endommagement de la glace (C. Putot).

- Une grande partie du travail réalisé sur la rhéologie des glaces polaires a bénéficié de la collaboration avec l'Arctic and Antarctic Research Institute de Léningrad et plus spécialement avec V. Lipenkov sur la texture des glaces de Vostok.

IV - PUBLICATIONS

IV.1 - REVUES A LECTEUR

Pimienta P. and Duval P., 1987 :
Rate controlling processes in the creep of polycrystalline ice, *Journal de Physique*, C1, 243-248.

Petit, J.R., Duval P. and Lorius C., 1987 :
Long term climatic changes indicated by crystal growth in polar ice *Nature*, 326, 62-64.

Hallam, S.D., Duval P. and Ashby M.F., 1987 :
A study of cracks in polycrystalline ice under uniaxial compression, *Journal de Physique*, C1, 303-310.

Pimienta P., Duval P. and Lipenkov V., 1987 :
Mechanical behaviour of anisotropic polar ices, *IAHS Publication*, 170, 57-66.

Pimienta P., Duval P. and Lipenkov V., 1988 :
Mechanical behaviour of ice along the 2040 m Vostok core, Antarctica, *Annals of Glaciology, 10,* 137-140.

Petit J.R., Duval P. and Lorius C., 1988 :
Long-term climate changes from crystal growth, *Nature, 332,* (Scientific Correspondence), 592-593.

Kalifa P., Duval P. and Ricard M., 1989 :
Crack Nucleation of polycrystalline ice under compressive stress states. *Proc. of the Int. Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), The Hague.*

McKenna, R.F., Meyssonnier J., Jordaan I.J., 1989 :
Peak pressures from a damage model for ice in compression, Proc. of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 89), The Hague (sous presse).

IV.2 - COLLOQUES, COMMUNICATIONS

Pimienta P., 1987 :
Symposium on ice core analysis, University of Bern, Suisse, 30 mars-3 avril 1987;.

Duval P., 1987 :
Int. Symposium on the Physical basis of ice sheet modelling, Vancouver, Canada, 9-22 août 1987.

Duval P., 1988 :
Symposium on ice dynamics, University of Tasmania, Hobart, Australie, 14-20 february 1988.

Duval P., 1988 :
Workshop on laboratory studies of the flow of ice, Hobart, Australie, 15 février 1988.

Kalifa P., 1988 :
XVIIth Int. Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 21-27 août 1988, Grenoble.

IV.3 - AUTRES PUBLICATIONS

Duval P. et Szymonski, 1987 :
Etude du comportement des sols au dégel, Contrat IFP/LGGE;.

Pimienta P., 1987 :
Etude du comportement mécanique des glaces polycristallines aux faibles contraintes ; applications aux glaces des calottes polaires, Nouvelle Thèse, Université Joseph Fourier, 9 décembre 1987.

Kalifa P., 1988 :
Contribution à l'étude de la fissuration dans la glace polycristalline en compression, Nouvelle Thèse, Université Joseph Fourier, 4 novembre 1988.

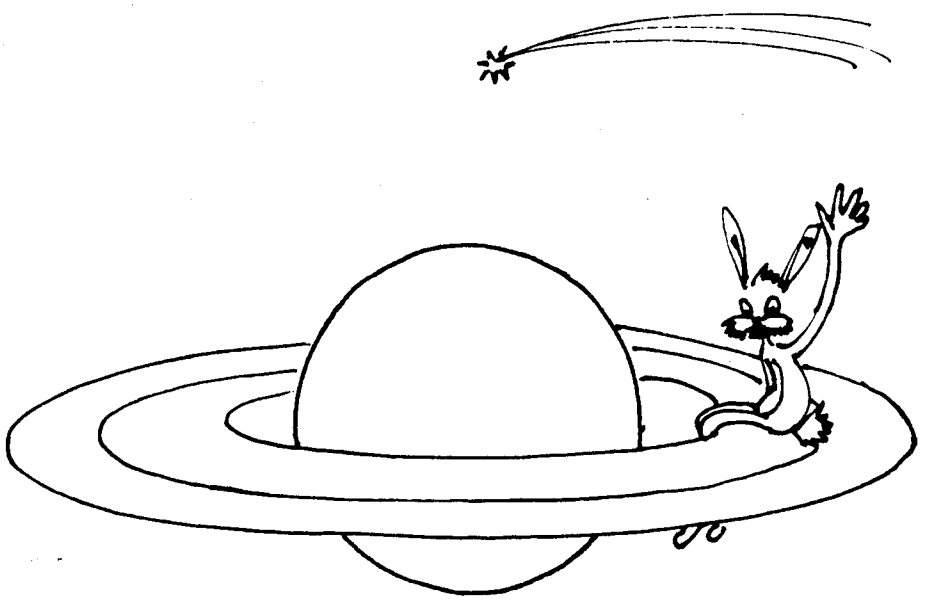
Duval P. and Pimienta P., 1988 :
Mechanical behaviour of polar ice, *SCAR Newsletter N° 3*, 17-19.

Buffiere J.Y., 1988 :
Etude de la fissuration dans la glace polycristalline en compression, rapport de stage de l'ENSEERG.

Lliboutry L., 1987 :
Very slow flows of solids, Martinus Nyhoff Publishers, 510 pp.

++++
++

CHAPITRE IV



GLACES EXTRATERRESTRES

I - OBJECTIF GENERAL MOYEN ET LONG TERME

L'étude des problèmes astrophysiques faisant intervenir les glaces constitue le programme de recherche de l'équipe de physique du laboratoire de Glaciologie depuis déjà plus de 7 ans. Ce programme, démarré à partir de l'étude de l'évolution thermique des noyaux cométaires, s'articule actuellement autour de deux sujets principaux :

1) La formation des **comètes** et leur évolution physico-chimique lors de leur pénétration dans le système solaire (ATP Planétologie).

2) Les mécanismes de formation et de destruction des manteaux de glace des **grains interstellaires** et leurs interactions avec la phase gazeuse (GdR Physico-chimie des Molécules Interstellaires).

L'étude des phénomènes intervenant dans ces deux domaines de l'astrophysique nécessite la connaissance de certaines propriétés physiques des glaces condensées à basse température. La molécule H_2O étant le constituant prépondérant de la phase volatile des comètes et des grains des nuages moléculaires, une étude préalable des propriétés de la glace H_2O et de ses interactions avec les gaz s'est avérée indispensable. Ces connaissances ont ensuite été appliquées à la simulation de phénomènes cométaires et interstellaires faisant intervenir des mélanges de glaces riches en H_2O.

II - RESULTATS MAJEURS OBTENUS DEPUIS LE DERNIER RAPPORT

Le rapport d'activité concerne la période 1986 à 1988, période pendant laquelle notre petite équipe était séparée géographiquement (séjour de B. Schmitt au Laboratoire du Professeur Greenberg à l'Université de Leiden de novembre 1986 à septembre 1988 - séjour de J. Klinger à l'Institut de Simulation Spatiale du DFVLR <Etablissement Aerospatial Allemand> à Cologne du 1er septembre 1987 au 30 septembre 1988).

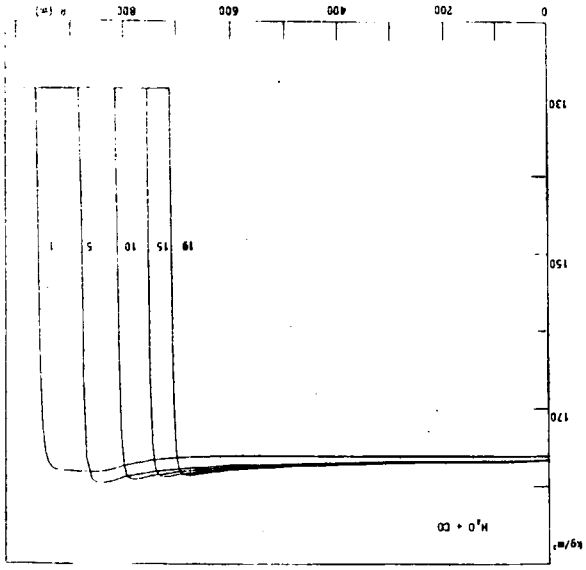


FIGURE 4.1
PROFILS DE DENSITE A
L'APHELIE - REVOLUTIONS
n°1, 5, 10, 15, 19

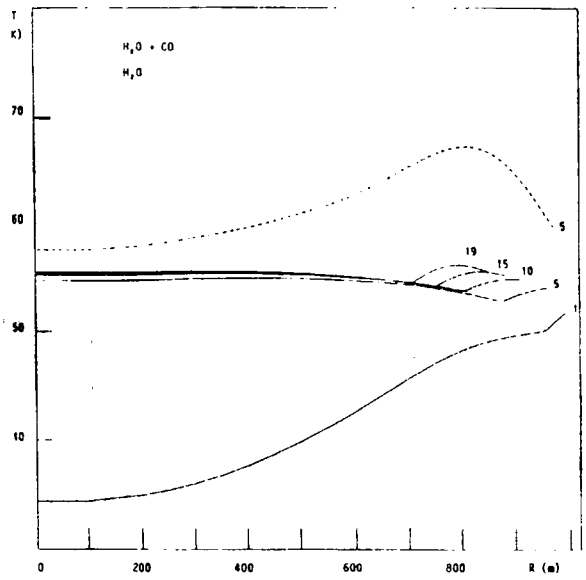


FIGURE 4.2
PROFILS DE TEMPERATURE A
L'APHELIE - REVOLUTIONS
n°1, 5, 10, 15, 19

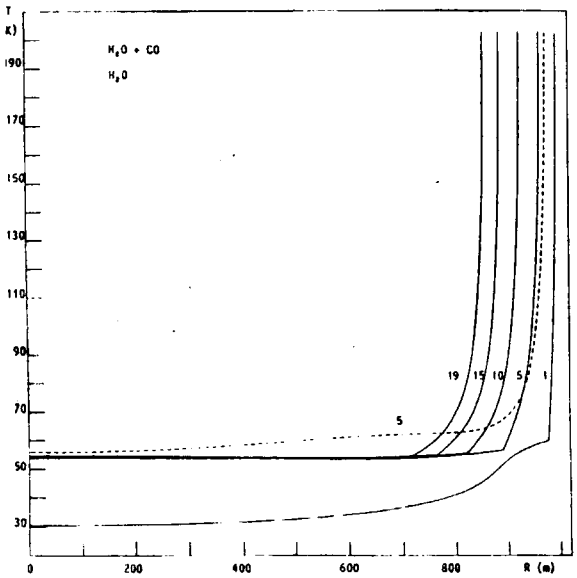


FIGURE 4.3
PROFILS DE TEMPERATURE
AU PERIHELIE
REVOLUTIONS n° 1, 5, 10, 15, 19

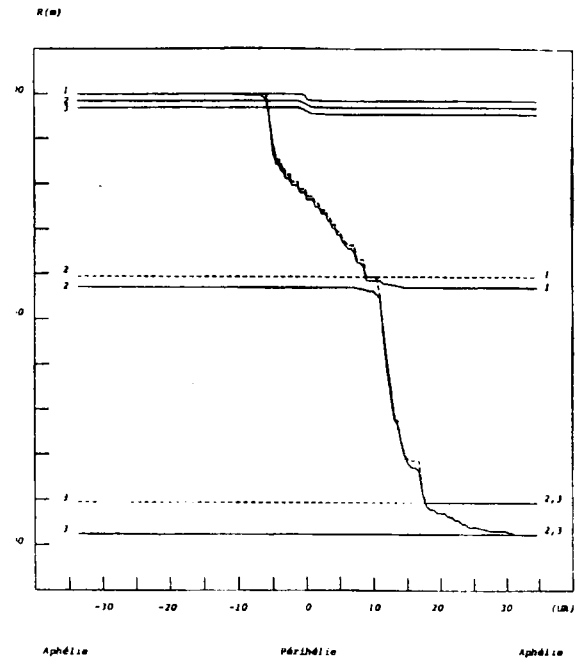


FIGURE 4.4
ABLATION DE LA SURFACE
ET PROGRESSION DE LA
CRISTALLISATION DE LA
GLACE AMORPHE PENDANT LES
REVOLUTIONS 1, 2, 3

Les trois membres de l'équipe ont néanmoins su garder un contact étroit pendant toute cette période, ce qui se traduit par une forte interaction entre les thèmes de recherche de l'équipe. En particulier le travail de thèse de S. Espinasse a pu progresser normalement. D'autre part, il est à signaler que pendant cette période est intervenue la soutenance de la thèse d'Etat de J. Ocampo, ancien membre de l'équipe.

II.1. - EVOLUTION DE LA MATIERE COMETAIRE

II.1.1 - Modélisation de l'évolution thermique et de la différenciation chimique

(S. Espinasse, J. Klinger, B. Schmitt)

Un des résultats majeurs de la récente campagne d'observation de la comète de Halley est la mesure de la densité moyenne du noyau. A l'aide des forces non-gravitationnelles qui s'exercent sur le noyau grâce à l'éjection de gaz et de poussière et du volume de ce noyau déterminé à partir des photos prises par la sonde Giotto, Rickman a trouvé une densité du noyau de l'ordre de 250 kg/m^3. Une densité aussi basse ainsi que la présence de molécules organiques favorisent le modèle de formation de comètes à partir de grains interstellaires proposé par J.M. Greenberg.

Un tel agglomérat de grains de poussières et de glaces doit avoir une porosité très grande permettant la diffusion d'une phase gazeuse à l'intérieur du noyau. Cette phase gazeuse contribue donc à l'échange thermique entre la surface et les couches profondes du noyau et sa diffusion s'accompagne d'une différenciation chimique et isotopique.

Ces éléments nous ont conduits à développer un modèle de noyau gazeux que nous avons appliqué à la comète de Halley pour laquelle nous disposons actuellement d'un maximum de données d'observation.

Plusieurs types de noyaux ont été étudiés :

. un noyau de H_2O pur
. un noyau composé de 70 % de H_2O et de 30 % de CO,
. un noyau de 80 % et de 20 % de CO_2
. un noyau comportant du CO et de la glace amorphe.

Dans le cas d'un noyau de H_2O pur, l'influence de la phase gazeuse sur le comportement thermique est négligeable.

Les résultats obtenus à l'aide d'un mélange de CO et de H_2O sont illustrés dans les figures 4.1 à 4.3.

A chaque révolution la couche complètement appauvrie en CO descend d'environ 2.5 m. Juste avant le front d'apprauvrissement se produit une densification. Une légère densification se produit également dans les couches profondes du noyau (Figure 4.1). Les profils de température pour des révolutions successives à l'aphélie et au périhélie sont montrés respectivement sur les figures 4.2 et 4.3. L'appauvrissement en CO se manifeste par une singularité dans les profils de températu-

re. A titre de comparaison, deux profils, l'un à l'aphélie et l'autre au périhélie sont reportés pour un noyau de H_2O pur.

Dans la cas d'un mélange de H_2O et de CO_2, une forte compétition entre l'épaississement de la couche appauvrie en CO_2 et l'ablation de la surface se manifeste. Au voisinage du périhélie, la couche appauvrie en CO_2 a pratiquement disparu. Mais cette couche se reforme après le passage au périhélie (Figure 4.4). Les profils de densité à l'aphélie pour les révolutions 1 et 2 sont montrés dans la figure 4.5.

Tous ces résultats ont été obtenus en considérant la glace des comètes comme cristalline. Nous avons complété notre modèle en y incluant la transition glace amorphe - glace cubique (de nombreux indices suggèrent la présence de glace amorphe dans le milieu interstellaire donc probablement aussi dans les comètes).

Nous avons tenu compte dans notre modèle de différents phénomènes (caractère exothermique, différenciation chimique) (cf. §II.1.2) en permettant, sous certaines conditions, la sublimation des espèces volatiles. La transition de phase a été introduite sous forme de loi d'activation en introduisant, lors de la cristallisation de la glace H_2O, le relâchement des molécules volatiles restantes proportionnellement au taux de cristallisation. Nous avons également pris en considération les variations de porosité, de masse volumique, de capacité calorifique et de conductivité thermique de la phase solide dues à ces phénomènes de sublimation-recondensation et au processus de cristallisation. Un exemple des résultats obtenus est illustré dans la figure 4.4. Cette figure montre l'ablation de surface et la progression du front de cristallisation pour la première, deuxième et troisième révolution d'une comète fictive se déplaçant sur l'orbite de la comète de Halley.

II.1.2 - Acquisition de données physico-chimiques pour la modélisation de l'évolution des noyaux cométaires

(B. Schmitt, J. Klinger, S. Espinasse, collaboration avec le laboratoire du Prof. J.M. Greenberg à Leiden).

Dans le but d'établir le schéma des évolutions que peut subir une comète depuis sa formation, nous avons simulé expérimentalement différents phénomènes physico-chimiques pouvant avoir lieu à la surface et à l'intérieur du noyau. Les constantes de temps de ces phénomènes ont été determinées afin de tester leur pertinence à l'échelle des phénomènes cométaires ainsi que pour permettre leur intégration numérique dans le modèle dynamique d'évolution du noyau (§ II.1.1).

II.1.2.1 - EVOLUTION ET DIFFERENCIATION CHIMIQUE DES GLACES

L'analyse des différents processus de piégeage et de libération de molécules volatiles (CO, N_2, CH_4, CO_2, NH_3) par la glace H_2O a été faite en plusieurs étapes :

a) <u>Structure et évolution de la glace H_2O amorphe</u>

Des expériences d'adsorption de gaz sur la glace H_2O amorphe condensée à 77 K ont montré que celle-ci possède une structure extrêmement

poreuse et instable. L'évolution de cette glace amorphe en présence de gaz conduit au piégeage d'une fraction du gaz adsorbé à sa surface.

b) Evolution des mélanges de glaces et cristallisation de la glace H_2O amorphe

Le comportement de mélanges de glaces soumis à un réchauffement étant déterminant pour les processus de différenciation chimique des comètes, nous avons réalisé des expériences simulant l'évolution, en fonction de la température et du temps, de différents mélanges de glaces condensés à basse température (10 - 50 K). Les résultats obtenus montrent que la composition des mélanges de glaces dominés par H_2O évolue principalement en deux étapes en fonction de la température.

- La première étape, correspondant à l'évaporation d'une partie des molécules volatiles, débute vers 25 K pour CO, 32 K pour CH_4 et 70 K pour CO_2. Après cette évaporation une fraction des molécules reste piégée dans la glace H_2O amorphe (gaz/H_2O ≈ 7 à 10%).

- Aux températures supérieures à 120 K, une disparition totale de CO CH_4 et CO_2 a lieu au cours de la cristallisation de la glace H_2O. Les vitesses de cristallisation de H_2O, fortement dépendantes de la température, ont été mesurées entre 120 et 140 K. Pour les mélanges de glaces riches en H_2O l'élimination des molécules piégées dans la glace nécessite des durées supérieures d'un facteur 2 à 3 aux temps de cristallisation, indépendamment de la température.

Par contre, les molécules NH_3 restent piégées durant la cristallisation de H_2O à cause de leur tendance à former des hydrates moléculaires (composés possédant de fortes liaisons hydrogène).

Dans une comète dont la phase volatile est composée d'un mélange moléculaire avec H_2O comme constituant majeur (> 60%), l'évaporation des molécules volatiles (CO, CH_4, N_2, CO_2, ...) dans la porosité du noyau aura lieu en plusieurs étapes en fonction de la température. Les molécules les moins volatiles (NH_3, parents de C_2, C_3, ...) piégées dans les grains de glace seront libérées à la surface du noyau lors de l'évaporation de H_2O. Les productions de gaz comparées à H_2O dépendent donc fortement de l'abondance et de la volatilité des molécules.

A partir de nos résultats expérimentaux, il est aussi possible de définir les températures maximales de formation compatibles avec différentes compositions initiales du noyau.

L'extrapolation à des durées de l'ordre de 10^6 ans de la diffusion de CO et CO_2 dans la glace permet d'affirmer qu'indépendamment des évolutions qu'elles ont pu subir, les comètes libérant du CO ou du CO_2 contiennent de la glace H_2O amorphe et qu'elles se sont formées à des températures inférieures à 85-95 K. Si, de plus, le rapport (CO + CO_2)/H_2O dépasse 10%, la température maximale de formation est de 65-70 K. Si le rapport CO/H_2O dépasse 10% la comète a dû se former à des températures inférieures à 25 K (cf. Figure 4.5).

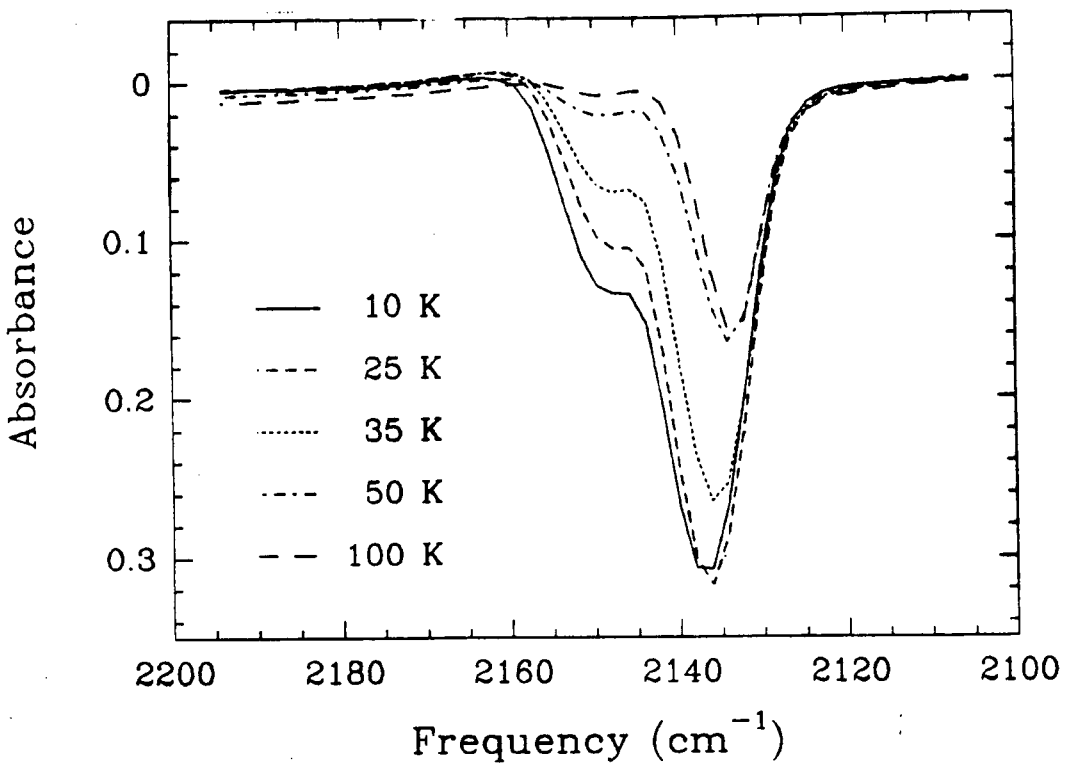


FIGURE 4.5
TEMPS DE CRISTALLISATION DE LA GLACE H_2O AMORPHE ET TEMPS DE DISPOSITION DE CO ET CO_2 EN FONCTION DE LA TEMPERATURE POUR LES MELANGES DE GLACES CO : H_2O ET CO_2 : H_2O.

c) Le problème de l'existence de clathrates dans les comètes.

Depuis la suggestion par Delsemme et Swings (1952) que les productions de gaz des comètes sont contrôlées par l'évaporation de clathrates hydrates à la surface du noyau, aucune preuve de leur présence, ou de leur absence, n'a pu être apportée à l'appui de cette hypothèse. La question de leur existence au sein du noyau étant subordonnée à celle de leur formation et de leur stabilité, nous avons entrepris l'étude expérimentale des différents modes de formation et de décomposition de clathrate hydrate à basse température.

Nous avons pu montrer que dans la gamme des températures probables de formation des comètes ($T < 125$ K) la condensation simultanée de CO ou CO_2 avec H_2O ne forme pas de structure clathrate mais plutôt un mélange amorphe de glaces. D'autre part, lors de la cristallisation de la glace H_2O vers 125 K la disparition rapide de CO ainsi que la pression de gaz élevée ($P_c > 200$ mbar à $T > 125$ K) nécessaire à la stabilité de son clathrate excluent toute possibilité de formation et d'existence dans les comètes.

Pour CO_2 le problème est plus délicat car, du fait d'une pression de dissociation plus faible ($P_c < 0{,}1$ mbar à 125 K), une formation de clathrate est peut-être possible entre 120 K et 150 K, soit par cristallisation, soit par interaction entre du CO_2 évaporé dans la porosité du noyau et la glace. En effet, lorsque de la glace est mise en contact avec un gaz sous une pression supérieure à la pression de dissociation P_c de son clathrate celui se forme. La vitesse de formation dépend de la pression, de la température et de la taille des grains de glace. Sa décomposition intervient dès que la pression descend en dessous de la pression de dissociation. Du fait de leur décomposition rapide au dessus de 150 K (P_c = 5 mbar à 150 K) l'évaporation de clathrate à la surface du noyau ne semble possible que pour des comètes dont les températures de surface n'excèdent jamais 140-150 K.

II.1.2.2 - SIMULATION DE COMETES EN LABORATOIRE DANS LE CADRE DU PROJET "KOSI"

(J. Klinger, B. Schmitt, S. Espinasse, collaboration avec l'Institut de Simulation Spatiale au DFVLR à Cologne - RFA)

Du 1.10.1987 au 30.09.1988, J. Klinger a effectué un séjour à l'Institut de simulation spatiale du DFVLR (Etablissement Aérospatial allemand) à Cologne pour aider au démarrage du projet KOSI (simulation de comètes). Ce programme se déroule pour une large part dans un grand simulateur spatial conçu initialement pour des tests de satellites. Une petite chambre de simulation d'un volume de l'ordre de 300 l est également disponible. Un cryostat pour la mesure de la conductibilité thermique apparente a été construit par J. Klinger pendant son séjour.

Les échantillons utilisés sont obtenus en injectant une suspension de matière minérale (particules) d'argile et d'olivine à proportions variables (taille des grains < 5 µm) dans de l'azote liquide. Nous obtenons avec ce procédé un mélange granuleux de glaces et de poussières avec une densité moyenne inférieure à 500 kg/m^3.

Cette substance est ensuite exposée au rayonnement d'un soleil artificiel (lampes au xénon filtrées, température du corps 5900 K, intensité entre 0,4 et 1,5 constantes solaires) dans un vide de l'ordre de 10^{-6} torr. Les premiers résultats sont très encourageants et confirment en bonne partie le modèle du noyau poreux que nous développons :

. La phase vapeur est responsable d'une partie essentielle du transport de la chaleur entre la surface et l'intérieur de l'échantillon,

. Sous la surface de l'échantillon se produit un important phénomène de frittage, indiquant ainsi une redéposition d'une partie de la phase vapeur à l'intérieur.

. Ce phénomène de frittage est accompagné d'un important fractionnement isotopique. Les analyses des rapports $^{18}O/^{16}O$ et D/H effectuées par Stichler de l'Institut d'Hydrologie du "Gesellschaft fur Strahlen und Umweltforschung" à Munich sur des prélèvements à différentes profondeurs sous la surface de l'échantillon montrent un enrichissement en isotope lourd vers la surface et vers le fond de l'échantillon et un rapport isotopique presque inchangé dans la zone intermédiaire.

II.2. - SPECTROSCOPIE ET PHYSICO-CHIMIE DES GRAINS INTERSTELLAIRES

(B. Schmitt, J. Klinger)
collaboration avec le laboratoire du Prof. J. M. Greenberg à Leiden).

II.2.1 - Evolution de grains CO:H_2O - Mécanisme d'éjection de H_2O.

L'évolution de la composition d'un grain interstellaire composé principalement de CO et de H_2O a été étudiée dans le cas d'un réchauffement lent (réchauffement d'un nuage) et dans celui d'un échauffement brusque provoqué par une source externe (RX, collisions grain-grain, ...). Dans ces deux cas la composition des mélanges de glaces varie de façon très différente d'une simple évaporation de glaces pures.

Pour des vitesses lentes de réchauffement (< 5 K/min) la proportion de CO décroît entre 25 K et 35 K vers une valeur de l'ordre de 7 à 10% et ceci sans évaporation de H_2O (cf. II.1.2.1). Les rapports CO/H_2O inférieurs à 10% observés en direction de proto-étoiles telles que W33A, BN,... peuvent être dû à l'évaporation d'une partie des molécules de CO résultant du chauffage des grains au dessus de 25K.

Par contre l'évaporation de CO produite par un réchauffement rapide (> 50 K/min) conduit à l'éjection d'une fraction de H_2O du manteau de glaces Cette importante éjection de H_2O met en évidence un mécanisme capable de réinjecter efficacement des molécules peu volatiles en phase gazeuse. Contrairement au mécanisme de destruction des manteaux par explosion chimique de glaces photolysées, ce mécanisme d'éjection ne nécessite pas de source énergétique interne.

II.2.2 - Spectroscopie infrarouge des glaces interstellaires.

La connaissance de l'absorbance moléculaire des différents modes fondamentaux de vibration (IR) des molécules condensées sur les grains est indispensable à la détermination de leur abondance. Nous avons entrepris de mesurer ce paramètre en fonction de la température pour différents mélanges de glaces. Parallèlement, nous avons aussi étudié la forme des bandes d'absorption en fonction de la composition et leur évolution en fonction de l'histoire thermique.

Les premiers résultats concernant des mélanges $CO:H_2O$, $CO_2:H_2O$ et $CH_4:H_2O$ ont montré que la forme et la position des bandes infrarouges de H_2O (3,1 µm, 6,0 µm et 12 µm), de CO (4,68 µm) et de CO_2 (4,275 µm) sont très sensibles à la composition et changent de façon irréversible en fonction de l'histoire thermique subie par le mélange de glaces. En particulier pour CO la présence d'une seconde bande satellite à 4,647 µm, attribuée à un complexe $CO-H_2O$, à été mise en évidence. Cette bande est particulièrement sensible à la température de condensation et disparait totalement vers 100K (Figure 4.6).

D'autre part un changement réversible de l'intensité des bandes d'absorption IR en fonction de la température a été observé pour CO, CO_2 et CH_4 piégés dans une matrice de glace H_2O amorphe. Pour CO et CH_4 une réduction d'un facteur 1.7 est atteinte entre 10 et 100K. Pour CO_2 l'effet est beaucoup moins marqué.

Ces résultats sont d'une grande importance d'une part, pour la détermination de l'abondance des molécules condensées sur les grains interstellaires et d'autre part, pour la détermination de la température et de l'histoire thermique des grains.

II.2.3 - Synthèse moléculaire par photolyse UV des grains interstellaires

Cette étude a pour but de comprendre la chimie de base de la synthèse moléculaire en phase solide induite par photolyse UV de mélanges de glaces. L'identification des espèces formées et la détermination de leurs cinétiques de synthèse est faite par analyse des spectres infrarouges après différentes durées d'irradiation.

II.2.3.1 - GRAINS RICHES EN NH_3

L'utilisation de traceurs isotopiques (D, ^{18}O et ^{15}N) dans les mélanges $H_2O:NH_3$, $CO:NH_3$ et $O_2:NH_3$ et l'analyse détaillée de la région 5 - 8 µm² de leurs spectres IR après photolyse a permis de déterminer que le groupement $-NH_4^+$ est le meilleur candidat pour la bande d'absorption à 6,8 µm des spectres interstellaires. Les caractéristiques des bandes d'absorption entre 5 et 8 µm de la source infrarouge W33A sont interprétées comme étant dues à des grains à différentes températures le long de la ligne de visée. La présence d'autres ions (OCN^-, NO_2^- et NO_3^-) identifiés dans les mélanges photolysés en laboratoire suggère leur observabilité dans les spectres interstellaires.

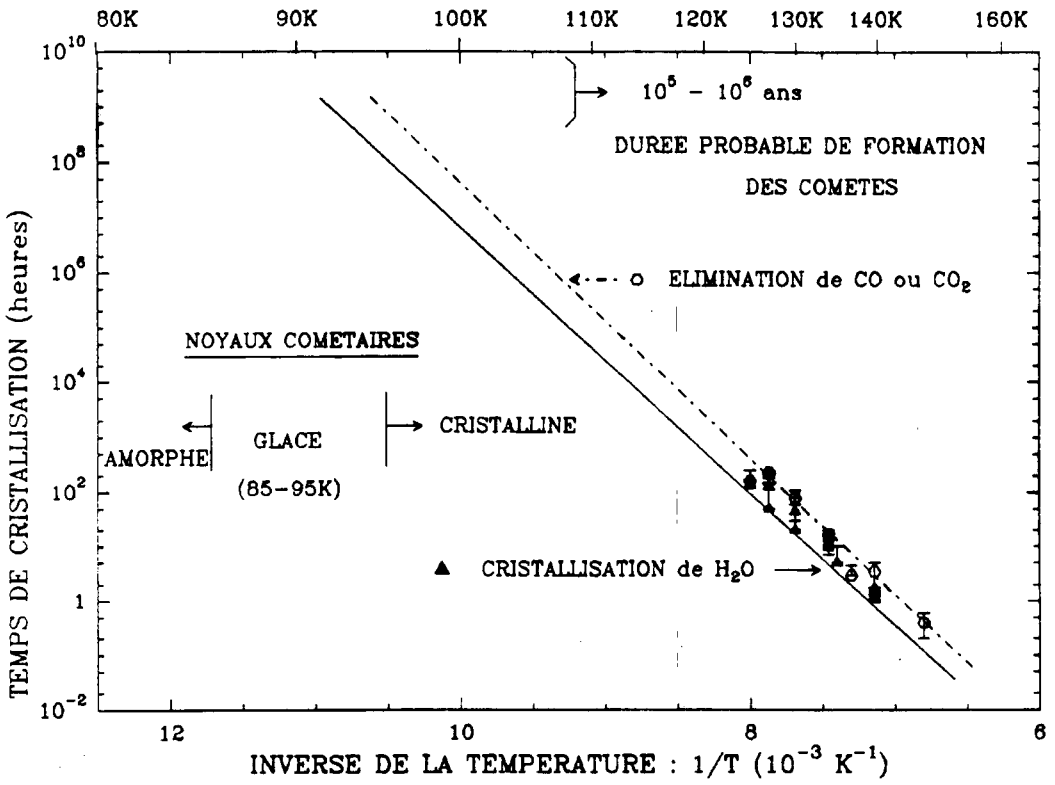


FIGURE 4.6
EVOLUTION DE LA FORME ET DE LA POSITION DE LA BANDE D'ABSORPTION INFRAROUGE DE CO A 4,68 µm EN FONCTION DE LA TEMPERATURE POUR UN MELANGE DE GLACE CO : H_2O

II.2.3.2 - GLACE CH_4 PURE

La photolyse de CH_4 pur synthétise essentiellement C_2H_6 en premier produit, puis des composés carbonés saturés à 3 carbones et plus. Les rendements de synthèse sont très faibles et dépendent de l'élimination des atomes d'hydrogène par formation de H_2. Le résidu organique obtenu après photolyse à 10K et chauffage à T > 150K reproduit assez bien l'absorption vers 3,4 µm observée en direction du centre galactique.

II.2.3.3 - GRAINS RICHES EN H_2O.

La prépondérance de H_2O sur les grains donne à la chimie des glaces riches en H_2O un intérêt particulier. Les mélanges binaires CH_4:H_2O, NH_3:H_2O et CO_2:H_2O sont en cours d'étude. La comparaison des courbes de croissance des produits de synthèse obtenus par photolyse des mêmes molécules mais en proportions variables permettra de comprendre les réactions successives mises en jeu et les contraintes imposées par la composition initiale sur les espèces synthétisées.

III - COLLABORATIONS ET CONTRATS

Nous avons collaboré avec les équipes suivantes :

- Laboratoire d'Astrophysique du Professeur J.M. Greenberg (Leiden - Pays Bas)
- Institut de Simulation Spatiale du DFVLR (Etablissement Aerospatial Allemand) (Cologne - RFA)

Nous avons obtenu un support financier de :

- l'ATP "Planétologie" de l'INSU
- GDR "Physico-Chimie des Molécules Interstellaires" du CNRS

IV - LISTE DES PUBLICATIONS

IV.2 - REVUES A LECTEURS

Klinger J., J. Ocampo, and B. Schmitt, 1986 :
On clathrate hydrates in comets. In *Asteroids, Comets, Meteors II* (C.-I. Lagerkvist, B. A. Lindblad, H. Lundstedt and H. Rickman, Eds.), 241-243. Uppsala Univ., Uppsala.

Ocampo, J., B. Schmitt, and J. Klinger, 1986 :
Risk of physical and chemical alteration of comet nucleus samples during transfer to earth. In *The Comet Nucleus Sample Return Mission*, ESA SP-249, 169-171. ESTEC, Noordwijk.

Ocampo, J., B. Schmitt, and J. Klinger 1987 :
"Chemical" reactivity on the disordered surfaces: the case of ice. In VIIth Symposium on the Physics and Chemistry of Ice. *Suppl. J. de Physique C1 48*, 557-563.

Schmitt B., J. Ocampo, and J. Klinger 1987 :
Structure and evolution of different ice surfaces at low temperature - Adsorptions studies. In VIIth Symposium on the Physics and Chemistry of Ice. *Suppl. J. de Physique C1 48*, 519-525.

Klinger J., 1987 :
Solid aqueous solutions (invited paper), NATO ASI on "The Physics and Chemistry of Aqueous Ionic Solutions", Institut d'Etudes Scientifiques de Cargese (June 22 - July 5, 1986). In *The Physics and Chemistry of Aqueous Ionic Solutions*. (M.C. Bellisent-Funel and G.W. Neilson, eds) Reidel Publ. Co, 441-446.

Schmitt, B., J.M. Greenberg, and R.J.A. Grim, in press :
The temperature dependence of the CO infrared band strength in CO:H_2O ices. *Astrophys. J. Letters.*

Grim, R.J.A., W.A. Schutte, J.M. Greenberg, F. Baas, and B. Schmitt, in press :
Infrared spectroscopy of astrophysical ices: New insights in the photochemistry. *Astron. Astrophys. Suppl.*

IV.2 - COMMUNICATIONS COLLOQUES

Benest D. and J. Klinger, 1986 :
Feasibility of a mission to comet P/Schwassmann-Wachmann I, ESA Workshop "Comet Nucleus Sample Return", Canterbury, July 15-15, ESA-SP 249, 221-224.

Ocampo J., Schmitt B and J. Klinger, 1986 :
Risk of physical and chemical alteration of comet nucleus samples during transfert to earth. In "The Comet nucleus sample return mission "ESA-SP 249, 169-171.

Benest D. and J. Klinger, 1987 :
Proposition for a mission to P/Schwassmann-Wachmann I, ESA Workshop on the diversity and similarity of comets, Brussels, April 6-9, 1987, ESA-SP 278, 733-736.

Schmitt, B., and J. Klinger, 1987 :
Different trapping mechanisms of gases by water ice and their relevance for comet nuclei. In Symposium on the Diversity and Similarity of Comets, ESA SP-278, 613-619. ESTEC, Noordwijk.

Schmitt, B., and J.M. Greenberg, 1987 :
CO diffusion in ices and temperature limits to comet formation. In Fluffy Structures: the Chemical and Physical Evolution of Interplanetary Particles (J.M. Greenberg, Edt.), Univ. of Leiden, unpublished.

Schmitt, B., R.J.A. Grim, and J.M. Greenberg, 1988 :
Molecular diffusions in ices - Implications for the composition of interstellar grain mantles and comet nuclei. In Experiments on Cosmic Dust Analogues (E. Bussoletti et al., Eds.), pp. 259-269. Kluwer Academic Publ., Dordrecht.

Schmitt, B., R.J.A. Grim, and J.M. Greenberg, 1988 :
Volatile molecules in interstellar grain mantles: diffusion and infrared band strength. In Dust in the Universe (M.E. Bailey and D.A. Williams, Eds.), pp. 291-296. Cambridge Univ. Press, Cambridge.

Schmitt, B., J. Klinger, S. Espinasse, and J.M. Greenberg, 1988 :
Acquisition de données physico-chimiques pour la modélisation des noyaux cométaires. In *Comptes Rendus des Journées de Planétologie* (M.C. Festou and D. Chabod, Eds.), 207-210. Observatoire de Besançon.

Schmitt, B., S. Espinasse, J. Klinger, and J.M. Greenberg, 1988 :
Effet de la température sur l'évolution et la différenciation chimique des glaces cométaires. In *Comptes Rendus des Journées de Planétologie* (M.C. Festou and D. Chabod, Eds.), 203-206. Observatoire de Besançon.

Espinasse, S., B. Schmitt and J. Klinger, 1988 :
Modélisation du comportement thermique et de la différenciation chimique des noyaux de comètes: résultats préliminaires. In *Comptes Rendus des Journées de Planétologie* (M.C. Festou and D. Chabod, Eds.), 199-202. Observatoire de Besançon.

Schmitt, B., J. Klinger, R.J.A. Grim, and J.M. Greenberg, 1988 :
Physico-chimie des manteaux de glaces des grains interstellaires. In Recueil des Journées Scientifiques S.F.S.A., Grenoble Univ. [Abstract]

Roessler K., A. Bischoff, G. Heich, E. Grun, H. Fechtig, F. Joo, J. Klinger, H. Kochan, D. Stoffler and K. Thiel, 1988 :
Cometary matter in observation and simulation experiments, XIXe "Lunar and Planetary Science Conference", Houston (Texas), 14-18 Mars 1988).

Fechtig H., B. Feubacher, E. Grun, F. Joo, J. Klinger, H. Kochan, D. Krankowski, K. Roessler, W. Seboldt, T. Spohn, D. Stoffler, and K. Thiel, 1988 :
Experimente zur Kometensimulation : experimenteller Aufbau. Fachsitzung "Extraterrestrische Physik" Versammlung der Deutschen Physikalischer Gesellschaft, Dusseldorf 3-3-88 (abstract) 17.

Benkhoff J., E. Grun, J. Klinger, R. Roessler, T. Spohn (ibid), 1988 :
Experimente zur Kometensimulation : thermische Modelle zur Evolution des Probenkorpers, 17-18.

Grun E., J. Klinger, F. Joo, H. Kochan, H. Kohl, W. Seboldt, K. Thiel (ibid), 1988 :
Experimente zur Kometensimulation : Mechanismen der Staubemission, 19.

Kochan H., A. Bischoff, H. Fechtig, B. Feueurbacher, E. Grun, F. Joo, J. Klinger, H. Kohl, K. Roessler, W. Seboldt, T. Spohn, K. Thiel (ibid), 1988 :
How far do results of recent simulation experiments fit current models of cometary nuclei.

Kochan H., A. Bischoff, H. Fechtig, B. Feueurbacher, E. Grun, F. Joo, J. Klinger, H. Kohl, K. Roessler, W. Seboldt, K. Thiel, D. Krankowsky, G. Schwehm, and U. Weishaupt (ibid), 1988 :
Laboratory simulation of a cometary nucleus : experimental setup and first results.

Kochan H., A. Bischoff, H. Fechtig, B. Feueurbacher, E. Grun, F. Joo, J. Klinger, H. Kohl, K. Roessler, W. Seboldt, K. Thiel, D. Krankowsky, G. Schwehm , U. Weishaupt, Stoffler, 1988 :
Comet simulation experiments at the DFVLR Space Simulators, presented at the 27e COSPAR Meeting ESPO, Finlande (18-29 juil.) (accepted for Proceedings).

Kochan H., A. Bischoff, F. Joo, J. Klinger, K. Roessler, E. Biel, A. Stichler, D. Stoffler (ibid) 1988 :
KOSI comet simulation experiments at DFVLR : sample preparation and evolution of the $^{18}O/^{16}O$ and the D/H ratio in the ice sea component.

Kochan H., H. Fechtig, E. Grun, J. Klinger, H. Kohl, W. Seboldt, K. Thiel, T. Spohn, J. Benkhoff (ibid), 1988 :
Mechanisms of dust emission from the surface of a cometary nucleus.

Kochan H., E. Grun, J. Klinger, Krankowsky, T. Spohn, J. Benkhoff (ibid), 1988 :
Thermal modelling of two KOSI comet nucleus simulation experiments.

Grim, R.J.A., W.A. Schutte, B. Schmitt, and J.M. Greenberg, 1989 :
New insights in the photochemistry of grain mantles: the identification of the 4.62 and 6.87 μm bands. In IAU Symposium 135 on Interstellar Dust (L.J. Allamandola and A.G.G.M. Tielens, Eds.), NASA Conference Publication [Abstract], in press.

Schmitt, B., R.J.A. Grim and J.M. Greenberg, 1989 :
Diffusion and infrared properties of molecules in ice mantles. In IAU Symposium 135 on Interstellar Dust (L.J. Allamandola and A.G.G.M. Tielens, Eds.), NASA Conference Publication [Abstract], in press.

Schmitt, B., R.J.A. Grim and J.M. Greenberg, 1989 :
Spectroscopy and physico-chemistry of CO:H_2O and CO_2:H_2O ices. In 22nd ESLAB Symposium on Infrared Spectroscopy in Astronomy. ESA-SP, ESTEC, Noordwijk. in press.

Grim, R.J.A., J.M. Greenberg, F. Baas, M. de Groot, B. Schmitt et al., 1989 :
Infrared diagnostics for interstellar solid state chemistry. In 22nd ESLAB Symposium on Infrared Spectroscopy in Astronomy. ESA-SP, ESTEC, Noordwijk. in press.

IV.3 - AUTRES PUBLICATIONS

Schmitt, B., 1986 :
La surface de la glace : structure, dynamique et interactions - Implications astrophysiques. Thèse d'Université, USTM Grenoble, France.

Klinger J., 1986 :
Les comètes : échantillons de matière primitive ? *Bull. de l'Association des Membres de l'Ordre des Palmes Académiques,* section de l'Isère, 10, 1.

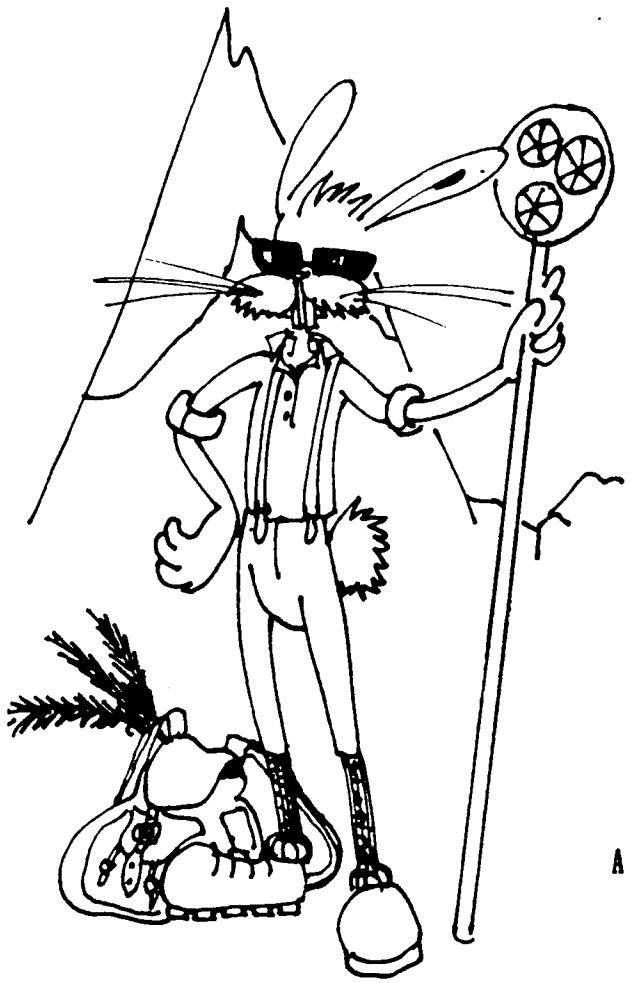
Ocampo J., 1987 :
Adsorption, clathration et mobilité des molécules d'eau à la surface de la glace. Applications en glaciologie et astrophysique. Thèse de Doctorat d'Etat, USTMG.

Schmitt, B., J.M. Greenberg, and R.J.A. Grim, 1988 :
Diffusion et piégeage des molécules volatiles dans les glaces - Différenciation chimique des noyaux cométaires. J. Astron. Français 33, 34.

Schmitt, B., R.J.A. Grim, and J.M. Greenberg, 1988 :
Variation avec la température de l'absorbance moléculaire et de la forme des bandes d'absorption infrarouge des glaces. *J. Astron. Français 32,* 24.

++++
++

CHAPITRE V



FLUCTUATIONS DES GLACIERS ALPINS

I - OBJECTIF GENERAL DES ETUDES ENTREPRISES

Pour comprendre l'influence des fluctuations du climat sur les variations des glaciers, on doit :

1) connaître les relations entre le climat (essentiellement précipitations et température) et le bilan de masse (fonction de l'état de surface : glace, névé, couverture morainique, crevassement),

2) déterminer l'influence des variations du bilan de masse sur la dynamique du glacier (fluctuations de vitesse, longueur et niveau).

Pour ces deux problèmes, il est nécessaire de disposer d'une longue série de données annuelles.

Or seules les variations de longueur des glaciers sont déterminées assez régulièrement depuis le début du siècle, les mesures de bilan sont beaucoup plus rares et ne remontent jamais au-delà de quelques décennies.

Nous devons donc :

- effectuer un travail d'observation systématique en :

  . poursuivant les mesures entreprises il y a 1 ou 2 décennies par le Laboratoire (Mer de Glace, St Sorlin),
  . prenant le relais d'organismes (EDF, Cie du Montenvers) qui abandonnent l'étude de certains glaciers (Argentière, Mer de Glace)
  . reprenant l'étude de quelques uns des glaciers que les Eaux et Forêts ont suivis du début du siècle jusqu'aux années 60 (Bossons, Gébroulaz, Glacier Blanc), Figures 5.1 et 5.2.
  . collaborant aux mesures d'autres organismes assurant le suivi glaciaire (CEMAGREF notamment),

- analyser de manière plus approfondie quelques problèmes :

. Dans quelle mesure quelques bilans ponctuels en zone d'ablation permettent-ils d'estimer les bilans de masse de tout le glacier (étude entreprise à Saint Sorlin avec un réseau dense d'observation s'étendant en zone d'accumulation, ou à Argentière sur 4 profils, (Figure 5.3), ainsi qu'à la distribution du bilan d'accumulation à haute altitude (Figure 5.3 bis).

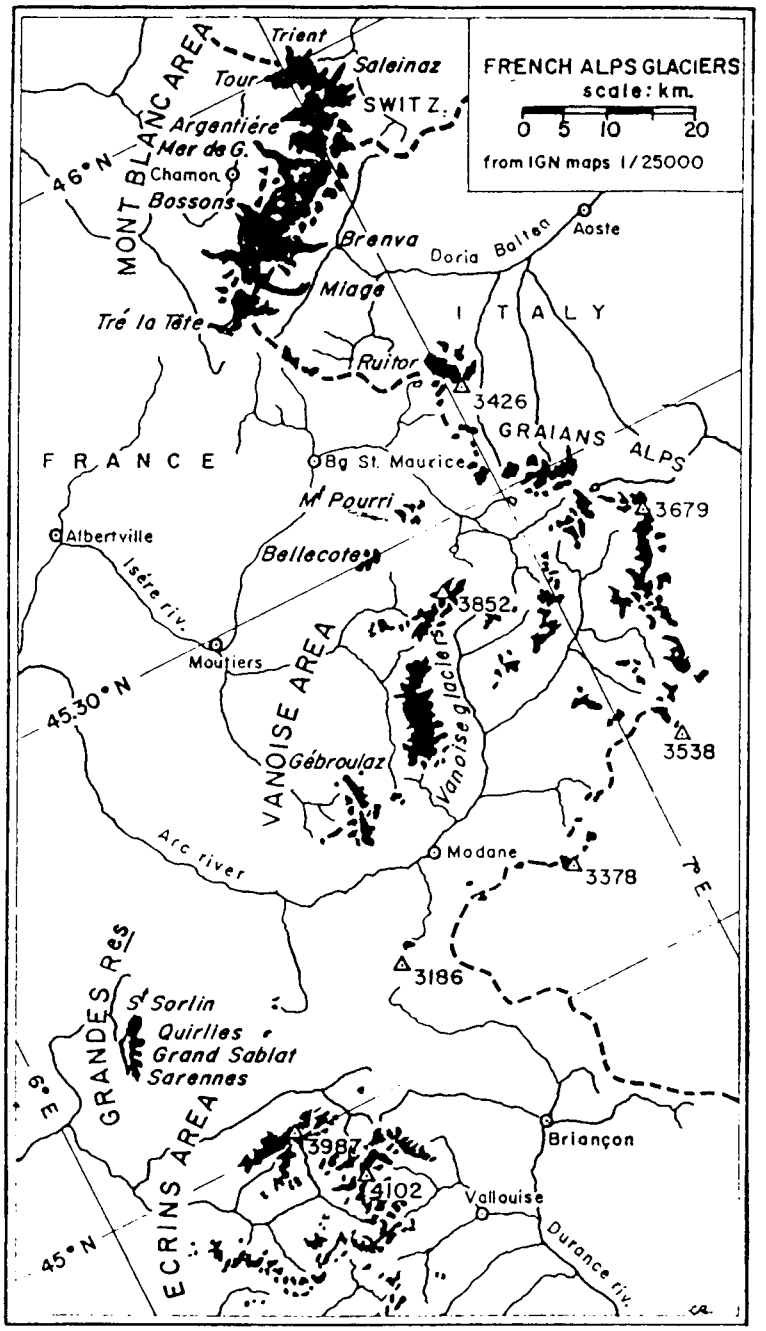


FIGURE 5.1

SUR LES 400 KM^2 DE SURFACE ENGLACEE DES ALPES FRANCAISES, REPARTIE EN 4 MASSIFS PRINCIPAUX, UNE DIZAINE DE GLACIERS FONT L'OBJET D'UN SUIVI ANNUEL SYSTEMATIQUE CONCERNANT LES VARIATIONS DE LONGUEUR, ALTITUDE, VITESSE ET BILAN DE MASSE.

PRINCIPALEMENT CHOISIS D'APRES LEURS CARACTERISTIQUES PARTICULIERES TELLES QU'ANCIENNETE DES SERIES DE MESURES OU LES FACILITES D'ACCES, ON DEVELOPPE SUR CES GLACIERS DES PROGRAMMES D'ETUDE EN FONCTION DE LEUR MORPHOLOGIE SPECIFIQUE QUI SE PRETE MIEUX A LA MESURE DE CERTAINS PARAMETRES DE FLUCTUATION.

D'AUTRE PART CES DIX GLACIERS FONT PARTIE DU SUIVI PHOTOGRAMMETRIQUE TRIENNAL, REGULIEREMENT EFFECTUE PAR LE CEMAGREF.

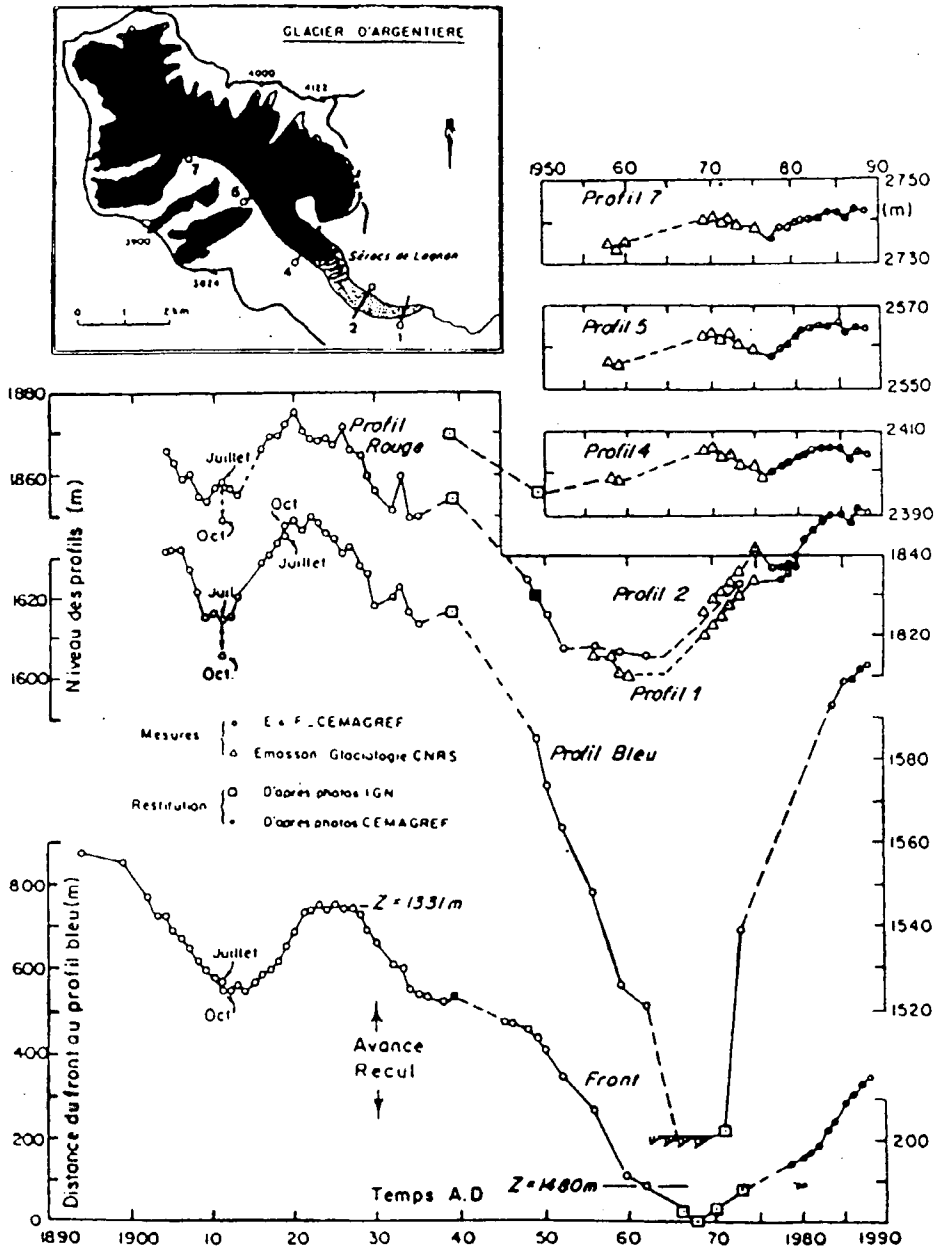


FIGURE 5.2

LE GLACIER D'ARGENTIERE (MASSIF DU MT BLANC) EST UN DES GLACIERS QUI A ETE SUIVI PAR LES EAUX ET FORETS DEPUIS LE DEBUT DU SIECLE JUSQU'EN 1965 POUR SES FLUCTUATIONS DE LONGUEUR ET D'ALTITUDE SUR LA LANGUE INFERIEURE. A CETTE DESCRIPTION SONT VENUS S'AJOUTER A PARTIR DE 1958 LES 3 PROFILS SUR LA PARTIE SUPERIEURE POUR SUIVRE LES FLUCTUATIONS DU GLACIER AU-DESSUS DE LA CAPTURE EDF DU TORRENT SOUS-GLACIAIRE (MESURES EFFECTUEES DEPUIS 1975 PAR LE LGGE PUR LE COMPTE D'ELECTRICITE D'EMOSSON S.A.). CET ENSEMBLE DE MESURES EST EXCEPTIONNEL CAR IL RéVELE UN COMPORTEMENT DYNAMIQUE TOTALEMENT INéDIT LORS D'UNE CRUE GLACIAIRE COMME CELLE QUI SE DéVELOPPE DEPUIS 1970. ALORS QUE LES PROFILS SUPERIEURS NE VARIENT QUE DE 5 A 10 M, L'ENSEMBLE DE LA LANGUE INFERIEURE S'EST REHAUSSE DE 40 A 160 M. EN FAIT L'APPORT DE GLACE RESPONSABLE DE CETTE ELEVATION EST DU A UNE AUGMENTATION TRES IMPORTANTE DE LA VITESSE SUR TOUS LES PROFILS, CE QUI N'EST PAS DU TOUT EXPLICABLE PAR LES CONCEPTS THéORIQUES HABITUELS. C'EST POURQUOI LE SUIVI REGULIER DE TELLES FLUCTUATIONS DOIT PERMETTRE DE DEGAGER LES MECANISMES FONDAMENTAUX RESPONSABLES DE L'AJUSTEMENT DE LA DYNAMIQUE AUX VARIATIONS D'ALIMENTATION. DU POINT DE VUE PRATIQUE DE LA PREVISION DU PASSAGE D'UN ETAT DE CRUE A CELUI DE DECRUE (NECESSAIRE A L'ESTIMATION DU TRAJET DE L'EAU) IL APPARAIT QUE LES VITESSES CARACTERISENT MIEUX L'ETAT GLOBAL DU GLACIER QUE LES FLUCTUATIONS DE NIVEAU : ON DISPOSE DONC D'UN PRECURSEUR.

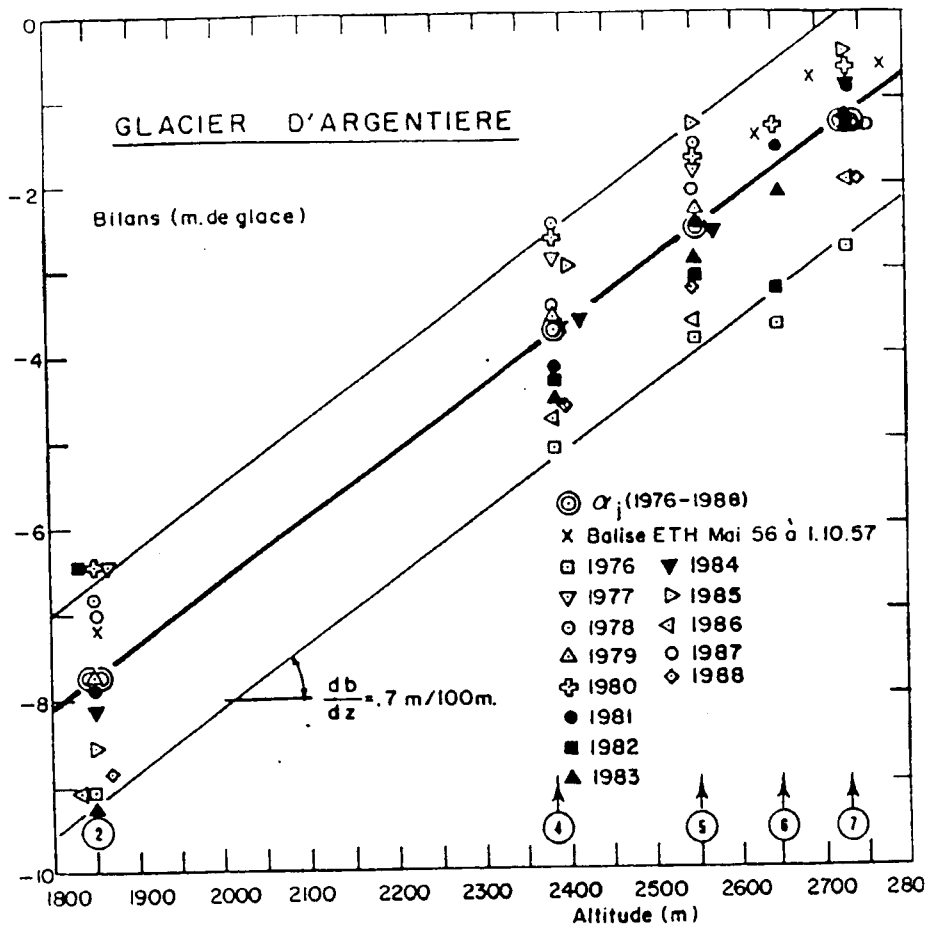
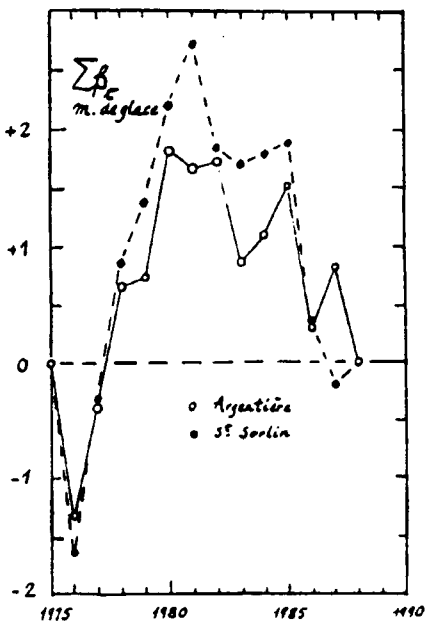


FIGURE 5.3
LES VALEURS ANNUELLES DE BILAN RECUEILLIES AUX 5 PROFILS TRANVERSAUX DU GLACIER D'ARGENTIERE, RéPARTIS SUR 900 M D'ALTITUDE SERVENT DE TEST A L'APPLICATION DU MODELE LINéAIRE DES VARIATIONS DES BILANS (SOUS UNE FORME SIMPLIFIéE DéRIVéE DE LLIBOUTRY, 1974). CES FLUCTUATIONS ANNUELLES POUR LA PéRIODE 1976-1988 PEUVENT ETRE COMPARéES FAVORABLEMENT AUX VARIATIONS DE DEUX AUTRES GLACIERS DE LA CHAINE DES ALPES COMME ICI à CELLES DU GLACIER DE ST SORLIN SITUE 100 KM PLUS AU SUD.



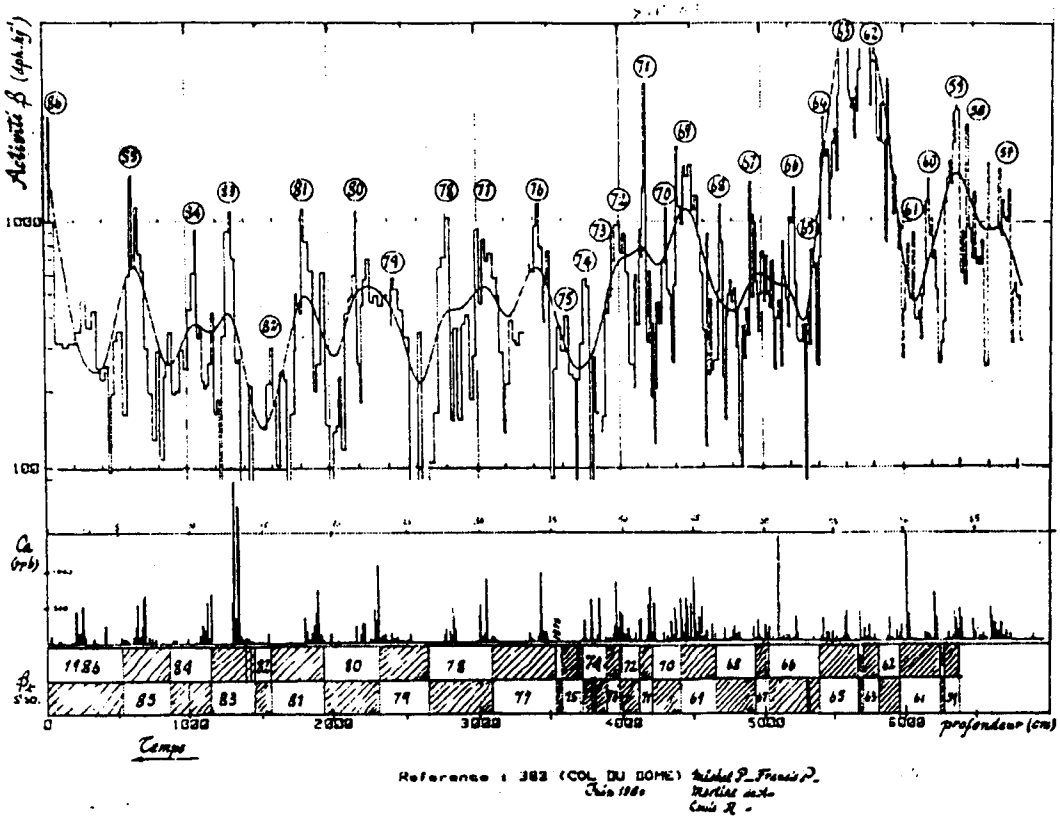


FIGURE 5.3 BIS

LE FORAGE DE JUIN 1986 AU COL DU DOME, MASSIF DU MONT-BLANC (4300 M) PERMET DE COMPARER SUR CES 70 M, LA DATATION OBTENUE PAR LA MESURE DE L'ACTIVITE β (NOTAMMENT LES ANNEES REPERES 1962 ET 1963) ET LE DECOUPAGE REALISE SELON LA VARIATION DU BILAN MESURE SUR LE GLACIER DE SAINT-SORLIN.

CES RESULTATS PRELIMINAIRES MONTRENT UNE TRES BONNE CONCORDANCE ENTRE LA FLUCTUATION DE L'ACCUMULATION EN ALTITUDE ET CELLE DU BILAN DE MASSE OBSERVEE A PLUS BASSE ALTITUDE ET PERMETTENT D'ETENDRE A TOUT LE GLACIER LA FLUCTUATION DE BILAN DEJA OBSERVEE EN DES LIEUX PLUS ACCESSIBLES. ENFIN, UNE FOIS CONNUE LA VALEUR MOYENNE DE L'ACCUMULATION, EN UN SITE DE FORAGE, CELA PERMET AUSSI D'ESTIMER LES PROFONDEURS AUXQUELLES ON PEUT RENCONTRER LES ANNEES REPERES INDISPENSABLES A L'ETABLISSEMENT D'UNE BONNE CHRONOLOGIE.

(RESULTATS PRELIMINAIRES A PARTIR DE FORAGES REALISES GRACE A LA MISE EN COMMUN DES MOYENS ET INTERET DE L'ATP "AEROSOLS DESERTIQUES", DU CONTRAT CEE "ESTIMATION DE L'EVOLUTION DE LA POLLUTION ACIDE EN EUROPE AU COURS DU DERNIER SIECLE).

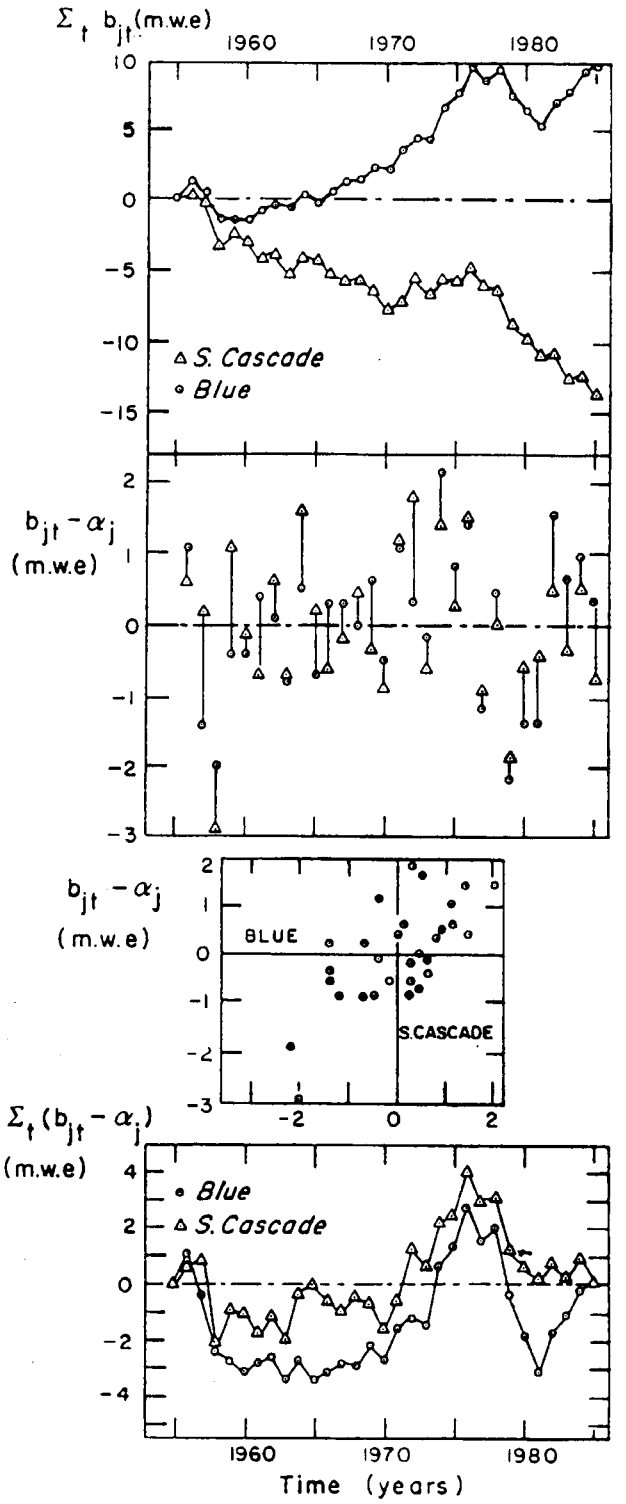


FIGURE 5.4

LES GLACIERS BLUE ET SOUTH CASCADES SITUES DANS L'OUEST DES ETATS-UNIS (LATITUDE 50°N) PRESENTENT LA PLUS LONGUE SERIE DE MESURES DES BILANS DE MASSE DU CONTINENT AMERICAIN (30 ANS). ILS CONSTITUENT UNE TRES BONNE ILLUSTRATION DE L'APPLICATION DU MODELE LINEAIRE DE VARIATION DU BILAN ETENDU A LA COMPARAISON DE 2 GLACIERS. EN EFFET ALORS QUE LEURS EVOLUTIONS SONT OPPOSEES, LES VARIATIONS, ELLES, SONT TRES BIEN CORRELEES (R = 0,69) ET PERMETTENT DE DEGAGER UN SIGNAL DE VARIATIONS COMMUN SUR L'ENSEMBLE DU MEME MASSIF (~ 500 KM).

(Letréguilly-Reynaud, accepté au J. of Glaciology en 1988).

. Les quelques relations publiées ont été établies pour des glaciers propres et lisses ; elles ne sont certainement pas valables pour des glaciers très crevassés ou recouverts. Pour un grand glacier, selon qu'il est en crue ou en décrue, la zone d'ablation peut passer d'un aspect à l'autre et toute reconstitution des bilans à partir des archives météorologiques implique l'étude préalable de glaciers ou de portions de glacier d'aspect plus exotique. Pour ce faire, on a entrepris en 1983 et 1984 l'étude de 2 glaciers recouverts (Glacier Noir et Arsine), l'étude du bilan de masse d'une zone très crevassée, beaucoup plus difficile, restant encore un projet.

- Tenter de reconstituer les bilans passés à partir des données existantes (variations de volume et de vitesse). L'information disponible est considérable : en France seulement plusieurs dizaines de glaciers ont été régulièrement suivis par les Eaux et Forêts pendant plus d'un demi-siècle. Les quelques tentatives effectuées sont encourageantes, et servent de test aux reconstructions à partir des paramètres météorologiques.

II - RESULTATS MAJEURS OBTENUS DEPUIS LE DERNIER RAPPORT

II.1 - VARIATIONS SPATIO-TEMPORELLES DES BILANS DE MASSE

(L. Reynaud, M. Vallon)

II.1.1 - Structure régionale de répartition

L'analyse des fluctuations des bilans de masse réalisée pour les glaciers des Alpes (France, Italie, Suisse, Autriche - cf. rapport d'activité 1980-82) a été étendue à toutes les séries de mesures existantes (Scandinavie, Oural, Tien-Shan et Amérique du Nord : Figure 5.4).

Dans tous les massifs on a confirmé que si, compte-tenu du temps de réponse aux fluctuations climatiques, très variables d'un glacier à l'autre, les variations de volume des glaciers ne montraient aucune corrélation, les variations interannuelles de ce bilan étaient par contre très fortement corrélées.

Récemment, dans le cadre de la coopération scientifique et technique entreprise avec Electroperu, on a pu analyser de la même façon l'unique ensemble de mesure de bilan de masse disponible sur l'hémisphère Sud. Il apparait de même une structure spatiotemporelle

semblable à celle dégagée pour les autres massifs alpins (Figure 5.4) (A. AMES, 1985). Enfin l'analyse des bilans recueillis sur l'axe Dumont d'Urville - Dôme C montre de même que la fluctuation interannuelle homogène est importante. L'importance de cette variation implique qu'une bonne carte d'accumulation sur le continent Antarctique ne peut être obtenue qu'à partir de données recouvrant la même période de temps. D'autre part les écarts d'homogénéité apparaissent liés à la rugosité de la surface (sastrugis) et montrent qu'on ne peut se contenter d'un échantillonnage ponctuel en chaque site (PETRE, PINGLOT, POURCHET, REYNAUD, Journal of Glaciology (1986).

II.1.2 - Téléconnexion

D'un massif à l'autre les variations interannuelles sont indépendantes mais à l'échelle du siècle de grandes régions au comportement différent apparaissent. La ressemblance est forte entre Alpes, Scandinavie, Caucase et Oural (Figure 5.5), mais le comportement des glaciers européens est totalement différent de celui obtenu en Amérique du Nord.

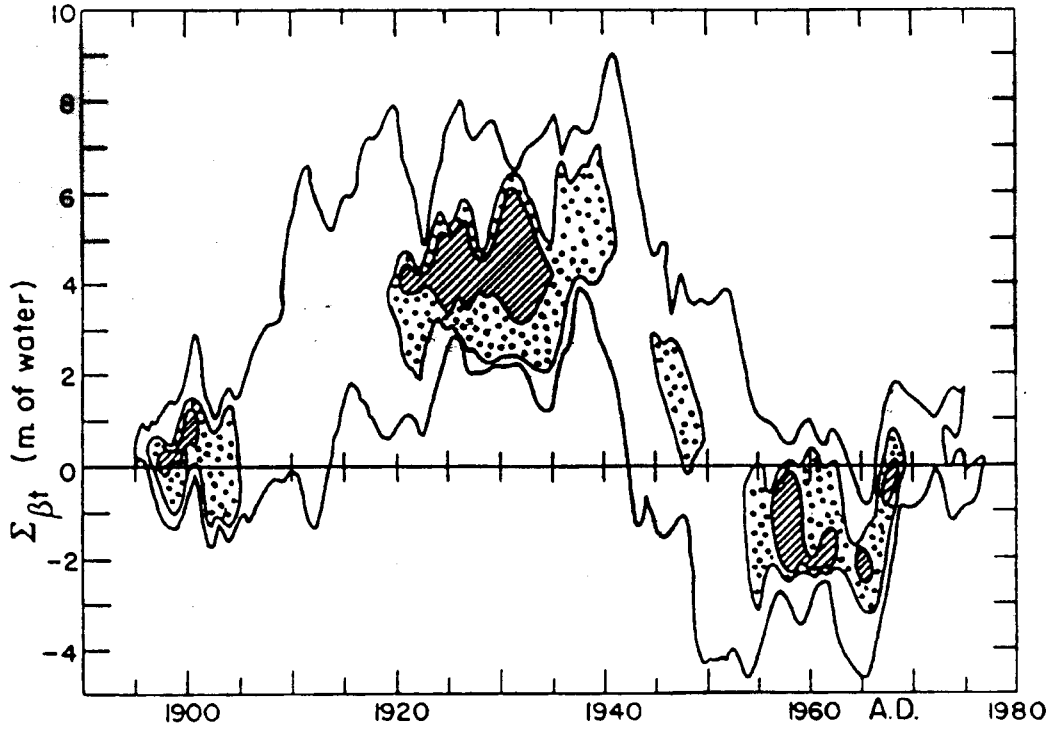


FIGURE 5.5

LES BILANS DE MASSE ANNUELS DEDUITS DES OBSERVATIONS METEOROLOGIQUES SEMBLENT, LORSQUE LEUR PRECISION PEUT ETRE ESTIMEE, ENTACHES D'UNE INCERTITUDE DE L'ORDRE DE 50 CM D'EQUIVALENT EN EAU. LE BRUIT CORRESPONDANT, CUMULE SUR UN SIECLE PEUT ETRE CONSIDERABLE ET TOUTE COMPARAISON DOIT EN TENIR COMPTE, NOTAMMENT LORS DE COMPARAISONS ENTRE MASSIFS ELOIGNES. ICI, POUR QUATRE GLACIERS EUROPEENS (ALPES, SCANDINAVIE, OURAL ET CAUCASE) UN SIGNAL COMMUN SIGNIFICATIF APPARAIT NEANMOINS : BILANS FAVORABLES DE 1900 à 1925 (ENVIRON + 0,16M D'EAU PAR AN PAR RAPPORT A LA MOYENNE 1890-1975), BILANS DEFAVORABLES DE 1935 à 1960 (ENVIRON - 0,24 M D'EAU PAR AN) PUIS DES BILANS à NOUVEAU FAVORABLE DEPUIS 1965.

Néanmoins avant d'en tirer des conclusions définitives, il conviendrait de reprendre toutes ces séries reconstituées pour en faire une analyse objective commune en partant des mêmes critères de test et d'établissement.

Ceci représente un très gros travail car il faut se procurer les séries de températures et précipitations des stations météorologiques utilisées. Cependant le contexte de collaboration internationale dans ce domaine est favorable et ce projet fait partie des options à court terme du W.G.M.G (World Glacier Monitoring Service).

II.1.3 - Application de l'imagerie satéllitaire au suivi des fluctuations glaciaires

Les projets ATP Télédétection 1986 et 1988 (LGGE-LAMA) nous ont permis d'analyser les potentialités d'utilisation des images SPOT pour le suivi des variations de la ligne de névé et la reconstitution des fluctuations de bilan. Sur le cycle 1986-87, les résultats obtenus sont conformes à la vérité terrain.

Cependant il apparait de sévères limitations dans l'obtention d'images utilisables sur de vastes espaces à la bonne époque en fonction des passages du satellite, de difficultés de programmation et des conditions météorologiques.

Néanmoins cette méthode doit se révéler particulièrement utile pour de vastes massifs montagneux pour suppléer à l'absence de mesures au sol. L'extension de la méthode aux glaciers péruviens de la Cordillère Blanche fait partie du projet de l'ATP 1988, car dans ce massif on dispose de la vérité terrain en 3 glaciers suivis par Hydrandina SA.

II.2 - RECONSTRUCTION DES BILANS DE MASSE A PARTIR DE DONNEES ANCIENNES

(L. Reynaud, M. Vallon, A. Letreguilly)

Toutes les tentatives faites précédemment (France, USA, URSS) partent de l'établissement d'une corrélation entre bilan et facteurs météorologiques sur une période plus ou moins longue (2 à 27 observations). Nous avons introduit une méthode originale pour exploiter directement des mesures glaciologiques anciennes (vitesse et variations de niveau) : l'équation de continuité permet d'écrire que le bilan d'une portion de glacier est égal à la différence entre les flux de glace entrant et sortant plus la variation du volume de glace dans cette région.

Cette méthode a été appliquée aux glaciers dont nous connaissions la topographie du lit (indispensable au calcul des flux). Les bilans ainsi calculés montrent, lorsque les données sont de bonne qualité (fluctuations interannuelles des vitesses bien mesurées) une excellente corrélation avec les bilans calculés par d'autres méthodes (Figure 5.6).

C'est actuellement la seule façon directe de tester les reconstructions de bilan sur un demi-siècle.

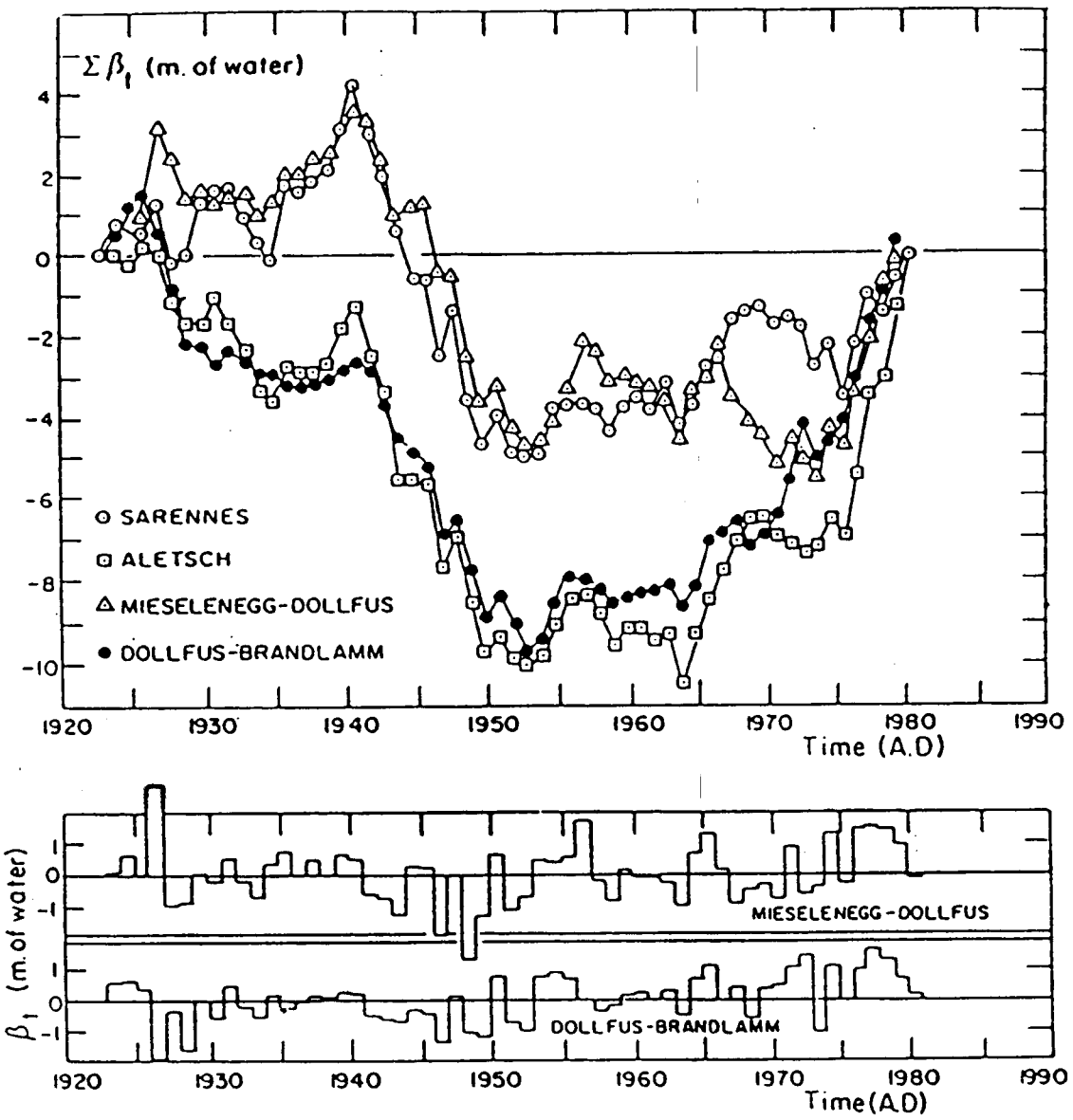


FIGURE 5.6

LES FORCES MOTRICES DE L'OBERSHASLI (KWO) DéTERMINENT CHAQUE ANNéE DEPUIS 1921. LES VARIATIONS D'ALTITUDE SUR 3 PROFILS TRANSVERSAUX DU GLACIER UNTERAAR (BASSIN DE LA LIMAT, SUISSE), ET ONT PROCéDé A LA PROSPECTION DU LIT ROCHEUX. CET ENSEMBLE DE MESURES, ENCORE INEXPLOITé, NOUS A FOURNI UN TEST D'APPLICATION DE LA MéTHODE DE CONTINUITé POUR LE CALCUL DU BILAN SUR LES 2 SECTEURS CONTIGUS, AINSI QUE POUR LA COMPARAISON DE 2 SéRIES DISPONIBLES SUR CETTE éPOQUE (SARENNES, FRANCE, ALETSCH, SUISSE)

(Reynaud, Vallon , Letréguilly, 1986, Journal of Glaciology).

Cette méthode qui est probablement la plus facile à mettre en oeuvre et la plus fiable pour l'étude du bilan moyen de régions difficiles à étudier par les méthodes classiques (régions crevassées, couverture morainique très variable) nécessitera la détermination de la topographie sous-glaciaire des glaciers montrant les meilleures séries d'observations anciennes (travail amorcé en aout 1983 par une campagne sismique sur le Glacier Noir).

II.3 - METHODOLOGIE DE MESURE

Depuis un quart de siècle que les mesures sur les glaciers alpins sont devenues plus intensives, certaines méthodes classiques se sont imposées tandis qu'on a cherché à en développer quelques autres soit pour rendre les usuelles plus performantes et adaptées soit pour obtenir de nouvelles données (exemple de la sonde à vapeur dont 2 exemplaires sont commercialisés en 1986). Parmi les réalisations effectuées on peut en signaler deux plus marquantes :

II.3.1 - Balises profondes type fil d'Ariane

(L. Reynaud, C. Rado, C. Girard, J. Perrin)

Cette réalisation répond au besoin d'assurer pendant plusieurs années la mesure du bilan sur des langues glaciaires où l'ablation est forte (> 10 m de glace/an) et où les moyens d'implantation habituels arrivent à leur limite. Pour cela il a été mis au point une balise en fil métallique, d'une centaine de mètres de longueur, permettant d'assurer la mesure de l'ablation sur 5 à 10 ans consécutifs, ainsi qu'une nouvelle sonde électrochaude originale (Rado et al., 1986, Journal of Glaciology). De plus ce nouveau type de mesure permet de définir le taux de contraction longitudinal et de montrer qu'il reste bien constant sur ces profondeurs comme on le suppose habituellement. Quatre sites sont actuellement équipés : Argentière, 2 sur Mer de Glace et Glacier Blanc.

II.3.2 - Mesures de vitesse sur le lit

(L. Reynaud, D. Donnou, J. Perrin, C. Rado, R. Ribola, C. Vincent)

De façon assez exceptionnelle, les captures d'eau sous-glaciaires d'EDF permettent d'accéder au lit rocheux. Un de ces sites a déjà été équipé de mesures de déplacement, qui ont apparemment montré des mouvements saccadés. En reprenant ces mesures avec un système réellement adapté à la mesure du glissement on obtient un mouvement très régulier. L'examen des systèmes antérieurement utilisés par d'autres auteurs montre que les saccades apparentes étaient en fait dues aux irrégularités de la surface et que cet effet n'avait pas été éliminé dans les enregistrements et dépouillements (Reynaud et al., C. R. Ac. Sci., 1988). Ces sites sous-glaciaires offrent d'autres possibilités de mesures telles que : mesures de la pression de l'eau à l'interface glace-rocher, et inclinométrie de la couche basale à forte déformation.

II.3.3 - La circulation de l'eau à l'intérieur des glaciers

L'exploration des moulins de la Mer de Glace en Novembre 1986 (Reynaud, 1987) a permis de suivre l'extension des cavités jusqu'à 100 m de profondeur. Ces connaissances ont été poursuivies en septembre 1987 et 1988 avec le concours des spéléologues "Drôme-Terre d'Aventure", FR3 et TF1 pour définir le mode de circulation de l'eau à partir de la surface vers la base du glacier. De plus ces cavités naturelles permettent de travailler in situ sur la structure de la glace de glacier.

II.3.4 - La dynamique glaciaire

Grâce aux séries de mesures annuelles systématiques des fluctuations glaciaires dans les Alpes Françaises, nous disposons aujourd'hui d'une base de données assez exceptionnelle pour définir les modèles de fluctuation. Il s'avère que les concepts théoriques usuels sont loin d'être vérifiés, notamment celui d'une relation étroite entre la vitesse et l'épaisseur. Cela explique pourquoi toutes les modélisations basées sur cette relation sont inopérantes. Il apparait bien que la mécanique du glacier doit être envisagée d'une façon globale (Lliboutry et Reynaud, 1980) et que l'origine de toute modification est généralement initiée dans la partie haute du glacier en relation avec les conditions de glissement à la base du glacier sur la frontière du lit ; tout ce qui se passe plus bas n'est qu'une conséquence de ces variations.

Les nouvelles évidences phénoménologiques ont pour conséquence de rendre caduque une bonne partie des concepts habituels et de déplacer le problème de recherche vers la mesure des caractéristiques dynamiques des zones supérieures et de le focaliser sur les conditions à la base ce qui beaucoup plus difficile (Reynaud, 1987).

Dans ce contexte il faut faire évoluer nos déterminations de terrain pour détailler ces mécanismes sur les glaciers les plus propices à ces relevés, tels qu'Argentière, Mer de Glace ou Glacier-Blanc.

II.4 - APPLICATIONS PRATIQUES

(M. Vallon, L. Reynaud, C. Vincent)

Les glaciers des Alpes sont sources d'eau, domaine de loisir (alpinisme et ski) et aussi malheureusement origine de risques naturels. Ces diverses facettes nous impliquent dans l'activité régionale lorsque les utilisateurs ou riverains sont confrontés aux multiples problèmes causés par les variations des glaciers. Pour le problème des captures d'eau le LGGE suit les variations du Glacier d'Argentière, tandis que pour les problèmes posés par le crevassement et l'augmentation des glaciers, évaluation de stock de névé, il conseille quelques stations de ski sur glacier.

Enfin récemment, les travaux menés par M. VALLON sur le glacier d'ARSINE ont permis de préciser l'éventualité d'une lave torrentielle sur la vallée de la Guisane par vidange catastrophique du lac progla-

ciaire morainique et d'alerter les autorités compétentes pour réaliser des travaux préventifs dès 1986.

Ce type d'activité de conseil est en train de se développer fortement du fait des avancées récentes des glaciers et des extensions d'utilisations modernes du domaine glaciaire. Notre connaissance des mécanismes fondamentaux nous situe en amont de ces applications et notre ambition en participant à ces multiples contrats d'étude est d'y trouver l'occasion d'étendre notre système de mesures fondamentales, d'appliquer nos modèles d'évolution et de nous impliquer dans les définitions et préventions des risques naturels d'origine glaciaire.

II.5 - LA LOGISTIQUE ALPINE - LES REFUGES
(L. Reynaud, C. Vincent)

Pour faciliter l'accès et le séjour sur les glaciers, le laboratoire a été amené à édifier quelques constructions légères près des glaciers où se déroulent les principales expériences.

L'entretien de ces constructions soumises à de rudes agressions climatiques (et quelquefois aussi de touristes inconscients) est généralement effectué au cours des séjours habituels, dans le but d'éviter les déteriorations ou d'en améliorer le fonctionnement (maintenance hors gel, chambres froides...).

Récemment, un partage des facilités offertes par l'Observatoire Vallot (4300 m) avec une équipe de médecins travaillant sur la physiologie de haute altitude a amené le CNRS à passer un contrat avec l'ARPE. C'est ainsi que cet observatoire, encore intact depuis le début du siècle, a été rationnellement aménagé (isolation, place, sécurité).

La reconstruction en cours du Refuge des Cosmiques va nous permettre de disposer d'un local à proximité du Col du Midi (3660 m).

III - COLLABORATIONS ET CONTRATS

Cette équipe collabore avec :

- CEMAGREF (§ II.1, II.2, II.4)
- Ecole Polytechnique Zurich (VAW-ETH) (§ II.1, II.2)
- ER 30 du CNRS (§ II.1, II.2)
- Institut fur Meteorologie (Innsbruck) (§ II.1)

- Electroperu, Huaraz (Pérou) (§ II.1)
- GRPH Savoie (Annecy) (§ II.3)
- Emosson SA (Martigny, Suisse) (§ II.3)
- Restauration des terrains en Montagne (RTM Gap) (§ II.4)
- Protection Civile des Hautes Alpes (Gap) (§ II.4)
- Club Alpin Français (§ II.5)
- Mairie de Chamonix (Ville et Musée) (§ II.5)
- Association de la Recherche sur la Physiologie de l'Environnement (§ II.5)
- Ecole Nationale de Ski et d'Alpinisme (§ II.5)
- Ingeonimas, Bogota : Nevado el Ruiz (convenio Ingeonimas, UI Grenoble)
- UNAM Mexico, Volcan Popocatepelt

Elle bénéficie des contrats suivants :

- Parcs nationaux : Vanoise, Ecrins (§ II.1; II.4)
- Emosson SA (Société Franco-Suisse sur Argentière) (§ II.4)
- Station des Grands Montets (Chamonix) (§ II.4)
- SADHA : Aménagement Hautes-Alpes (§ II.4)
- Station des Arcs (Savoie)
- Station de la Plagne (Savoie)
- Station des 2 Alpes (Isère)
- Station de la Grave (Hautes-Alpes)
- Raccordo Autostradale del valle d'Aosta (Glacier de la Brenva)

IV - LISTE DES PUBLICATIONS

IV.1 - REVUES A LECTEUR

Pettre P., Pinglot J.F., Pourchet M. and Reynaud L., 1986 :
Accumulation distribution in Terre Adélie (Antarctic area); effects of meteorological parameters, *J. of Glaciology, 32*, 112, 486-500

Lliboutry L., 1986 :
Realistic, yet simple bottom boundary conditions for glaciers, Chapman Conference on fast glacier flow, Whistler Village, B.C. Canada, May 4-8, 1986, *J. of Geophys. Res.*

Reynaud L.. Vallon M. and Letreguilly A., 1986 :
Mass balance measurements : problems and two new methods to determine variations, *J. of Glaciology, 32*, 112, 446-454.

Reynaud L., 1986 :
Satellite atlas of glaciers : French Alps, Chapter 5, subchapter 5.1.3, US Geological Survey Professional Paper 1386-E, (Williams R.S. Jr. and J.G. Ferrigno eds.).

Lliboutry L., 1986 :
South America Southern part, chapter 11B, US Geological Survey Professional Paper (Williams R.S. Jr. and J.G Ferrigno eds.)

Reynaud L., 1987 :
The november 1986 survey of the Grand Moulin on the Mer de Glace, Mt Blanc massif, France, *J. of Glaciology, 33*, 113.

Letréguilly A., Reynaud L., 1988 :
Spatial patterns of mass balance fluctuations of North American Glaciers, *Accepted by J. of Glaciology.*

Reynaud L., Donnou D., Perrin J., Ribola R. et Vincent C., 1988 :
Caractéristiques de la vitesse de glissement de la glace sur le lit rocheux. Glacier d'Argentière, Massif du Mont-Blanc, France. *C. R. Acad. Sci. Paris, 307, série 2,* 1519-1522.

IV.2 - COLLOQUES : COMPTES-RENDUS, COMMUNICATIONS

Lliboutry L., 1986 :
Rock glaciers in dry Andes, Glacier Mass balances, fluctuations and runoff, Int. Symposium in Alma-Ata, 30 sept.-5 oct. 1985, *Data of Glaciological Studies, 58,* 18-25

Vallon M., Reynaud L. and Letréguilly, A., 1986 :
Glacial mass balance reconstruction for the Northern Hemisphere during the last century and their climatic signification, International Symposium on the Glacier Mass Balance Fluctuations and Runoff, Alma-Ata, URSS, 30 Sept.-6 Oct. 1985, *Data of Glaciological Studies, 57,* 20-25.

Letreguilly A., 1986 :
Bilans de masse des glaciers alpins. Méthodes de mesure et répartition spatio-temporelle. *La Houille Blanche, 3* 241-244.

Reynaud L., 1987 :
What do Alpine Glacier fluctuations tell us about climatic changes in the last century ?, *Glaciers anc Climatic Change*, Amsterdam, 1-5 Juin.

Vallon M., 1987 :
Glaciologie à Kerguelen,*Colloque CNFRA sur la Recherche Française dans les Terres Australes,* Strasbourg, 14-17 Sept.

Vallon M., 1988 :
Evolution, water balance, potential hazards and control of a pro-glacial lake in the French Alps, *Symposium on Snow and Glacier Research,* 4-9 Sept., Lom, Norway.

Letréguilly A. and Reynaud L., 1988 :
Past and forecasted fluctuations of the Glacier Blanc (French Alps), *Symposium on Snow and Glacier Research* 4-9 Sept., Lom, Norway (Annals of Glaciology).

IV.3 - AUTRES PUBLICATIONS

Jaubert J.P., Dautrey C. et Reynaud L., 1986 :
Le Glacier Blanc et le Glacier Noir, Coopérative de l'Enseignement Laic, Cannes, 50 p.

Reynaud L., 1986 :
Un glacier de Vanoise : Gebroulaz, Edité par le Parc National de la Vanoise, Chambéry, 20 p.

Reynaud L., 1986 :
Utilisation des documents photogrammétriques dans l' évolution et la prévision des risques naturels d'origine glaciaire, 13e Colloque Technique National de l'Association Française de Topographie, 25-26 Avril Grenoble.

Vallon M., Créancier P., Gelbert C., Carle C., Ricard M., Edouard, J.L., 1986 :
Le Glacier d'Arsine, Evolution récente, S.H.F., Section de Glaciologie, 11-12 Mars, Paris.

Letreguilly A., 1986 :
Variations du bilan de masse glaciaire sur l'Hémisphère Nord, S.H.F., Section de Glaciologie, 11-12 Mars, Paris.

Reynaud, L. :
Mais que font les Glaciers ? *Alpinisme et Randonnée, 101*, 26-31 (1987).

Reynaud L., 1988 :
Gébroulaz, un glacier de Vanoise, édité par le Laboratoire de Glaciologie en collaboration avec le Parc National de la Vanoise, 24 p

Reynaud L., 1988 :
Le Glacier d'Argentière, édité par le Comité Scientifique des Réserves Naturelles de Haute-Savoie, 20 p.

Reynaud L., 1988 :
Alpine glacier fluctuations and climatic changes over the last century. Mitteilungen der Versuchsantalt fur Wasserbau Hydrologie und Glazialgeologie nr. 94 : Schnee Eis und Wasser Alpiner Gletscher, Zurich, 26 Januar, 127-146.

Reynaud L., 1988 :
Les variations des glaciers dans les Alpes Françaises et leurs conséquences sur l'utilisation du domaine glaciaire. *Neiges et Avalanches, 45*, 3-12.

IV - AUTRES FORMES DE PARTICIPATION A LA RECHERCHE

Les membres de l'équipe ont participé à des missions d'expertise à l'étranger :

- Expertise glaciologique pour l'aménagement du Rio Santa Cruz (lagos Argentino y viedma) pour Aqua y Energia Argentina (M. Vallon du 1er au 30 mars 1986).
- Mission glacio-volcanologique au volcan Popocatepelt (L. Reynaud du 2 au 16 avril 1986).
- Mission glaciologique au Spitzberg : Glacier d'Austofonna
- Coopération Anglo-Franco-Norvégienne (M. Vallon et C. Rado du 29 avril au 5 juin 1986).
- Mission glacio-volcanologique au Nevado el Ruiz, Colombie (juillet 1986 et février 1987).

Plusieurs conférences ont été données dont un cycle au Centre Régional de Documentation Pédagogique de Grenoble :

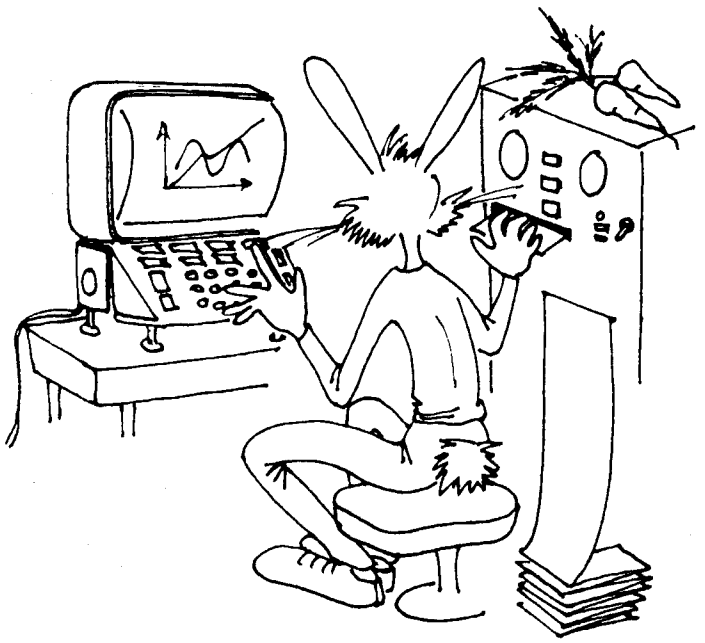
. L. Liboutry	Glace et Glaciologie dans l'Histoire des Sciences
. L. Reynaud	Les glaciers alpins de 1840 à nos jours
. M. Vallon	La répartition des glaciers dans le Monde et leur fonctionnement
. L. Lliboutry	Idées actuelles sur l'origine des grandes glaciations
et	
. L. Reynaud	Investigaciones glaciologicas y vulcanologicas en el Popocatepetl (Universitad Mexico, 15 abril 1986).
. L. Reynaud	Investigaciones Glaciologicas sobre el volcan Nevado el Ruiz (Manizales y Bogota) Juillet 1986 et février 1987.

On peut noter aussi la participation à des émissions radio et télévision (France Culture, FR3, TF1 et A2...) et des interviews pour les journaux locaux.

Au niveau scolaire, plusieurs conférences ont été faites dans les Collèges et Lycées ainsi qu'au CCST de Grenoble et une BT sur "Le Glacier Blanc et le Glacier Noir" a été réalisée (Pédagogie Freinet).

++++
++

CHAPITRE VI



MODELISATION NUMERIQUE DES ECOULEMENTS DE GLACE

I - OBJECTIF GENERAL A MOYEN ET LONG TERME

Ce travail s'insère dans le cadre des recherches menées au laboratoire concernant notamment :

. les archives glaciaires du climat,
. les fluctuations des glaciers alpins,
. la mécanique de la glace.

Celles-ci requièrent une description de l'écoulement de la glace dans des situations diverses.

Il s'agit donc de poser des problèmes, notamment de choisir un certain nombre d'hypothèses et de modèles physiques de base (rhéologie du matériau, conditions aux limites, ...), puis de les résoudre, le plus souvent numériquement compte-tenu de leur complexité.

De la nature des écoulements envisagés découle la division en deux secteurs :

. modélisation des glaciers et calottes polaires,
. modélisation de l'interaction glace structure.

II - RESULTATS MAJEURS OBTENUS DEPUIS LE DERNIER RAPPORT

II.1 - MODELISATION DES CALOTTES POLAIRES

II.1.1 - Objectif

La modélisation de l'écoulement de la glace des calottes polaires a pour but d'une part de fournir un outil pour l'interprétation des forages profonds (datation, origine de la glace), d'autre part d'étudier leur évolution et leur rôle dans le système climatique.

Il s'agit de calculer les champs couplés de vitesses et de température dans une nappe de glace qui s'écoule sous l'action la gravité. La loi de déformation de la glace est en effet fortement dépendante de la température, la viscosité variant de ce fait d'un facteur 500 entre -50°C et 0 °C. Réciproquement, le transport de frigories par l'écoulement de la glace (advection) est un processus important qu'il faut prendre en compte pour déterminer le champ de température.

Dans la littérature, les modèles de calottes polaires sont de deux types :

. soit des modèles forcés, qui donnent le champ de vitesse à partir de la géométrie et du bilan en supposant l'état stationnaire. C'est à partir de ce type de modèle que sont calculés, par exemple, l'âge dans les forages ou le champ de températures en fonction des variations passées du climat.

. soit des modèles d'évolution, qui supposent une relation entre pente de la surface et vitesse d'écoulement, et en déduisent les variations d'épaisseur en écrivant la conservation de la masse. Ces modèles ne tiennent en général pas compte du champ de température et ne peuvent donc simuler l'influence des variations de température sur l'écoulement.

Notre but est de développer un modèle d'évolution couplé qui comblerait cette lacune. Pour celà nous avons porté notre intérêt sur la modélisation du champ de température dépendant du temps. La première étape a été de l'utiliser dans le cadre d'un modèle forcé afin de définir les processus et paramètres importants (en particulier les conditions aux limites) puis de l'appliquer à l'interprétation d'un profil de température mesuré. Le couplage avec l'écoulement et le calcul des variations d'épaisseur qui en découlent sont en cours.

II.1.2 - Paramétrisation des conditions aux limites dépendantes du temps, pour la modélisation du champ de températures dans les calottes polaires

(C. Ritz)

Le modèle résoud l'équation de la chaleur dépendante du temps, pour une ligne de courant. Les paramètres les plus importants sont les conditions aux limites (température en surface et flux géothermique au fond du glacier), l'épaisseur de glace et l'accumulation qui dans le cas stationnaire est la condition à la limite supérieure de la vitesse verticale et gouverne donc le processus d'advection.

Plusieurs auteurs ont envisagé des perturbations de la température en surface afin d'interpréter les quelques profils de température mesurés dans les trous de forage, les autres paramètres étant supposés constants.

Afin de mieux simuler les états transitoires nous avons étudié les variations de ces paramètres en réponse à des perturbations climatiques que leur rétroaction sur le champ de température (C. Ritz, 1987).

. Pour le flux géothermique, il a fallu introduire dans le modèle une couche de socle rocheux dans laquelle est également résolue l'équation de la chaleur. Nous avons montré que cette précaution est indispensable pour bien simuler l'amplitude des variations de température à l'interface glace-rocher au cours de cycles climatiques. Grace à cette étude, nous avons déterminé l'épaisseur optimale à utiliser (5 km) (Figure 6.1)

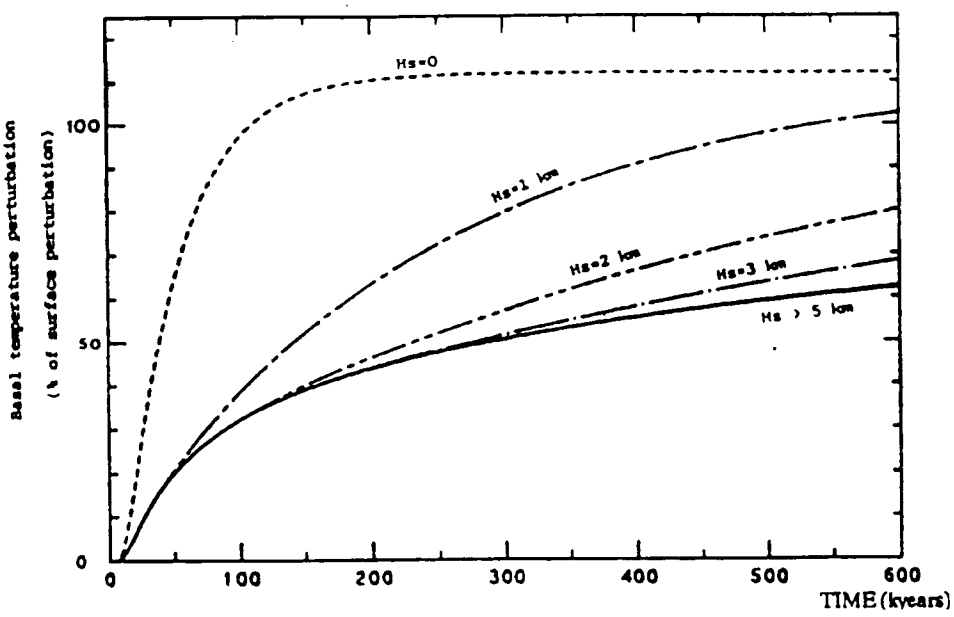


FIGURE 6.1
REPONSE A UN CHANGEMENT EN ESCALIERS DANS LA TEMPERATURE DE SURFACE. LA VARIATION DE TEMPERATURE BASALE EST CALCULEE AVEC DES EPAISSEURS DIFFERENTES DE LA COUCHE DE ROCHER (Hs).

. L'introduction des variations d'épaisseur a été faite grace à un maillage déformable. Les études de sensibilité ont montré que pour une même variation d'accumulation l'évolution de la température basale est très différente selon la prise en compte ou non des variations d'épaisseur résultantes.

II.1.3 - Interprétation du profil de température mesuré à Vostok *(C. Ritz)*

Notre but était de déterminer quelles informations il est possible d'obtenir à partir d'un profil de température mesuré. Le forage de Vostok est idéal pour ce type d'interprétation car nous disposons d'une reconstruction de la température en surface sur 160000 ans. De plus la fonction de transfert (utilisée pour la datation) qui relie température et accumulation est confirmée par les données de Berylium 10. Enfin,dans cette zone centrale de l'Antarctique il est possible d'estimer une limite maximum des variations d'épaisseur passées, celles ci étant essentiellement gouvernées par les variations d'accumulation.

Comme toujours dans ce type de problème, il existe plusieurs jeux de paramètres permettant de simuler le profil de température mesuré (à 0.1°C près). Cependant, nous montrons qu'au site même de Vostok, la

base du glacier est au point de fusion. Cela permet de donner une limite supérieure pour l'accumulation actuelle (l'accumulation passée s'en déduisant grace à l'enregistrement isotopique). Cette limite (2.6 cm/an) est la valeur supérieure donnée par les mesures de surface utilisées dans la datation. Etant donné la sensibilité de la datation à l'accumulation, cela valide la datation obtenue. Il est également possible de déterminer une valeur inférieure pour le flux géothermique (50 mW/m^2). Il n'y a pas une très grande différence avec la valeur communément utilisée (le flux moyen pour un bouclier précambrien soit 40 mW/m^2), mais cela conduit à une différence supérieure à 10°C à la base du glacier, ce qui signifie un rapport de vitesses égal à 5. Cette sensibilité au flux géothermique met en évidence un des problèmes majeurs de la modélisation à grande échelle de l'Antarctique, le flux géothermique étant très mal connu. Réciproquement, remarquons que ce type de modèle offre une possibilité de détermination du flux à partir non seulement de mesures in situ mais aussi des mesures par échos radar qui donnent les zones de fusion et mieux encore les lacs sous-glaciaires.

II.1.4 - Modèle de comportement pour la couche basale
(J. Meyssonnier)

L'établissement des modèles d'écoulement des glaciers et calottes polaires nécéssite impérativement une modélisation correcte des conditions aux limites à appliquer à leur base.

Etant donné les dimensions de ces masses de glace, la représentation de leurs limites n'est possible que via un lissage de leurs lits réels (par ailleurs plus ou moins bien identifiés).

Les différentes "lois de glissement" (ou "lois de frottement") reconnues en glaciologie, intègrent les processus actifs à très petite échelle (≈ millimétrique) pour donner des relations entre vitesse et frottement, ou frottement et pression effective, valables à l'échelle de lissage employée pour représenter le lit glaciaire. Ces lois concernent la glace basale temperée des glaciers et calottes polaires (pour celles-ci, la température augmente de la surface au socle où le point de fusion peut être atteint dans les régions centrales sous une épaisseur de 3000m). Elles sont établies en adoptant la loi puissance 3 isotrope (loi de Glen) qui correspond au fluage tertiaire avec fabrique à plusieurs maximums.

L'utilisation de cette loi suppose que la glace se déforme sous sollicitations constantes, ce qui n'est évidemment pas le cas au contact du lit au cours d'un franchissement d'obstacle. D'autre part certains auteurs ont trouvé un exposant supérieur à 3 pour les fortes contraintes susceptibles de régner à l'amont des bosses.

Une étude expérimentale et numérique (à paraître au Journal of Glaciology) a permis de montrer que l'emploi de la loi de Glen d'exposant 3 reste justifié s'il s'agit de modéliser le glissement d'un glacier en régime stationnaire: dans ce cas l'influence du fluage transitoire à la décharge, mis en évidence à l'aval d'un obstacle, reste négligeable. La comparaison avec l'expérience d'une simulation numérique effectuée avec un exposant égal à 5 pour les valeurs de la

cission efficace $\tau = (\sigma' \sigma' / 2)$ supérieures à 1 MPa a montré que cet
$ij\ ij$
effet peut également être négligé dans l'établissement des lois de glissement.

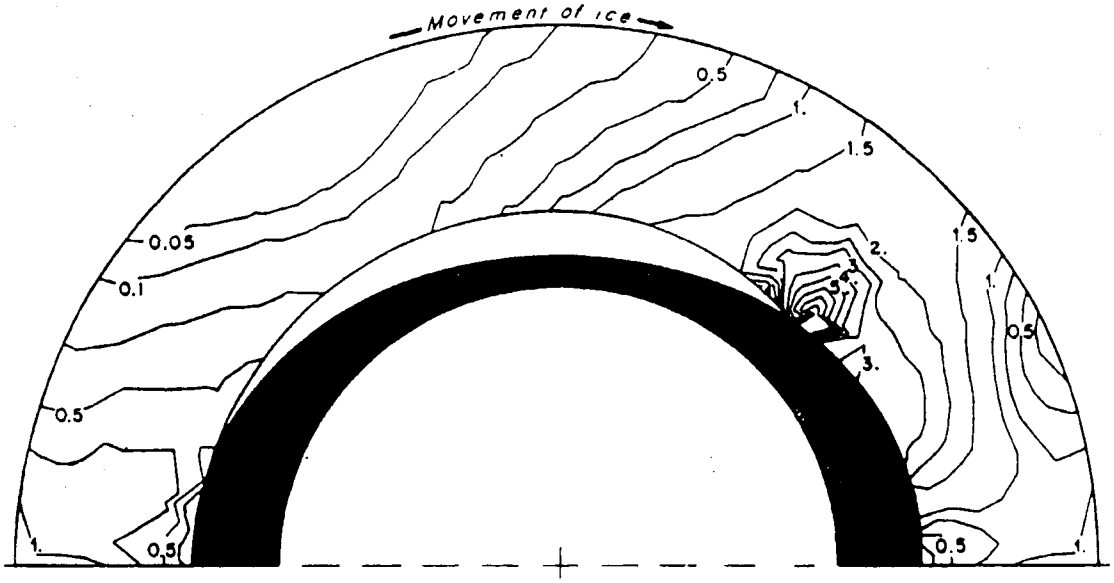


FIGURE 6.2
COURBE ISOVALEURS DE LA VITESSE DE CISAILLEMENT EFFICACE
(LOI DE GLEN n=3) - VALEURS ADIMENSIONNELLES

II.1.5 - Outil de calcul

Le code d'éléments-finis décrit dans le précédent rapport a été développé pour prendre en compte des lois de comportement faisant intervenir des variables internes définies soit aux noeuds du maillage, soit aux points d'intégration de chaque élément. La possibilité de traiter l'écoulement d'un fluide visco-élastique en utilisant une description Lagrangienne réactualisée a également été implantée, ainsi que celle de couplage avec la résolution de l'équation aux températures. Ce travail ayant été effectué dans un laboratoire d'accueil en marge d'un autre programme, n'a pu être que partiellement testé. Sa mise au point définitive attend le fonctionnement du nouveau matériel informatique dont a été doté le laboratoire.

II. 2 - MODELISATION ET GEODYNAMIQUE DES ZONES DE SUBDUCTION
(J.M. Vanpé)

RAPPEL des résultats obtenus précédemment par J.M. VANPE (84-86) par simulation numérique de la convection dans une zone de subduction.

Après avoir défini la structure et la rhéologie de la lithosphère, ce modèle a servi de base pour étudier et préciser les interactions complexes entre le manteau et la plaque de lithosphère chevauchante. Cette étude a permis de définir un modèle physique général reliant de façon satisfaisante des phénomènes étudiés jusqu'à présent indépendam-

. magmatisme d'arc ou continental,
. sa migration et son évolution,
. sismicité interplaque et lien entre la magnitude et les phases d'ouverture d'un bassin marginal,
. l'importance de la migration de la fosse dans l'étude des transferts de matière et de chaleur a été démontrée ainsi que celle de l'évolution vers une convection induite de type mécanique (le moteur principal est le mouvement des plaques).

La deuxième partie de la thèse d'Etat de J.M. VANPE (1989) a porté sur l'application de ces résultats à la marge S.W. de la plaque Pacifique.

Dans le cadre d'un contrat avec l'IFREMER (J.C. SIBUET, H. BOUGAULT) ce modèle a aussi été appliqué au dépouillement des données obtenues par les campagnes IFREMER dans le bassin d'Okinawa (subduction des Riou-Kiou).

II.2.1 - Zone de subduction Tonga-Kermadec-Hikurangi:

Cette zone linéaire comporte une transition latérale subduction océanique-continentale. L'étude a porté d'abord sur l'évolution de la plaque continentale (Ile Nord de la Nouvelle Zélande) lors du cycle d'ouverture d'un bassin marginal dans la plaque océanique adjacente (bassin sud des Fidji, bassin Lau-Havre). Ce travail a été étendu et remis dans le contexte plus général de la convergence entre les plaques Pacifique et Indo-australienne (Thèse Vanpé + article. à soumettre à Tectonics).

Certains points particuliers ont été précisés comme :

. La formation anormale à l'Oligocène d'un bassin marginal à trois branches (bassin sud des Fidji) que nous avons relié au blocage progressif de la subduction le long de la fosse de Vitiaz (53 Ma, BP) conduisant à la modification de la rotation de la plaque Pacifique (43 Ma, BP). Ceci a changé la répartition des zones de subduction, provoquant une interaction transitoire entre une convection déclinante et une convection naissante plus vigoureuse et un état de contraintes transitoire dans la lithosphère chevauchante (Congrès EGS, 1986, communication 1 et soumis à GRL,1989).

. Discussion sur le synchronisme entre une modification récente (5 à 10 Ma) de la vitesse de la plaque Pacifique, et l'évolution de sa marge sud-ouest (point chaud des iles Australes, ouverture de bassins, orogénèse des Alpes N.Z.).

. Formation des Alpes néo-zélandaises à partir de la faille transformante (Alpine fault) reliant deux zones de subduction océaniques opposées par réorientation de la contrainte compressive.

. Initiation ou accélération du phénomène d'ouverture du bassin inter-arc Lau-Havre (Congrès E.G.S., 1986, communication 2 et Nature).

Pour une plaque chevauchante continentale nous avons mis en lumière l'importance :

1) de la structure géologique antérieure (sutures, rajeunissement de la lithosphère, marges continentales, anomalies de densité),
2) de la rhéologie des matériaux lithosphériques pour expliquer l'évolution tectonique et magmatique de cette plaque (application à la Nouvelle Zélande, Congrès commun EUG-EGS, 1987, 1 communication). Dans ce cas particulier, la corrélation entre le type de magmatisme, sa répartition et l'évolution de la convection induite migrant sous la plaque chevauchante à été clairement mise en évidence (soumis à EPSL, 1989).

II.2.2 - Zone de subduction Okinawa

Pour la subduction de la plaque Philippine sous L'Eurasie au niveau du bassin d'Okinawa, le facteur prépondérant mis en évidence pour expliquer l'ouverture du bassin est le phénomène d'ancrage latéral de la subduction au niveau de Taiwan. Il influence toute la moitié sud du bassin et explique la géométrie par une ouverture semi-passive (pull-apart basin). Une évolution similaire à celle du bassin Lau (extrémité nord de la fosse des Tonga), avec ouverture en éventail semble probable.

La convection sous-jacente a un effet secondaire dans ce cas, et l'absence de données précises sur l'évolution antérieure de la région ainsi que son caractère 3-D ont limité l'utilisation de notre modèle. Il n'a pas été possible de caler et initialiser la simulation numérique de la convection induite (absence de données fiables pour définir les conditions aux limites latérales dans le manteau) Cependant,en introduisant les interactions thermomécaniques à la base de la lithosphère nous avons pu mieux expliquer le comportement de la partie centrale du bassin.

II.3 - REACTION D'UNE CALOTTE A UNE MODIFICATION CLIMATIQUE
(J.M. Vanpé)

L'inventaire et le suivi des données sur la structure du socle et la tectonique antérieure de la plaque antarctique ont été entrepris. Ceci constitue une simple extension de la zone sud pacifique étudiée pour la thèse. Ce travail est primordial pour permettre de caler et tester les modèles numériques de la calotte antarctique et les étendre au niveau du shelf. Il conditionne l'introduction d'une répartition plus régionale du flux géothermique à la base et de la réponse isostatique du socle d'une calotte.

III - COLLABORATIONS ET CONTRATS

III.1 - COLLABORATIONS INTERNATIONALES

C. Ritz a travaillé pendant trois mois en 1988 au département du Professeur Budd (Météorologie) à l'Université de Melbourne. Le but de ce séjour était d'étudier les différents modèles développés par ce groupe, et en particulier celui de D. Jenssen qui est un modèle tridimensionnel stationnaire.

En décembre 1988, J. Oerlemans est venu faire une conférence sur la modélisation des glaciers Alpins.

III.2 - COLLABORATIONS NATIONALES

Sur le plan national, cette équipe collabore avec :

. le GRGS de Toulouse: Etude des calottes polaires par satellite. (J.F. Minster, M. Lefevre, F. Remy)
. Anomalies du géoide, structure du bassin sud Pacifique (A. Cazenave)
. l'IFREMER : étude du bassin d'Okinawa (J.C. Sibuet, H. Bougault).
. Le Laboratoire de Géodynamique (Orsay) : étude des mouvements de la plaque Pacifique à partir des lignes de Guyots (N. Baudry, M. Diament, Y. Ricard, L. Fleitout)
. l'IRIGM : Laboratoire de Géophysique Interne et de Tectonophysique : reconstruction des plaques lithosphériques de la région du Pacifique, avec Peter Molnar qui y a effectué un stage.
. J. Ferrière (Université de Lille) : Géologie de la Nouvelle Zélande

III.3 - CONTRATS

IFREMER jusqu'en mars 88 : Evolution du bassin d'Okinawa.
PNEDC (Modélisation)
PNEDC (Hautes Latitudes)

IV - LISTE DES PUBLICATIONS

IV.1 - REVUES A LECTEUR

Ritz C., 1987 :
Time dependent boundary conditions for calculation of temperature fields in ice sheets. *IAHS, 170,* 207-216.

Ritz C., 1989 :
Interpretation of the temperature profile measured at Vostok, East Antarctica. *Annals of Glaciology, 12,* 138-144.

Meyssonnier J., 1989 :
Ice flow over a bump : experiment and numerical simulations, *J. of Glaciology,* (sous presse)

IV.2 - COLLOQUES : COMPTES-RENDUS, COMMUNICATIONS

Vanpé J.M., 1986 :
Transfert sous une zone de subduction et évolution de la plaque chevauchante, 11ème RAST, Clermont-Ferrand, 25-27 mars 1986, 179.

Vanpé J.M., 1986 :
Lithosphere-mantle interactions in subduction zones : effects on the overriding plate evolution, EGS 11e General Assembly, Kiel, RFG, 25-30 aout 1986, *Terra Cognita, 6,*3.

Vanpé J.M., 1986 :
Subduction, tectonics and orogenic phase along the New-Zealand active margin, EGS 11e General Assembly, Kiel, RFG, 25-30 aout 1986, *Terra Cognita, 6,* 3.

Vanpé J.M., 1987 :
Evolution of continental subduction processes as a consequence of the Rheology, EUG-EGS joint meeting, Strasbourg, Avril 1987, *Terra Cognita, 7,* 2-3, 488.

Ritz C., 1987 :
Modelling temperature in ice sheets. Workshop on Modelling and computing in glaciers and ice, Bremerhaven 7-8 Dec. 1987

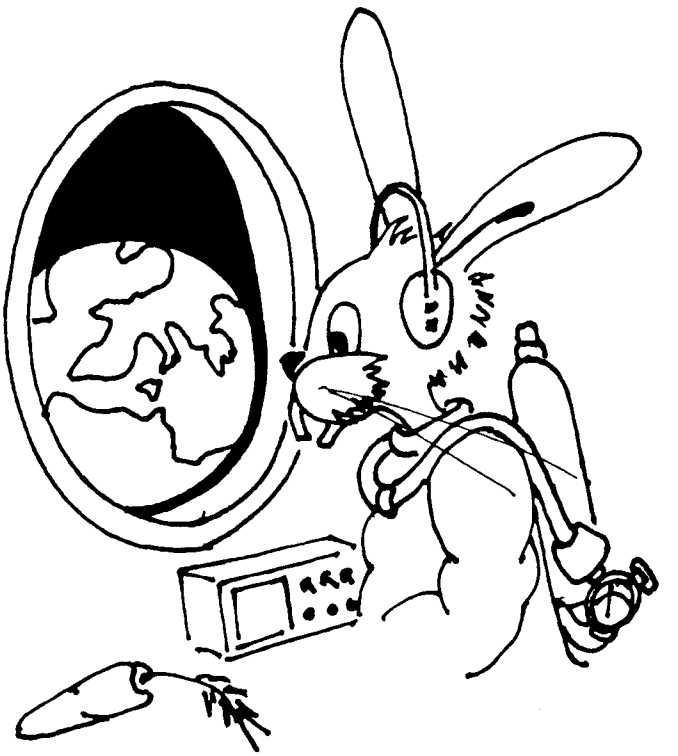
IV.3 - AUTRES PUBLICATIONS

Vanpé, J.M.:
Géodynamique interne des zones de subduction, Thèse de Doctorat d'Etat, USTMG (pour fin mai 1989).

Ritz C., 1988 :
Dating of the Vostok ice core by flow modeling. *SCAR, 3* 15-16.

++++
++

CHAPITRE VII



TELEDETECTION

I - OBJECTIF GENERAL A MOYEN ET LONG TERME

La télédétection est un outil de recherche nouveau au LGGE, appelé à se développer dans les prochaines années. Une grande couverture spatiale et la répétitivité des mesures dans le temps sont ses deux principaux avantages, d'autant plus importants que les régions qui nous intéressent sont difficiles d'accès.

Trois orientations principales ont été définies qui concernent l'Antarctique, les glaciers tempérés et la glace de mer. La partie qui concerne les glaciers tempérés est traitée dans le chapitre 5, nous n'aborderons donc ici que les deux autres thèmes.

Les études sur la glace de mer sont motivées par l'impact de celle-ci sur les échanges entre les océans et l'atmosphère dans les régions polaires. L'importance des zones d'eau libre dans ces échanges, la gêne constituée par la nuit polaire et la forte couverture nuageuse nous ont amené à étudier les possibilités de l'imagerie radar SAR (Synthetic Aperture Radar) qui offre une bonne résolution spatiale (30m) et une relative indépendance vis-à-vis des conditions atmosphériques et d'éclairement. De plus, de nombreuses données de ce type seront bientôt disponibles avec le satellite européen ERS1. Nous concentrerons alors nos études dans le secteur du détroit de Fram, entre le Spitzberg et le Groenland, où ont lieu plus de 80% des échanges entre l'Océan Arctique et le reste des océans.

En Antarctique le manque de données est un problème crucial dans le développpement des modèles d'évolution de la calotte. Notre objectif est de développer des méthodes permettant d'accéder à certaines de ces données par des moyens de télédétection. Il s'agit principalement de l'accumulation de neige et de la température de surface mais aussi, dans les zones côtières, de la dynamique des glaciers. Ce domaine d'étude est totalement nouveau au laboratoire et l'obtention de résultats significatifs nécessite un grand investissement. Cependant des résultats préliminaires peuvent d'ores et déja être présentés.

II - RESULTATS MAJEURS OBTENUS DEPUIS LE DERNIER RAPPORT

II.1 - GLACE DE MER

Jusqu'à présent notre travail de recherche a porté sur l'élaboration d'algorithmes de traitement de données SAR sur la glace de mer en collaboration avec le Polar Science Center, Seattle, USA. Ces algorithmes seront utilisés dans le cadre du projet Arctemiz en collaboration avec le LODYC (Laboratoire d'Océanographie Dynamique et de Climatologie).

II.1.1 - Algorithmes de traitement des données radar

Nous avons utilisé pour notre étude une paire d'images obtenues à trois jours d'intervalle par le SAR du satellite Seasat en Octobre 1978 au dessus de la mer de Beaufort dans une zone de banquise très dense (85% de glace environ). La résolution spatiale est de 25m et la taille des images de 100x100km environ.

Nous avons développé des algorithmes pour évaluer les grandeurs suivantes:

- concentration d'eau libre et de glace
- déplacement entre les deux images des points situés aux noeuds d'une grille régulière sur l'image A; la maille est de 2km
- modification des surfaces d'eau libre (ouverture ou fermeture) par combinaison des deux mesures précédentes.

Les résultats ont été comparés à des mesures effectuées "manuellement" par digitalisation.

Concernant les mesures de déplacement, la différence moyenne entre les déplacements obtenus automatiquement et manuellement est de 225m, la médiane est de 75m. De forts écarts apparaissent dans les zones très déformées. Par ailleurs les résultats restent comparables si l'on utilise des données moyennées (1 élément = 3x3 pixels), ce qui divise la taille numérique des images par 9 et est extrèmement intéressant d'un point de vue pratique.

Pour la quantification des ouvertures et fermetures d'eau libre, les résultats sont comparables à 20% près à ceux obtenus manuellement, ce qui est dans la limite des erreurs estimées sur ces dernières mesures. La qualité de la classification eau-glace apparait comme un élément essentiel tandis que la méthode de mesure adoptée ne nécessite pas de correction aux déplacements déterminés automatiquement.

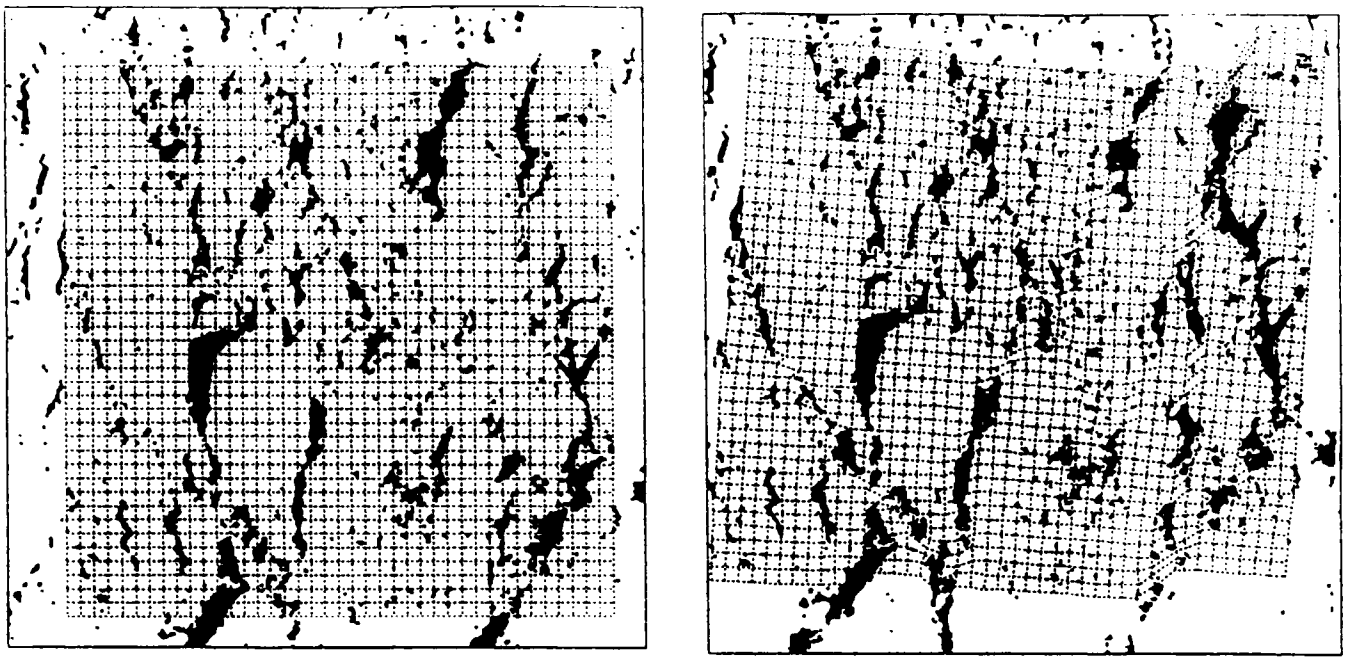


FIGURE 7-1
IMAGES BINAIRES DE LA GLACE DE MER (EAU LIBRE EN NOIR) AVEC GRILLES REGULIERE ET DEFORMEE, 3 JOURS APRES. LA GRILLE DEFORMEE EST OBTENUE PAR CALCUL DES DEPLACEMENTS DE CHAQUE NOEUD DE LA GRILLE REGULIERE. LA TAILLE DE L'IMAGE EST DE 100 X 100 KM ET CELLE D'UNE MAILLE DE 2.025 KM.

II.1.2 - Arctemiz

Les résultats présentés ci-dessus sont très encourageants quant à l'exploitation des données du futur satellite européen ERS1. Nous préparons actuellement l'exploitation de ces données dans le cadre du programme Arctemiz dirigé par J.C. Gascard du LODYC.

Nous participons activement au groupe international PIPOR (Program for International Polar Ocean Research) dont l'objectif est de coordonner la demande et l'emploi des données de ERS1 au dessus des océans polaires.

Plusieurs campagnes ont eu lieu sur le terrain dans le détroit de Fram avec notamment des études de courants marins et de dérive de glace. Les résultats de ces campagnes servent de support à l'échantillonnage spatial et temporel de la demande de données SAR.

II.2 - ANTARCTIQUE

Plusieurs types de données de surface indispensables à la modélisation de l'écoulement d'une calotte polaire sont accessibles par des méthodes de télédétection. Jusqu'à présent, dans la plupart des cas, seules des mesures ponctuelles ont été effectuées qui sont insuffisantes pour de telles étendues alors que la télédétection

permet d'effectuer des mesures globales et répétitives. Trois types d'application possibles sont présentés séparément ci-dessous bien que les informations que l'on puisse tirer des différents instruments ne sont pas indépendantes.

II.2.1 - Accumulation de neige

Les mesures de radiométrie effectuées dans le domaine des hyperfréquences permettent théoriquement de remonter à la valeur d'accumulation de neige. En effet l'émissivité de la surface dépend du profil de taille des grains, lui-même lié à l'accumulation car la taille des grains est fonction de l'âge du névé. Dans un premier temps nous cherchons à relier la radiométrie aux caractéristiques de surface telles que température, taille des grains, densité, stratigraphie avant d'accéder à la valeur d'accumulation.

Pour cette étude nous nous sommes procurés des données du SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer) du satellite Nimbus VII pour 4 périodes différentes de l'année 1981. Cinq fréquences sont disponibles avec cet instrument dans les deux polarisations verticale et horizontale (Tableau 1). Deux approches différentes sont utilisées: une analyse statistique et une modélisation de l'émissivité.

Tableau 1 : Données SMMR de Nimbus VII

fréquence (GHz)	6.6	10.7	18	21	37
résolution (Km)	150	100	60	60	30

Une analyse statistique en composantes principales nous a permis de constater que, malgré les 10 canaux disponibles, nous ne pourrons au maximum en tirer que 3 paramètres indépendants. Le tracé de cartes montre que la première de ces composantes est fortement liée à la température et à l'accumulation. Par contre l'interprétation des autres composantes est pour le moment en suspens. Par ailleurs le signal donné par les variations de la température de brillance en fonction de la fréquence est remarquablement stable dans le temps. Nous avons donc choisi un certain nombre de sites représentatifs sur la calotte dont nous essayons de comprendre les caractéristiques.

Pour cela nous utilisons un modèle de calcul d'émissivité de la surface basé sur la théorie des fortes fluctuations en électromagnétisme. Les données d'entrée de ce modèle sont les caractéristiques diélectriques de la glace pure, la densité du névé, sa température et la taille des grains de neige. Plusieurs couches de caractéristiques différentes peuvent être intégrées dans le modèle: croute de glace, givre de profondeur. Enfin un modèle de transfert atmosphérique permet de compléter le calcul bien que la composante atmosphérique soit presque négligeable en zone polaire. Nous retrouvons la forme générale du signal température de brillance/fréquence mais certains cas restent pour le moment complètement inexpliqués.

II.2.2 - Température de surface

Les études sur la température de surface se font dans le domaine de l'infrarouge, le problème majeur étant de distinguer les nuages de la glace. Nous nous sommes procurés les données du THIR (Temperature Humidity Infrared Radiometer) de Nimbus VII aux mêmes périodes que celles du SMMR. Cet instrument effectue des mesures dans deux canaux IR. Pendant ces périodes sont disponibles également des données au sol de plusieurs stations météorologiques automatiques AWS (Automatic Weather Station).

L'utilisation d'un modèle existant d'inversion s'est révélée plutôt décevante jusqu'à présent. Nous allons poursuivre notre travail dans ce domaine en étudiant les possibilités des données AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) des satellites NOAA qui comportent plusieurs canaux dans l'infrarouge.

II.2.3 - Cartographie en Terre-Adélie

Dans ce cadre nous étudions les possibilités qu'offre l'imagerie satellitaire dans le domaine du visible et du proche infrarouge. Il s'agit donc des données des satellites à haute résolution tels que SPOT ou Landsat et aussi de l'AVHRR de NOAA. Les études se font à une échelle locale (côte de Terre-Adélie) contrairement à celles vues précédemment. Elles concernent la recherche de zones de glace bleue, la détermination de déplacements en zone côtière et la nature des ondulations de surface.

La glace bleue est une glace ancienne qui affleure à la surface dans certaines zones côtières et est facile d'accès. Elle intéresse donc les paléoglaciologues. De plus ces zones sont parfois propices à la concentration des météorites en surface. La signature de cette glace dans le visible étant différente du névé, il est possible de la localiser par télédétection. Nous avons déjà quelques zones en Terre-Adélie à partir d'images Landsat ainsi que sur une image SPOT achetée par les Expéditions polaires.

Les déplacements seront obtenus par repérage de détails reconnaissables sur deux images SPOT prises à deux époques différentes : la première date de février 1987, la deuxième de janvier 1989.

Enfin des ondulations de surface sont visibles sur ces images que nous allons comparer aux données de terrain et à celles de l'altimètre de Seasat en collaboration avec le Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale de Toulouse.

III- COLLABORATIONS ET CONTRATS

Cette équipe collabore avec :

- Laboratoire d'Océanographie Dynamique et de Climatologie, Paris VI (J.C. Gascard)
- Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Lille (C. Kergomard)
- Laboratoire de Géologie Structurale, Paris VI (J.P. Rudant)
- Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale, Toulouse (F. Rémy)
- Polar Science Center, Seattle, USA (D. Rothrock)

Dans le cadre du lancement du futur satellite européen ERS1, elle participe aux activités des groupes internationaux :

- Program for International Polar Ocean Research (P. Gudmansen, chairman)
- Polar Ice Sheet Program (R. Thomas, chairman)

Elle bénéficie des contrats suivants:

- ATP Télédétection Spatiale 1987 sur l'Antarctique
- ATP Télédétection Spatiale 1988 sur la glace de mer (collaboration)

IV - LISTE DES PUBLICATIONS

IV.1 - REVUES A LECTEUR

Fily M. and D.A. Rothrock, 1986 :
Extracting sea ice data from satellite SAR imagery, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE-24, n°6,* 849-854.

Fily M. and D.A. Rothrock, 1987 :
Sea ice tracking by nested correlations, *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing, GE-25, n°5,* 570-580.

Gascard J.C.,C. Kergomard, P.F Jeannin, and M. Fily, 1988 :
Diagnostic study of the Fram Strait MIZ during summer from MIZEX 83 and 84 Lagrangian observations, *J. of Geophys. Res, 93,* 3613-3641.

IV.2 - COLLOQUES: COMPTES-RENDUS, COMMUNICATIONS

Fily M. and D.A. Rothrock, 1986 :
Quantitative use of satellite sar imagery of sea-ice, presented at COSPAR XXVI, 30 June-12 July 1986, Toulouse and accepted by Advances in Space Research.

Fily M. and D.A. Rothrock, 1988 :
Quantitative use of satellite SAR imagery of sea-ice, *Advances in in Space Research, 7,* N° 11, 323-326.

Fily M. and D.A. Rothrock, 1988 :
Measuring lead area changes in sea ice imagery, IGARSS'88 Symposium, Edinburgh, Scotland, 13-16 sept. 1988, ESA SP-284.

Fily M. et D.A. Rothrock, 1989 :
Utilisation des données radar (SAR) sur la glace de mer, Colloque La recherche et les satellites à haute résolution spatiale: SPOT, Landsat TM..., Orléans, 17-19 janvier 1989

IV.3 - AUTRES PUBLICATIONS

Fily M. and D.A. Rothrock, 1988 :
A computer program for digital ice tracking from Synthetic Aperture Radar, Technical Report, APL-UW 1-88, January 1988, Applied Physics Laboratory, University of Washington.

++++
++

CHAPITRE VIII



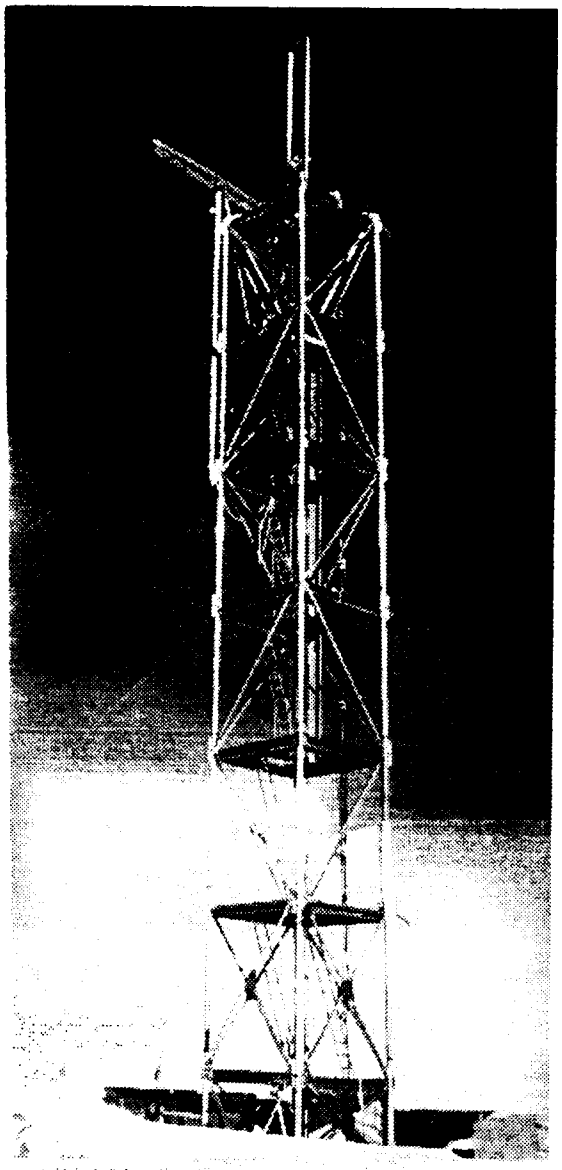
TECHNOLOGIE

I - BUREAU D'ETUDES ET ATELIER

(L. Augustin, D. Donnou, C. Girard, A. Manouvrier, J. Perrin, C. Rado, M. Ricard, G. Ricou)

I.1 - CAROTTAGE PROFOND

Depuis 1982, le LGGE a développé un système de carottage permettant de récupérer des échantillons de glace polaire jusqu'à une profondeur de 4000 m (zones centrales de l'Antarctique).



Compte-tenu des problèmes liés à la déformation de la glace il a été envisagé de pouvoir réaliser un forage profond en une campagne d'été, le camp ayant été monté l'année précédente. Cette condition a mené à réaliser un carottier thermique (technique bien maîtrisée - D10, D15, Dôme C) fonctionnant dans un fluide afin de compenser la pression hydrostatique et capable de remonter des carottes de 8 m de long, afin de réduire le nombre de manoeuvres, et par conséquent la durée du carottage. Cette réalisation a nécessité la mise en oeuvre de techniques nouvelles au laboratoire : confection de tubes en matériaux composites, utilisation de fibres de carbone et de Kevlar, moulage vertical.

Certains éléments ont pu être testés dans des conditions extrêmes de fonctionnement (400 bars - 60°C) mais la longueur du carottier d'une part et son mode de fonctionnement d'autre part, rendaient impossible tout

essai en grandeur réelle au laboratoire. C'est donc lors de la campagne australe 86-87 que le gros matériel (groupe électrogène, centrale hydraulique, treuil, tour de forage, tentes et abris, carburant) a été acheminé sur le site de D47 en Terre Adélie. En 87-88, un groupe de 6 personnes du LGGE, soutenu par une équipe des Expéditions Polaires Françaises, a procédé au montage du matériel, réalisé à l'aide d'un carottier électromécanique un avant-trou dans le névé puis l'a tubé pour obtenir l'étanchéité. Malgré des conditions climatiques très défavorables, le carottier a pu être testé sur 80 mètres, et, à part deux points de détail, il a donné entière satisfaction. Après les quelques modifications requises (filtre mieux dimensionné, robinet de vidange du réservoir, ...), le carottier a été réexpédié en Terre Adélie et une équipe comprenant 9 personnes du LGGE a poursuivi le forage pendant la campagne 88-89. Malgré un retard important dû en grande partie à l'accumulation de neige durant l'hiver austral, le carottier a pu atteindre une profondeur de 871 m, ce qui correspond à une vitesse moyenne de 2 m/h.

I.2 - TRAITEMENT DES CAROTTES

Parallèlement au développement du carottier, un banc de mesure a été réalisé, permettant de découper les carottes pour y prélever une lame continue (isotopes stables) puis de dresser une face régulière en vue d'effectuer des mesures de conductivité solide (volcanisme). Ce banc peut donc recevoir des chariots comportant soit une scie à ruban, soit une fraise, soit des électrodes de mesure.

I.3 - SONDE DE FORAGE PETIT DIAMETRE

La sonde Electrochaude a été utilisée avec succès au Spitzberg en employant un antigel. Cette sonde a été améliorée pour augmenter sa fiabilité et simplifier son emploi. Un câble spécial, incorporant un tube de faible section, doit permettre son utilisation dans des glaciers froids en injectant de l'alcool au cours du forage.

PUBLICATION :

Rado C., Girard C. and Perrin J., 1987 :
Electrochaude : a self flushing hot water drilling apparatus for glaciers with debris, *J. of Glaciology, 33.*

CONGRES :

Le laboratoire a été l'organisateur du "Workshop on Ice Core Drilling" qui s'est tenu à Grenoble du 10 au 14 octobre 1988. Ce colloque a réuni des spécialistes venant d'Allemagne Fédérale, du Danemark, de Suisse, des USA, d'URSS, du Japon, de Suède, du Brésil, d'Italie et de France. Quatre communications ont été présentées par l'équipe et seront publiées en 1989 dans un volume de comptes-rendus.

II - LABORATOIRE D'ELECTRONIQUE

II.1 - L'EQUIPE

L'équipe du laboratoire d'électronique est actuellement constituée de quatre électroniciens de formation :

- G. MAREC, Ingénieur de recherche,
- F. PINGLOT, Ingénieur d'études,
- M. MAITRE, Assistant ingénieur,
- E. LEFEBVRE, Technicien de 1e classe

auxquels il faut ajouter :

- E. MACE, Technicien de 1e classe, frigoriste de formation dont l'activité s'oriente progressivement à temps partiel (1/3 à 1/2 temps environ) vers l'instrumentation en laboratoire réfrigéré, la métrologie des températures et les techniques de production et de régulation des très basses températures. Cette évolution est normale compte-tenu :

  . des besoins du laboratoire,
  . des techniques en jeu : le froid principalement,
  . de la compétence d'E. MACE

La formation complémentaire indispensable d'E. MACE sera assurée dans le cadre des activités du laboratoire d'électronique utilisant au mieux les stages de formation permanente.

II.2 - L'ACTIVITE

Au cours de ces dernières années, l'activité du laboratoire a été essentiellement orientée vers :

. l'étude et la réalisation de dispositifs de télémesure et de télécommande destinés aux systèmes de carottage,

. l'étude et la réalisation d'appareils de mesure de laboratoire, de terrain et in situ,

. l'étude des dispositifs expérimentaux du programme "Interactions Glace Structure" puis leur réalisation et mise en oeuvre.

II.2.1 - Télémesure et télécommande

Deux ensembles de circuits électroniques de télémesure et de télécommande viennent d'être réalisés et mis en service dans le carottier 4000.

A l'origine deux projets-tests avaient été élaborés dans le but de comparer sur un système de forage :

- un mode de transmission en multiplexage de fréquence,
- un mode de transmission en multiplexage temporel

Des essais sur le terrain devaient être faits avant de lancer la réalisation d'un système définitif qui aurait très vraisemblablement utilisé une synthèse des deux projets-tests.

Le retard pris par ailleurs par l'ensemble du projet de forage nous a contraints à réaliser ces deux projets-tests sous forme définitive avec tous leurs circuits de rechange et de maintenance.

Le système de transmission en multiplexage de fréquence vient d'être utilisé avec succès pendant deux campagnes de forage. Les essais du système de transmission en multiplexage temporel ont commencé lors de la dernière campagne, il semble que quelques mises au point soient nécessaires.

II.2.2 - Appareils de mesure : laboratoire, terrain, in situ

Le principal projet entrepris dans ce registre d'activité concerne un conductivimètre destiné à mesurer la conductivité électrique de la glace en courant continu (ce qui est la méthode actuellement admise bien que contestable) et les courants basse fréquence, méthode beaucoup plus fiable que nous préférons utiliser.

Le but de l'étude était double :

- améliorer la technique de mesure proprement dite,
- stocker les mesures sous forme digitale de façon à faciliter un traitement ultérieur

L'amélioration de la technique de mesure a porté essentiellement sur la mise au point de nouvelles électrodes qui n'endommagent pas la carotte et sur de nouveaux générateurs d'excitation. Ces améliorations ont été testées avec succès en laboratoire et sur le terrain.

L'étude du système de stockage qui fait appel au développement des circuits microinformatisés sera terminée en 1989.

II.2.3 - Appareillage expérimental du programme PIGS

L'étude, le choix et la mise en oeuvre de l'appareillage de mesure et d'acquisition de données de ce programme nous ont demandé un gros effort au cours de ces dernières années.

Nous avons entièrement défini les chaînes de mesures de forces et de pression transitoires depuis les capteurs et leur mise en oeuvre jusqu'au stockage digital des informations.

La réalisation fait appel a une chaîne d'acquisition modulaire pilotée par un ordinateur. Les logiciels sont en cours d'élaboration au laboratoire.

L'installation et la mise en oeuvre de ce système devraient être terminées en 1989.

II.3 - EQUIPEMENT DU LABORATOIRE D'ELECTRONIQUE

Le laboratoire a enfin pu être équipé d'un outil de développement pour circuits microinformatisés. Nous pourrons actuellement développer des circuits 8 bits. L'appareil doit encore être complété de sondes de test et de sorties graphiques.

L'équipement général du laboratoire est encore nettement insuffisant et doit être rapidement complété : un poste de travail supplémentaire est à créer pour Eric MACE, nécessitant un réaménagement important des locaux.

III - NOUVEAUX LABORATOIRES REFRIGERES

Avec plus de deux ans de retard sur le planning initial nos nouveaux laboratoires réfrigérés ont enfin pu être mis à la disposition des utilisateurs. Ce retard a eu deux origines :

- la première est la mise en liquidation judiciaire du principal sous-traitant qui devrait réaliser l'enceinte isolante,

- la deuxième est la sous-estimation par FROILABO de l'importance de l'étude technique et du temps de réalisation due à la défaillance d'un cadre technique.

L'installation, actuellement en période de garantie, donne entièrement satisfaction. Nous procédons actuellement aux mises au point et petites améliorations normales pour une réalisation de cette ampleur. Il ne sera vraisemblablement pas indispensable de réaliser le sas d'entrée dont la construction a dû être abandonnée par manque de crédits.

Un problème important reste à résoudre ; c'est la surveillance et la conduite de cette installation en l'absence du technicien frigoriste, lors des congés.

IV - MACHINES D'ESSAIS

(M. Ricard)

IV.1 - MACHINE DE TRACTION COMPRESSION DE 50 TONNES

Cet ensemble, très performant, utilisant l'énergie hydraulique, permet des essais à 50 tonnes et à des vitesses qui peuvent atteindre 3 cm/s. Le pilotage électronique de la machine et les divers asservissements en force, déplacement et extensométrie, permettent de couvrir tous les cas d'expériences.

L'éloignement de la machine (chambre froide) par rapport à l'armoire électronique de commande (salle de mesure annexe) a imposé une installation comportant vidéo, liaison phonique et télécommande d'éclairage.

IV.2 - CELLULE TRIAXIALE

L'étude du comportement mécanique de la glace nécessite des essais en atmosphère dite confinée. Le présent ensemble permet de réaliser des essais de compression dans un fluide sous pression. Ce fluide neutre pour la glace, est parfaitement transparent et liquide. L'enceinte qui le contient est une paroi en acier inoxydable d'épaisseur suffisante pour contenir une pression de 100 bars et possède quatre fenêtres vitrées qui permettent d'observer, photographier ou filmer le déroulement de l'expérience avec l'éclairage qui donne les meilleurs résultats. La résistance de ces vitres à 100 bars est l'un des problèmes techniques de cette réalisation. La pression de confinement est maintenue parfaitement constante pendant toute la durée de l'expérience grâce à un dispositif de compensation de pression qui a été le problème technique "clé" de l'ensemble. A noter également que l'on peut introduire à l'intérieur de l'enceinte divers capteurs (force, déplacement, pression) pour faire des mesures directement sur l'échantillon.

IV.3 - TABLE REFRIGEREE

L'utilisation de la machine 50 tonnes nécessite des échantillons de

dimensions importantes (20 cm de diamètre ou de côté). L'appareil qui permet de réaliser la prise en glace dans les meilleures conditions est une table dont le plateau (80 x 60 cm) est maintenu à - 30°C par circulation d'un fluide caloriporteur refroidi par un groupe frigorifique autonome.

IV.4 - MACHINE DE DECOUPE

Pour qu'un échantillon porte convenablement sur les plateaux d'essais, il lui faut deux faces planes et parallèles. Ceci est obtenu en une seule opération par une double scie circulaire comportant deux lames au carbure montées sur un même arbre, entre lesquelles l'échantillon avance, fixé sur un chariot. La supériorité de la découpe par lame de scie circulaire, découverte et vérifiée depuis peu, réside dans le fait que la lame représente une fraise 3 tailles qui à la fois coupe l'échantillon et l'usine en fraisage debout. Ce type d'usinage donne le meilleur état de surface possible.

IV.5 - MACHINE DE CISAILLEMENT

L'échantillon est pris entre deux mors, l'un fixe, l'autre ayant deux degrés de liberté (c'est-à-dire mobile dans un plan). L'ensemble peut pivoter autour de deux axes perpendiculaires. Comme dans tous ces équipements, l'aspect pratique de l'utilisation est particulièrement étudié.

IV.6 - BANC DE CONDUCTIVITE

Cet appareil est le premier banc à être équipé d'un dispositif d'usinage de la carotte. Le principe de l'usinage est une découpe par scie circulaire à lame carbure disposée sur un chariot. Un dispositif de bridage de la carotte a donc été nécessaire. Après usinage, la mesure est effectuée d'une manière classique. La longueur maxi des carottes est de l'ordre du mètre. Les techniques de fabrication, très étudiées, à base de glissières creuses en aluminium anodisé et de chariots se déplaçant par roulement ont permis de réaliser un ensemble que l'on soulève... à bout de bras (pour le terrain).

IV.7 - TOUR

L'analyse chimique des carottes de glace nécessite une décontamination qui consiste à oter la partie extérieure polluée (fluides de forage, ambiance de stockage). Ces carottes ayant la forme d'un cylindre, nous avons pensé qu'une opération de tournage serait bien adaptée (tour vertical pouvant fonctionner en position horizontale).

Les carottes, de longueur maxi 50 cm, sont fixées entre deux plateaux comportant une empreinte et mise en légère compression pour ne pas

prendre de jeu pendant l'usinage. Le réglage du tour en fonction de la longueur de la carotte est entièrement automatique. Vitesse de broche réglable de façon continue entre 0 et 1000 tours/minute. Avance et recul du chariot porte outil à vitesses indépendantes et réglables avec possibilité de déplacement rapide. La sécurité et la fiabilité ont été particulièrement étudiées (fins de course à induction). L'électronique et l'automatisme sont régulés en température. Grâce à l'emploi des mêmes techniques que sur les autres machines, l'ensemble d'utilisation très aisée, se transporte d'une seule main !

V - INFORMATIQUE

(J.P. Benoist - M.C. Mieulet)

L'activité du groupe informatique s'effectue suivant trois directions principales :

. le suivi du matériel et son adaptation à l'évolution des besoins du laboratoire,
. le suivi des logiciels et la réalisation d'application "maison",
. enfin la formation.

V.I - LE MATERIEL

Au début de l'année 1986, nous disposions d'un ordinateur Matra Datasysteme MD530CX avec la configuration suivante :
. unité centrale biprocesseur (16 bits pour les I/O et 32 bits pour le calcul scientifique)
. 2 mégaoctets de mémoire centrale
. 1 disque de 140 mégaoctets
. 1 lecteur de bandes magnétiques 1600/3200 BPI
. 16 voies asynchrones
. 1 système d'exploitation SINTRAN III J

A la fin de l'année 1986, il n'y avait plus de place pour des terminaux supplémentaires et en fin d'année 1987, le disque était saturé (une trentaine d'utilisateurs enregistrés). Les programmes en cours, (modélisation de comètes et de calottes polaires) atteignaient la limite des performances de la machine du point de vue calcul scientifique.

Il devenait donc urgent d'augmenter la taille mémoire, la taille disque et les performances du CPU en envisageant le passage au modèle au modèle 550CX. Ces modifications étaient prévues dans le dossier initial déposé auprès de l'INSU. Parallèlement à ces modifications, il devenait urgent d'envisager la liaison avec le CICG autrement que par

minitel pour permettre des accès au cray recherche, au réseau EARN et à d'autres laboratoires. La solution la meilleure du point de vue technique était de réclamer la connexion du Laboratoire au réseau GRENET en cours d'installation. La norme retenue pour ce réseau est la norme ETHERNET et le MD530 devait donc être équipé d'une interface permettant le raccord à ce type de réseau. L'ensemble de ces modifications, induisait une augmentation de la taille mémoire et un accroissement de la consommation électrique d'où des changements de puissance de l'onduleur alimentant le MD530CX. L'étude financière transmise aux services de l'INSU en 1987 conduisait à un investissement compris entre 1 et 1,5 MFavec une augmentation dans les mêmes proportions des coûts annuels de fonctionnement qui auraient plus que doublé. L'ensemble des investissements n'entrainait finalement qu'une augmentation par deux de la puissance de calcul sans que nous ayons pour autant l'assurance de pouvoir utiliser UNIX sur ce type de machine.

Avec les difficultés entre la société Matra Datasystème et Norsk Data, fabriquant des MD530, Matra nous proposait de changer de machine pour un MS7000, ordinateur parallèle utilisant le système d'exploitation UNIX. Les conditions consenties par Matra pour cette opération étant très intéressantes, nous nous sommes aperçus qu'il devait être possible d'augmenter les capacités de traitement au niveau du laboratoire tout en diminuant les frais de fonctionnement (maintenance, électricité...). A la suite des tests, les performances du MS7000 se sont révélées assez décevantes en calculs scientifiques. Cette machine paraît plutôt conçue pour un environnement transactionnel ou comme serveur d'un grand nombre de terminaux.

Nous avons alors contacté divers fabricants ayant des offres dans le monde UNIX (Bull, IBM, DEC, Data General, Hewlett Packard, CDC...). Notre choix final s'est porté sur du matériel HP 9000 modèle 835 dont les performances en calcul scientifique pur se sont révélées les meilleures, deux à quatre fois supérieures à celles des autres machines testées et environ 10 fois celles du ND530CX. Les conditions commerciales offertes par HP se révélant particulièrement intéressantes puisqu'elles ont permis de bénéficier de 40% de réduction sur des périphériques comme la table traçante A0 (équipement complémentaire du poste CAO mécanique) et de commencer un embryon de réseau local avec une station de travail HP 9000/318M. L'ensemble de la configuration mise en place revient à 570KF (425kf de l'INSU, ATP télédection, contrat CEA, Eurocore) et comprend :

. 1 HP9000/835CHX
. 16 mégaoctets de mémoire
. 1 disque de 600 mégaoctets
. 1 dérouleur de bandes magnétiques 1600/6250 BPI
. 18 voies asynchrones
. 1 coupleur ETHERNET
. 1 accélérateur graphique avec un écran couleur de 19"
. 1 traceur A0 pour les besoins de cartographie et de CAO
. 1 station de travail HP9000/318M avec
. 4 mégaoctets de mémoire
. 1 disque de 140 mégaoctets
. 1 coupleur ETHERNET
. 1 écran 17" monochrome

Les frais de maintenance pour l'ensemble de cette configuration sont de 75kF environ, soit un tiers de moins que ceux actuellement supportés sur le MD530. L'installation de la machine est en cours ; elle devrait être mise progressivement à disposition des utilisateurs dès la fin du mois de février 1989. l'ensemble doit être opérationnel pour le mois de mai.

Parallèlement à cette opération, le laboratoire a entrepris d'équiper le bureau de dessin (J.C. Pugno). Au début de l'année 1989, le LGGE a reçu une somme de 50kF environ de l'Université (Tranche C) pour permettre l'achat de périphériques : imprimante laser, scanner. Cette somme sera complétée par une somme sensiblement équivalente provenant d'un contrat CEA pour informatiser le bureau dessin.

V. 2 - LES LOGICIELS

Sur la nouvelle configuration nous continuerons à utiliser GKS dans la version GKSbx pour le graphique, HARWELL comme bibliothèque mathématique et un traitement de texte scientifique. Remarquons que c'est l'existence d'un produit de ce type sur le MD530 qui a permis d'attirer bon nombre d'utilisateurs qui se sont ensuite mis à faire des calculs.

A partir de ces produits logiciels, nous avons développé des programmes permettant de tracer des courbes, de faire des transparents pour éviter aux utilisateurs occasionnels d'avoir à se plonger dans les divers langages de programmation. Nous avons également développé un ensemble de sous-programmes de base pour les statistiques (corrélation et analyse en composantes principales) et des programmes de lissage par fonctions spline.

Le contrat CEA nous a permis de faire l'acquisition d'un certain nombre de modules du logiciel graphique UNIRAS, ce qui va nous permettre de répondre de façon satisfaisante aux problèmes de cartographie et de présentation des résultats pour les modèles de calottes polaires.

V.3 - LA FORMATION

Des trois activités du groupe, c'est sans doute la moins visible mais c'est aussi, avec la mise en place de logiciel une de celles qui prend le plus de temps. Chaque année il faut assurer la formation des stagiaires et des thésards qui arrivent au laboratoire. Cette formation est en général assurée en début d'année scolaire. Mais il y a aussi des opérations ponctuelles dans le cas de stages à durée limitée dans le courant de l'année ou des compléments d'information sur les produits disponibles lorsque le besoin s'en fait sentir. En moyenne, une formation est dispensée, sous des formes diverses, à une dizaine de personnes.

++++
++