



HAL
open science

Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement : rapport d'activité 1987-1991

Laboratoire de Glaciologie Et Géophysique de L'Environnement (lgge)

► To cite this version:

Laboratoire de Glaciologie Et Géophysique de L'Environnement (lgge). Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement : rapport d'activité 1987-1991. 1992. hal-01573096

HAL Id: hal-01573096

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-01573096v1>

Submitted on 8 Aug 2017

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

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

15623

Centre National de la Recherche Scientifique

Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l' Environnement

- U.P.R. 5151
- Associé à l'Université Joseph Fourier

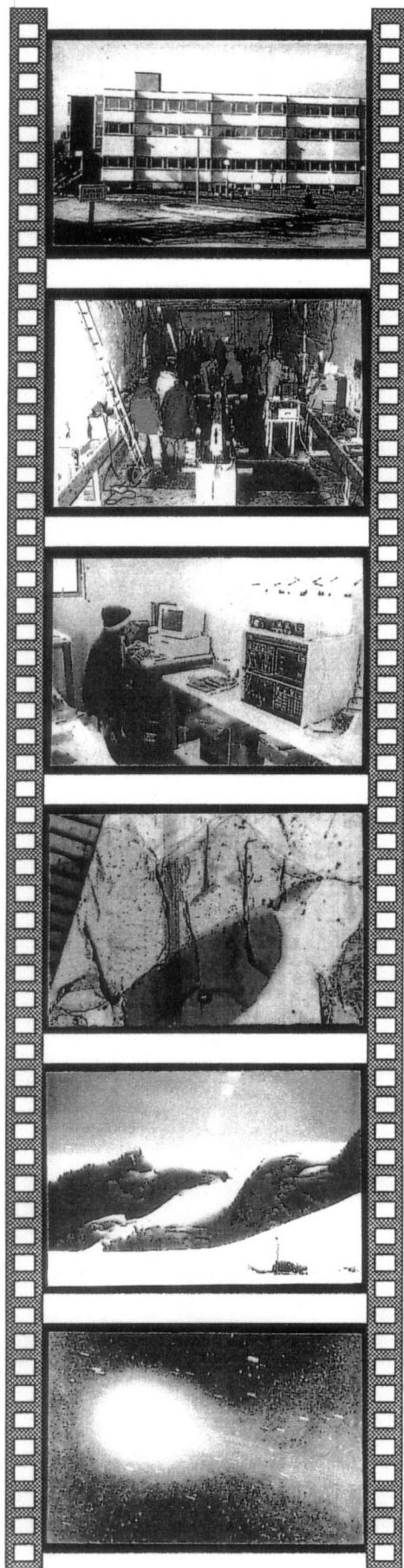
RAPPORT D'ACTIVITE

1987/1991

8 Nov. 1991



Domaine Universitaire de Grenoble St Martin D'Hères
BP 96 38402 St Martin d'Hères Cedex
Téléphone 76824200 Télécopie 76824201



G 84 686

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION

Chapitre 1 : ARCHIVES GLACIAIRES DU CLIMAT

I - OBJECTIFS GENERAUX	5
II - RESULTATS MAJEURS OBTENUS AU COURS DES 4 DERNIERES ANNEES	
II.1 - Indicateurs climatiques liés à la précipitation	5
II.1.1 - Les variations récentes du climat (Le dernier millénaire)	7
II.1.2 - Holocène et dernière glaciation	10
II.1.3 - La dernière période glaciaire	10
II.1.4 - Le dernier cycle climatique	11
II.2 - Etude de l'air piégé dans la glace	15
II.2.1 - Etude des mécanismes de piégeage de l'air atmosphérique par la glace	17
II.2.2 - Gaz à effet de serre : CO ₂ , CH ₄ et N ₂ O	18
II.2.3 - Evolution du cycle de l'oxygène	22
II.2.4 - Paléo-altitudes et paléo-pressions	23
III - COLLABORATIONS ET CONTRATS	24
III.1 - L'exploitation des archives glaciaires du climat	24
III.2 - Etude des gaz atmosphériques	25
III.3 - Contrats	25
IV - PUBLICATIONS	25

Chapitre 2 : MODELISATION DES ECOULEMENTS DE GLACE

I - OBJECTIFS GÉNÉRAUX	33
II - RÉSULTATS OBTENUS AU COURS DES 4 DERNIÈRES ANNÉES	33
II.1 - Modélisation climatique	33
II.1.1 - Simulations globales des aérosols marins et désertiques	33
II.1.2 - Modélisation dynamique bidimensionnelle de l'atmosphère	34
II.2 - Modélisation des calottes glaciaires	35
II.2.1 - Paramétrisation des conditions aux limites basales pour calculer le champ de température dans les calottes glaciaires	35

II.2.2 - Interprétation du profil de température mesuré à Vostok	36
II.2.3 - Datation du forage de Vostok	36
II.2.4 - Modèle d'évolution appliqué à une ligne de courant en Antarctique	37
II.2.5 - Modèle de calotte isotherme appliqué à la Fennoscandie	38
III - COLLABORATIONS ET CONTRATS	38
IV - PUBLICATIONS	39

Chapitre 3 : TELEDETECTION

I - OBJECTIFS GÉNÉRAUX	43
II - RÉSULTATS MAJEURS OBTENUS AU COURS DES 4 DERNIÈRES ANNÉES	43
II.1 - Antarctique	43
II.1.1 - Radiométrie micro-onde	44
II.1.2 - Radiométrie visible et proche infrarouge	47
II.1.3 - Radiométrie infrarouge thermique	47
II.2 - Glace de mer	47
II.2.1 - Algorithme de traitement des données radar	47
II.2.2 - Arctémiz	48
II.3 - Programmes alpins	48
II.3.1 - Radiométrie visible, proche infrarouge et micro-onde	48
II.3.2 - Données radar	49
III - COLLABORATIONS ET CONTRATS	49
IV - ACTIVITE DE FORMATION	50
V - PUBLICATIONS	50

Chapitre 4 : GLACIOCHIMIE

I - OBJECTIFS GENERAUX	55
II - RESULTATS MAJEURS OBTENUS AU COURS DES 4 DERNIERES ANNEES	
II.1 - Cycles biogéochimiques (approche glaciochimique)	56
II.1.1 - Cycle du soufre	56
II.1.2 - Cycle de l'azote	60
II.1.3 - Cycle des halogènes	64
II.1.4 - Cycle du carbone	67

II.1.5 - Cycle des métaux lourds	67
II.1.6 - Relation air neige pour les éléments majeurs	73
II.2 - La matière extraterrestre	73
II.2.1 - L'Iridium	73
II.2.2 - Collecte des micrométéorites	74
II.3 - Glaciologie alpine	74
II.3.1 - Etude des dernières décennies au Mt Blanc	74
II.3.2 - Evolution du manteau neigeux à moyenne altitude	75
II.3.3 - Composition chimique du manteau neigeux des glaciers alpins d'altitude	75
II.3.4 - Bilan régional de l'accident de Tchernobyl	78
II.4 - Sédiments lacustres	79
III - COLLABORATIONS ET CONTRATS	81
IV - PUBLICATIONS	82

Chapitre 5 : RHEOLOGIE DE LA GLACE

I - OBJECTIFS GENERAUX	91
II - RESULTATS MAJEURS OBTENUS AU COURS DES 4 DERNIERES ANNEES	
II.1 - Rhéologie des glaces polaires	92
II.1.1 - Texture des glaces de Vostok	92
II.1.2 - Modélisation de la densification du névé et de la glace polaire	92
II.2 - Modélisation des calottes polaires	93
II.1.1 - Objectif	93
II.1.2 - Conditions aux limites : modèle de comportement pour la couche basale	93
II.2.3 - Evolution des textures	94
II.3 - Endommagement de la glace en compression	94
II.3.1 - Fluage transitoire (matériau non endommagé)	95
II.3.2 - Nucléation des fissures en compression triaxiale et évolution de l'endommagement	96
II.3.3 - Modélisation de la compression uniaxiale jusqu'au pic de contrainte	97
II.3.4 - Vitesse de fluage de la glace endommagée en compression uniaxiale	98
II.4 - Evaluation de la résistance à l'avancement d'un navire brise-glace Effets d'un pré-découpage	99
III - CONTRATS ET COLLABORATIONS	99

IV - ACTIVITÉS DE FORMATION	100
V - PUBLICATIONS	101

Chapitre 6 : Glaces Extra-terrestres

I - OBJECTIFS GÉNÉRAUX	105
II - RÉSULTATS MAJEURS OBTENUS AU COURS DES 4 DERNIÈRES ANNÉES	
II.1 - Evolution de la matière cométaire	105
II.1.1 - Modélisation de l'évolution thermique et de la différenciation chimique	105
II.1.2 - Acquisition de données physico-chimiques pour la modélisation de l'évolution des noyaux cométaires	107
II.2 - Nature et composition des surfaces de Triton et Titan	111
II.2.1 - Spectroscopie proche infrarouge de glaces et leurs mélanges	111
II.2.2 - Etude de la composition et de l'évolution de la surface de Triton	111
II.2.3 - Etude de la surface et des nuages de Titan	113
II.3 - Spectroscopie et physico-chimie des grains interstellaires	113
II.3.1 - Evolution de grains CO:H ₂ O - Mécanismes d'éjection de H ₂ O	113
II.3.2 - Spectroscopie infra rouge des glaces interstellaires	114
II.3.3 - Synthèse moléculaire par photolyse UV des grains interstellaires	115
II.4 - Thermodynamique et chimie hétérogène d'aérosols	115
III - COLLABORATIONS ET CONTRATS	116
IV - PUBLICATIONS	116

Chapitre 7 : GLACIERS ALPINS

I - OBJECTIFS GÉNÉRAUX	121
II - RÉSULTATS MAJEURS OBTENUS AU COURS DES 4 DERNIÈRES ANNÉES	123
II.1 - Variations spatio-temporelles des bilans de masse	123
II.1.1 - Structure générale et répartition	123
II.1.2 - Téléconnexion	124
II.1.3 - Application de l'imagerie satelliaire au suivi des fluctuations glaciaires	125
II.2 - Méthodologie de mesure	125
II.2.1 - Mesures de vitesses sur le lit	125
II.2.2 - La circulation de l'eau à l'intérieur des glaciers	125

II.2.3 - La dynamique glaciaire	125
II.3 - Applications pratiques	126
II.4 - La logistique alpine - Les refuges	126
II.5 - Modélisation des glaciers alpins	126
II.5.1 - Reconstruction des bilans	126
II.5.2 - Hypsographie des Alpes du Nord lors de la dernière glaciation	128
III - AUTRES FORMES DE PARTICIPATION À LA RECHERCHE	129
IV - PUBLICATIONS	130

Chapitre 8 : TECHNOLOGIE

Laboratoire d'électronique	133
Bureau d'études et atelier	134

+°+°+

INTRODUCTION

L'intérêt croissant porté aux régions polaires d'une part, à l'évolution du climat et de l'environnement global d'autre part, a créé une conjoncture extrêmement favorable aux thèmes de recherche développés depuis près de 20 ans par le LGGE. Par ailleurs, les retombées de l'analyse et de l'interprétation des résultats de la carotte de Vostok ont fortement contribué à conforter les positions nationale et internationale du Laboratoire dans ce type de recherche.

Le LGGE a certes atteint son rythme de croisière mais cela n'exclut pas de nouvelles initiatives. Oublié le temps où les chercheurs du laboratoire n'étaient considérés que comme des pourvoyeurs de données. Ils participent désormais activement à l'élaboration des théories climatiques grâce notamment au renforcement de l'étage modélisation dans leurs recherches et à leur excellente insertion dans la dynamique internationale de "Global Change". D'une façon générale, un effort a été réalisé par les équipes pour faire connaître et prendre en compte les résultats glaciologiques dans le cadre des études sur la paléoclimatologie, la chimie atmosphérique, la mécanique et la physique des matériaux, l'astrophysique...

Les dernières années ont été marquées par des prises de responsabilité accrues des personnels pour animer et organiser à Grenoble des réunions internationales de haut niveau : Symposium International sur les techniques de forage (octobre 88), 7ème symposium International du CACGP sur la Chimie de l'Atmosphère à l'Echelle du Globe (septembre 90), ESF Workshop on Antarctic Paleoclimate (octobre 90), Journée Lliboutry (novembre 90).

Le rôle du LGGE dans l'animation de programmes nationaux et internationaux est aussi attesté par le lancement d'Eurocore, puis de GRIP (programmes polaires où le LGGE est très fortement impliqué) dans ses engagements dans les comités du PNEDC, du PIREN, du SCAR, d'IPCC, d'IGBP (PAGES), d'IGAC (PASE), d'IASC (Comité International Arctique), d'Eurotrac, dans les péripéties de l'Institut Français de Recherche et Technologie Polaires, dans le Comité National...

Le découpage des activités du LGGE en 5 équipes scientifiques a été mis en place par la nouvelle direction au début de 1989.

La glace naturelle reste le fil conducteur reliant les travaux de ces équipes, mais le poids des études se rapportant au **climat** est considérable. C'est une discipline où nos résultats ont été d'une exceptionnelle importance et dans laquelle le LGGE a encore de belles cartes à jouer si les carottages profonds en cours et programmés arrivent à leur terme.

Au sein de cette équipe, des sous groupes se dessinent, comme la **modélisation des calottes polaires** et la **téledétection**, qui devraient pouvoir prendre leur autonomie dans les années à venir.

Dans IGBP les recherches de chimie atmosphérique ont récemment été regroupées sous la bannière du programme IGAC (International Global Atmospheric Chemistry). Au laboratoire les recherches correspondantes sont développées essentiellement par l'équipe **glaciologie** qui s'intéresse non seulement au lointain passé mais aussi à la chimie atmosphérique globale actuelle ou récente (le dernier millénaire) et à l'impact des activités humaines sur son évolution. Bien que souffrant d'un manque d'effectifs, cette équipe a obtenu de nombreux résultats originaux et ses activités complètent la force du LGGE dans l'analyse et l'interprétation des carottages polaires à moyennes et grandes profondeurs tant en Antarctique qu'au Groenland.

Le climat est aussi l'objectif principal de l'équipe **"glaciers tempérés"** dont les travaux visent à modéliser l'évolution des glaciers au cours du ou des derniers siècles en liaison avec les fluctuations climatiques récentes. Les mesures de terrain, de longue haleine, couvrent les Alpes Françaises et le Spitzberg. Cette activité traditionnelle du laboratoire revêt une grande importance au niveau de la région où l'expertise de l'équipe est particulièrement appréciée.

Relevant du département SPI, l'équipe **"Rhéologie des Glaces"** expérimente ce matériau sous un angle complètement différent. Ses chercheurs s'intéressent

aux propriétés physiques et mécaniques de la glace tant aux faibles qu'aux grandes vitesses de déformation. Les premières sont utilisées dans les travaux de modélisation des calottes polaires, les secondes trouvent leurs applications dans le PIGS (Programme Interactions Glace Structures).

Les interactions entre les gaz et la glace sont étudiées en laboratoire par l'équipe "Glaces extra-terrestres". En effet, les comètes sont constituées d'aggrégats de grains de poussière, de glace et de gaz adsorbés et l'équipe a trouvé là un créneau de recherche original, complété par la modélisation non seulement des comètes mais d'autres corps englacés du système solaire... L'expérience requise dans ce domaine pourrait trouver des applications dans l'étude des nuages stratosphériques polaires résultant de l'adsorption de gaz traces comme HNO_3 et HCl sur les particules de glace.

Le Laboratoire apparaît donc comme une entité fortement pluridisciplinaire où la réunion sous un même toit de spécialistes de climatologie, chimie atmosphérique, mécanique, physique, physicochimie, astrophysique et bien sûr glaciologie présente de nombreux avantages. Ajoutons à cela la vaste couverture géographique des activités du LGGE : Arctique, Antarctique, Alpes, espace.

Enfin il faut insister sur les services techniques du LGGE qui travaillent en prise directe avec les équipes de recherche. C'est bien sûr essentiel pour monter l'appareillage de laboratoire et les expérimentations de terrain. Ce l'est plus encore pour développer les nouveaux systèmes de carottage indispensables pour fournir aux chercheurs les carottes de glace qui leur sont nécessaires. Le travail en régions polaires n'est pas simple. Il requiert une excellente coordination entre chercheurs et techniciens. Soulignons tout de même que le LGGE s'est fixé un grand objectif d'ici à la fin du siècle : parvenir à une profondeur 4000 mètres en Antarctique. Le système a été testé avec succès jusqu'à 800 m de profondeur. Il s'agit maintenant de le mettre en oeuvre au Dôme C et d'atteindre, qui sait, pour la première fois, le million d'années.

Le rapport qui suit développe dans le détail les résultats scientifiques et techniques des 4 dernières années (mi 87 - mi 91). Ce laps de temps recouvre un changement de direction (1/01/89) donc une certaine évolution dans le mode de fonctionnement du LGGE. Le Professeur Lliboutry est parti à la retraite, nous regretterons Fernand Rapetto trop tôt disparu, d'autres ont préféré changer de cadre. Heureusement de nouvelles têtes sont apparues - chercheurs, techniciens. Ainsi va la vie d'un laboratoire...

+°+°+

CHAPITRE 1 :

**ARCHIVES GLACIAIRES
DU CLIMAT**

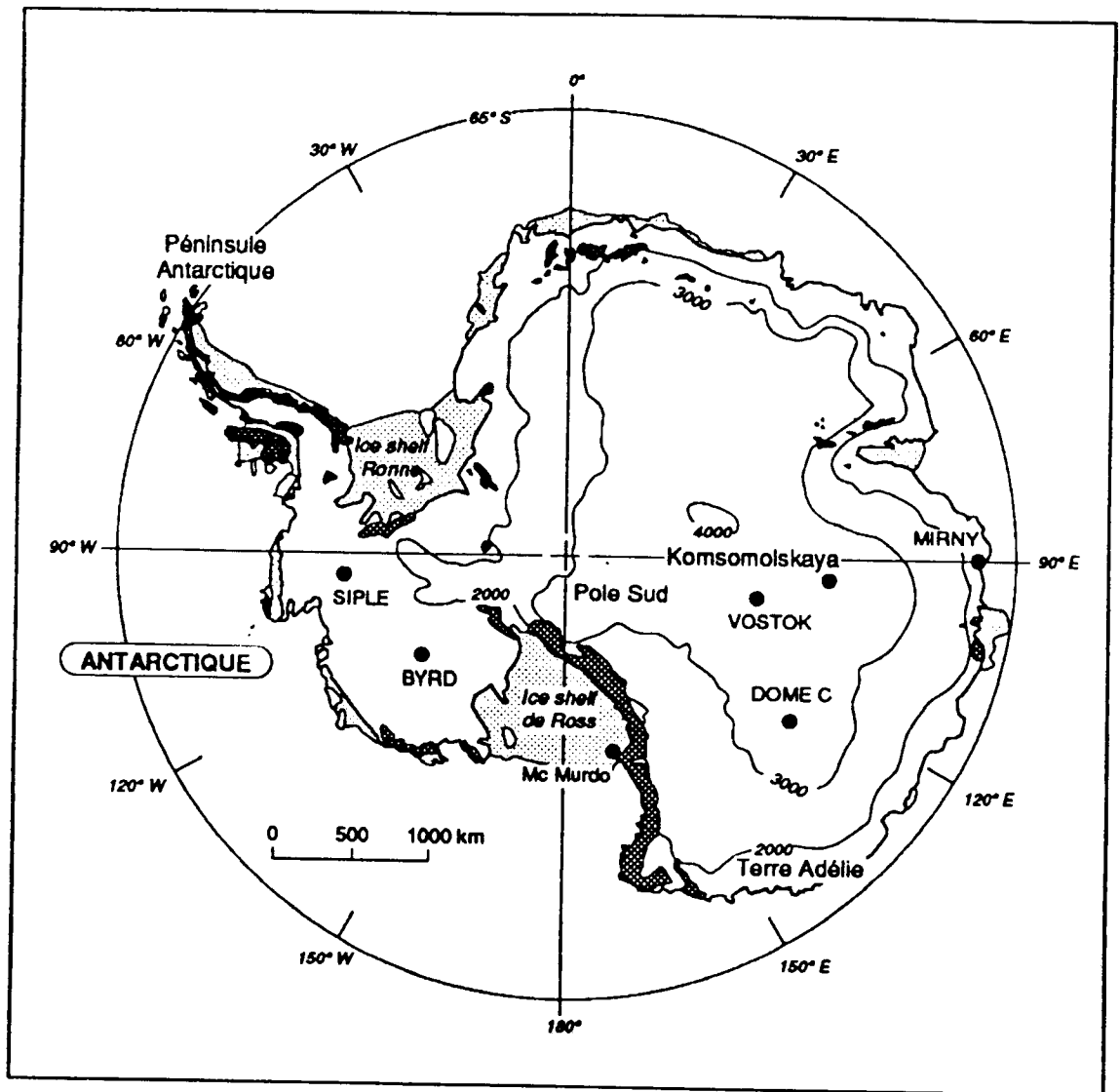


Figure 1.1 :
Carte de l'Antarctique

I - OBJECTIFS GENERAUX

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 n'ont parfois qu'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 aérosols...) 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 nos propres carottages développés en Terre Adélie et à diverses collaborations internationales (forage européen au Groenland, collaborations avec l'Australie, la Chine, l'Union Soviétique, les USA... en ce qui concerne l'Antarctique) nous avons accès à des échantillons qui potentiellement nous permettent à la fois une large couverture géographique de secteurs importants de l'Antarctique et une comparaison interhémisphérique à différentes échelles de temps. Il faut mettre en exergue la collaboration désormais tri-partite (Union Soviétique, France, USA), qui grâce au forage de **Vostok** permet de décrire l'ensemble d'un (et peut-être de deux) 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 AU COURS DES 4 DERNIERES ANNEES

Les indicateurs climatiques trouvés dans les carottes de glace sont incorporés soit au niveau de la précipitation neigeuse (composition isotopique de la glace permettant de retracer les températures, teneur en aérosols de la précipitation) au moment où elle se forme dans l'atmosphère, soit au niveau de l'air qui se trouve emprisonné sous forme de bulles lorsque le névé se transforme en glace, c'est-à-dire suivant les sites quelques dizaines à quelques milliers d'années après le dépôt de la précipitation.

Les processus mis en cause étant différents, nous

traiterons, pour des raisons de commodité dans l'exposé, d'abord des indicateurs liés à la précipitation puis de ceux trouvés dans l'air emprisonné.

II.1 - INDICATEURS CLIMATIQUES LIES A LA PRECIPITATION

Ici nous différencions les échelles de temps : le dernier millénaire, l'Holocène et la dernière déglaciation, la dernière période glaciaire et enfin l'ensemble du cycle climatique.

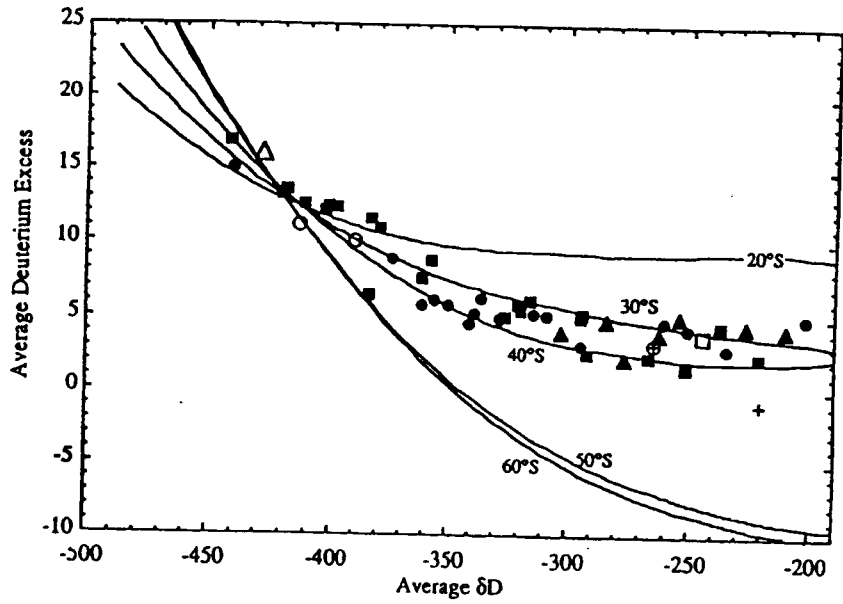


Figure 1.2 :

Variations de l'excès en deutérium en fonction de la teneur en deutérium de la neige recueillie dans les régions centrales de l'Antarctique et modèle prédictif en fonction de la latitude des régions de l'océan source d'humidité (Petit et al., 1991)

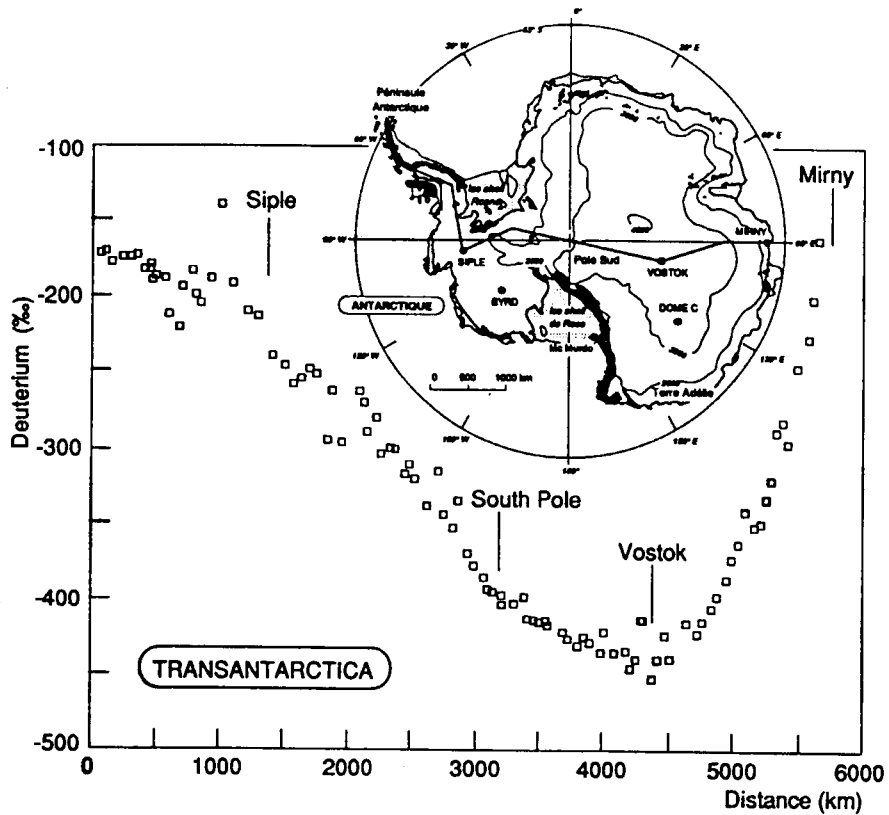


Figure 1.3 :

Teneurs en deutérium des échantillons de neige recueillis au cours de l'expédition Transantarctica en fonction de la distance parcourue à partir de la péninsule antarctique. En encart le transect réalisé.

II.1.1- LES VARIATIONS "RECENTES" DU CLIMAT (LE DERNIER MILLENAIRE)

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

La teneur isotopique en deutérium (δD) et en oxygène 18 ($\delta^{18}O$) des précipitations en Antarctique est principalement liée à la température à laquelle elles se 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 aussi des repères chronologiques tels que les éruptions du Mt Agung (1963) et du Tambora (1815) repérables sur le terrain par la mesure de la conductivité solide des carottes.

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 deutérium 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.

En appliquant le modèle isotopique proposé par Jouzel et Merlivat (1984) il a été possible de déduire que la température des zones océaniques qui fournissent l'essentiel des précipitations antarctiques serait comprise entre 15 et 20°C (Figure 1.2). Ceci correspondrait aux régions de l'océan situées entre 30 et 40° de latitude Sud (Petit et al., 1991). Cette conclusion est également suggérée par les mesures chimiques de MSA (acide méthanesulfonique, voir plus bas).

Par ailleurs nous avons eu accès à un nouvel ensemble d'échantillons de neige suivant un transect de 6000 km au travers du continent Antarctique, collectés grâce à une collaboration avec l'Institut de Lanzhou (Chine) dont un chercheur (Qin Dahe) a participé à l'Expédition Transantarctica. Les résultats préliminaires indiquent une variation quasi monotone des teneurs isotopiques en fonction de la distance (cf. Figure 1.3).

Ces échantillons constituent une base nouvelle de données qui nous permet de documenter la variation géographique des teneurs isotopiques et sa relation avec la température qui sert de base à l'interprétation paléoclimatique des forages profonds.

Sur les variations au cours des 1000 dernières années, une étude concerne une série du Pôle Sud. La datation établie sur le dernier siècle à partir des

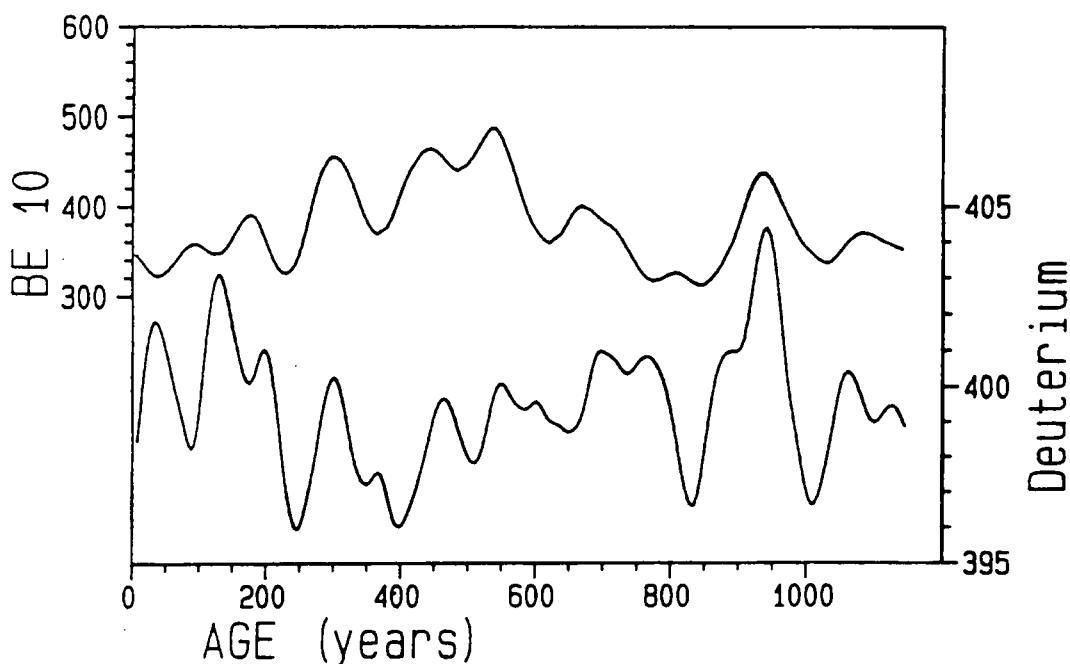


Figure 1.4 :

Comparaison entre la concentration en ^{10}Be et la teneur en deutérium (courbe lissée) au Pôle Sud (Raisbeck et al., 1990).

variations isotopiques saisonnières s'appuie ensuite sur une série de repères volcaniques.

Le profil isotopique (Figure 1.4) suggère une relative stabilité du climat sans accident particulier au cours du dernier millénaire. Ainsi pour la période contemporaine du petit âge glaciaire bien documenté, l'Hémisphère Nord, entre 1600 et 1800 AD, ne semble pas être représenté sur cet enregistrement.

L'activité solaire est un facteur potentiellement actif sur le climat. Ce lien potentiel a été examiné en comparant le profil isotopique du Pôle Sud à celui des concentrations en ^{10}Be mesurées sur les mêmes échantillons (collaboration Yiou et Raisbeck, Orsay). Tout comme le ^{14}C , le ^{10}Be est produit dans la haute atmosphère par l'action du flux galactique modulé par l'activité solaire. A l'opposé du ^{14}C qui est intégré dans le cycle complexe du carbone et de la biosphère, le ^{10}Be est intégré plus directement dans les précipitations neigeuses.

Les variations des concentrations en ^{10}Be au cours des 1000 dernières années sont très semblables à celles du taux de production en ^{14}C révélées par l'étude des anneaux d'arbres (Raisbeck et al., 1990). Cette relation, si elle est confirmée, ouvrirait de nouvelles perspectives pour la reconstruction du taux de production de ^{14}C pour les périodes antérieures à 8000 ans inaccessibles par les anneaux d'arbres.

Concernant la comparaison avec le climat (isotopes) il n'apparaît pas de corrélation significative avec les concentrations en ^{10}Be tant au Pôle Sud (Figure 1.4) sur 1000 ans qu'au Dôme C sur une période de 4000 ans. Les résultats ne permettent pas de mettre en évidence un lien quelconque entre l'activité solaire et le climat.

La comparaison interhémisphérique des séries climatiques est abordée à travers le programme Eurocore (Groenland) dans le cadre d'une collaboration européenne. Un forage de 300 m a été réalisé au site de Summit à 3230 m d'altitude. Les

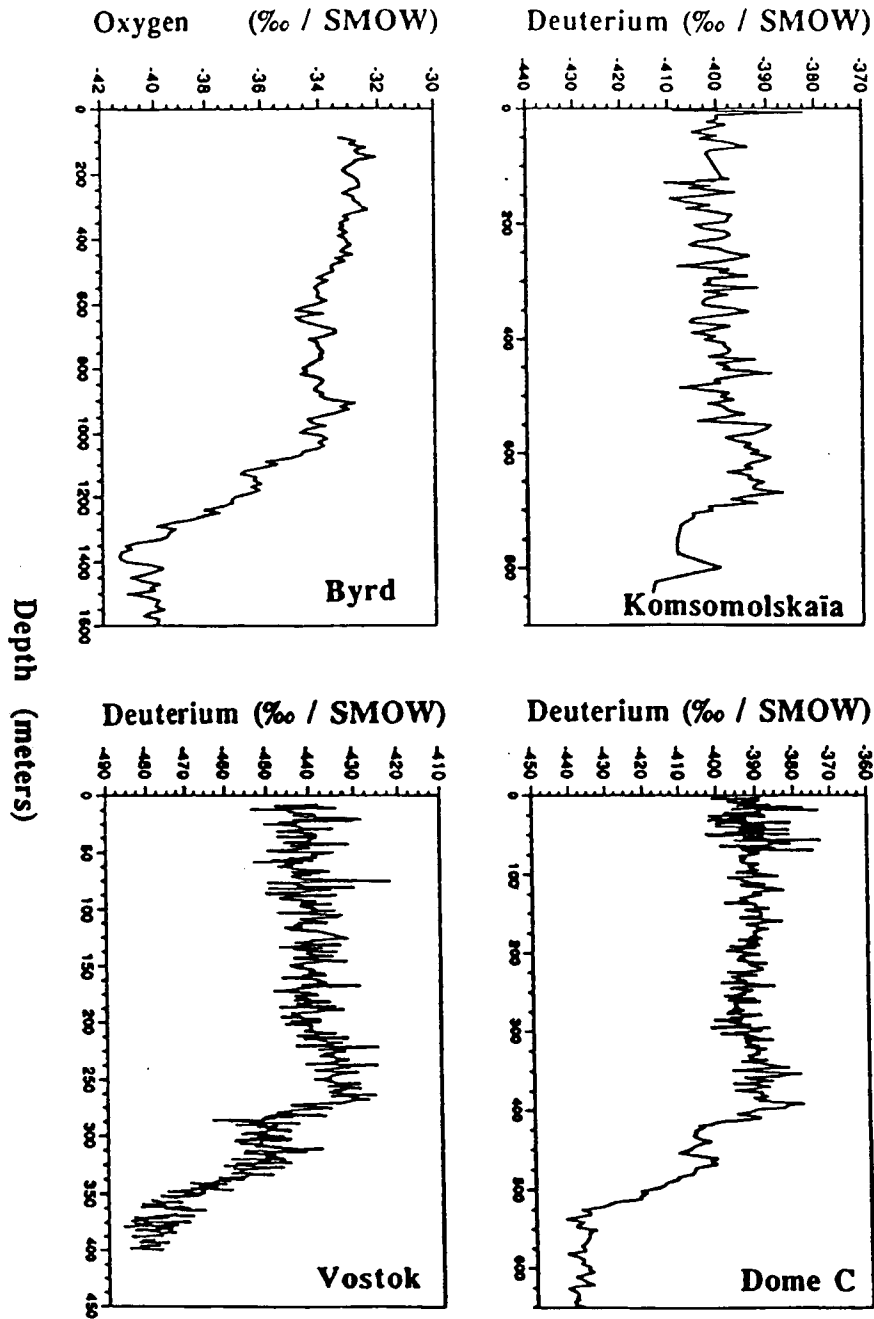


Figure 1.5 :
Teneur isotopique de la glace en fonction de la profondeur pour les forages de Byrd, Komsomolskaya, Vostok et Dôme C pour la partie correspondant à la dernière déglaciation et à l'Holocène.

teneurs isotopiques en cours d'interprétation ont été déterminées en collaboration avec les Danois.

II.1.2 - HOLOCENE ET DERNIERE DEGLACIATION

(J. Jouzel et J.R. Petit en collaboration avec le LGI Saclay (P. Ciais))

L'analyse du nouveau forage soviétique de Komsomolskaya en Antarctique de l'Est nous a permis d'étendre la base de données relatives à cette période (dernière transition glaciaire-interglaciaire et Holocène). Ce forage de 850 m couvre environ les 15000 dernières années. La dernière transition a, par ailleurs, été analysée de façon détaillée sur le forage Vostok 4Γ (1 échantillon tous les 50 cm soit 3 échantillons par siècle).

L'ensemble de ces nouveaux résultats ainsi que ceux relatifs aux stations Dôme C et Byrd (Figure 1.5) sont présentés sur la figure (profils isotopiques en fonction de la profondeur). Ils confirment deux des caractéristiques marquantes du climat de l'Antarctique :

- le fait que la période la plus chaude de l'Holocène ait pris place à son début entre 10000 et 6000 ans BP (P. Ciais et al., sous presse). Ceci, également observé à partir d'autres données relatives aux hautes latitudes, met en évidence un comportement différent de ces régions par rapport aux moyennes latitudes (optimum climatique il y a environ 6000 ans).
- la mise en évidence d'un événement analogue au Younger Dryas (retour à des conditions froides au cours de la déglaciation bien documenté dans l'Atlantique Nord et les régions adjacentes entre 11000 et 13000 ^{14}C BP). Il semblerait que cet événement froid daté de 13500 à 12000 BP (Figure 1.6) ait précédé le Younger Dryas mais du fait des problèmes liés à l'échelle ^{14}C , d'une part, et à la datation de la glace, d'autre part, l'hypothèse de synchronisme de cet événement entre les deux hémisphères reste extrêmement plausible (Jouzel et al. (sous presse)).

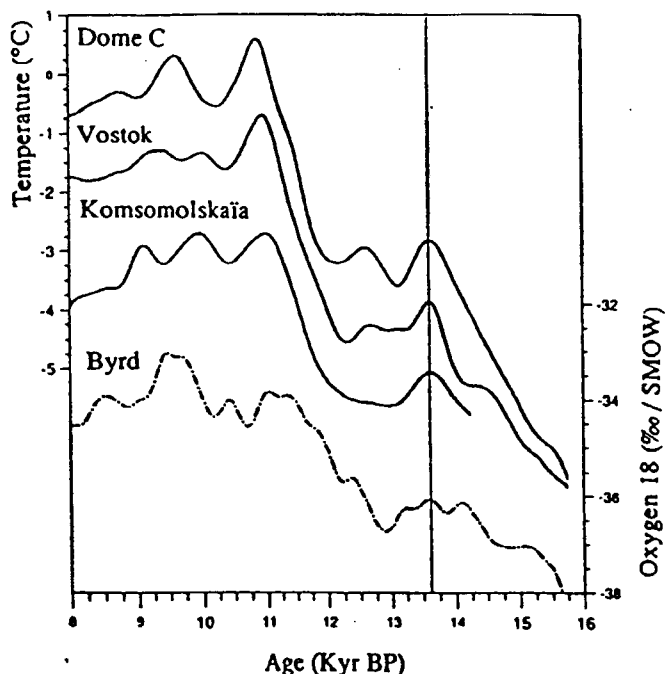


Figure 1.6 :
 Comparaison des profils de température reconstruits à partir des 3 carottages de l'Antarctique de l'Est pour les 16.000 dernières années. Le profil de teneur en oxygène 18 le long de celui de Byrd y est également reporté.

II.1.3 - LA DERNIERE PERIODE GLACIAIRE

Nous nous sommes intéressés de façon spécifique à cette période par la comparaison entre les trois forages profonds Dôme C, Vostok et Byrd et l'étude d'un forage côtier.

II.1.3.1 - COMPARAISON DOME C, VOSTOK, BYRD

(J. Jouzel, J.P. Benoist, C. Lorius, J.R. Petit, C. Ritz avec la collaboration de F. Yiou et G. Raisbeck)

La comparaison des trois forages profonds de l'Antarctique s'appuie sur la découverte de pics ^{10}Be à la fois à Vostok et au Dôme C. Celle-ci est un des éléments qui ont permis de redater le forage du Dôme C (pic ^{10}Be à 35.000 BP) et de mettre en évidence la remarquable similarité entre les courbes de température déduites indépendamment des deux forages. Elle 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 (Figure 1.7). Cette approche nous a permis de proposer une redatation du forage de Byrd pour sa partie glaciaire dont nous noterons qu'elle a été ultérieurement confirmée par des analyses de Beryllium 10.

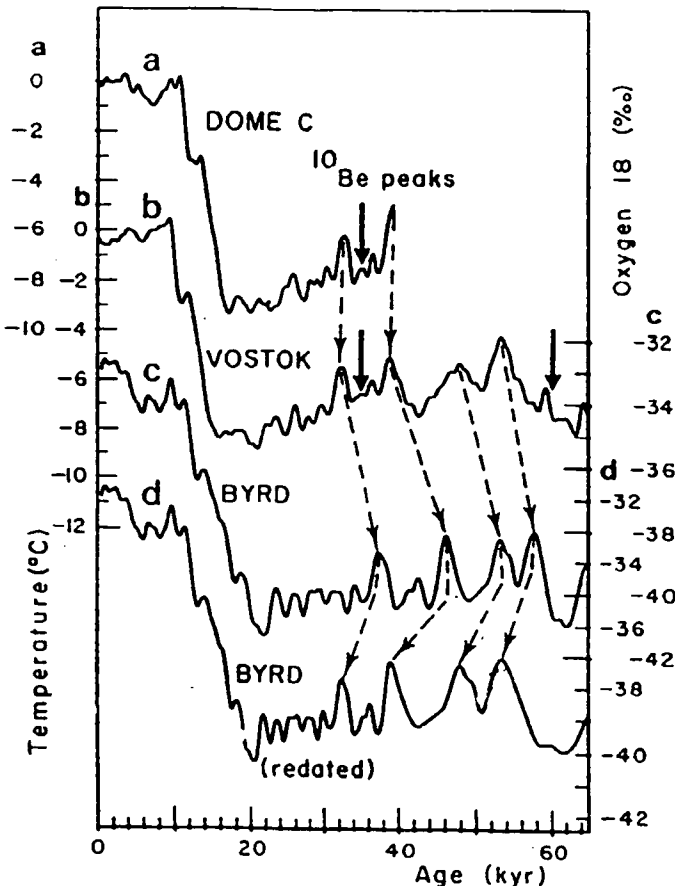


Figure 1.7 :

Comparaison des forages de Byrd, Dôme C et Vostok sur leur partie commune (65000 ans pour Byrd et Vostok, 40.000 ans pour Dôme C) avec pour Vostok et Dôme C une échelle de température (à gauche) et pour Byrd une échelle $\delta^{18}O$ à droite. Les flèches indiquent les pics de ^{10}Be (flèches en pointillés). La courbe D correspond au forage de Byrd après redatation basée sur l'utilisation de ces correspondances comme marqueurs stratigraphiques (Jouzel et al., 1989).

II.1.3.2 - FORAGE COTIER 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 :

- 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 la 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 (teneurs en deutérium et en aérosols insolubles, taille des cristaux, concentration des bulles (Figure 1.8) dont les résultats suggèrent de relier ces différents enregistrements à ceux disponibles sur les forages effectués en amont et sur le Plateau Antarctique.

II.1.4 - LE DERNIER CYCLE CLIMATIQUE

(C. Lorius, J.R. Petit, J. Jouzel, C. Genthon et collaboration LGI, F. Yiou et G. Raisbeck)

Au second trimestre 1987, a été publiée une série d'articles consacrés aux derniers 160.000 ans basés sur l'analyse et l'interprétation des données de deutérium et CO_2 sur le forage 3T jusqu'à 2083 m. L'interprétation de cet ensemble de résultats a été poursuivie dans différentes directions avec notamment une réflexion sur la sensibilité du climat et sur le lien entre climats du passé et évolution future qui est présentée sous la rubrique gaz à effet

de serre. Les aspects traités ici concernent l'accumulation, l'analyse spectrale et la corrélation Vostok-sédiments marins à partir de l'analyse du profil de teneur en poussières.

II.1.4.1 - VARIATIONS DE L'ACCUMULATION

(J. Jouzel, J.P. Benoist, C. Lorius, J.R. Petit, C. Ritz avec la collaboration de F.Yiou et G. Raisbeck)

Le profil détaillé de teneur en ¹⁰Be montre, en dehors des pics mentionnés ci-dessus, une similitude avec le profil de température. 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 en ¹⁰Be. La relation avec la température est due au fait que l'accumulation dépend de ce paramètre à travers la pression de vapeur saturante. Ainsi, le profil de température et celui de ¹⁰Be y donnent l'un et l'autre accès. La Figure 1.9 témoigne du bon accord entre ces deux estimations indépendantes et justifie de la prise ne compte de cette variation d'accumulation pour la datation des forages.

II.1.4.2 - HAUTES FREQUENCES DU SYSTEME CLIMATIQUE

(C. Genthon, J. Jouzel, C. Lorius avec la collaboration de P. Yiou (LGI), M. Ghil (JUA) et H. Le Treut (LMD))

Il est bien admis que le forçage astronomique joue, aux fréquences dites de Milankovitch (~ 100.000 ans pour l'excentricité, 41.000 ans pour l'inclinaison, 23.000 et 19.000 ans pour la précession), un rôle clef dans la succession des âges glaciaires et interglaciaires. Ces fréquences sont présentes dans divers enregistrements du paléoclimat du Quaternaire. Au delà de ces fréquences Milankovitch, les enregistrements contiennent généralement des hautes fréquences (i.e. supérieures à 1/19000) dont l'interprétation est susceptible d'apporter des informations sur le comportement des différentes parties du système climatique et plus particulièrement sur l'existence de non linéarités. Sur ce thème, une collaboration s'est établie avec des chercheurs du LMD et d'UCLA (Los Angeles) qui, en 1988, s'est concrétisée à deux niveaux :

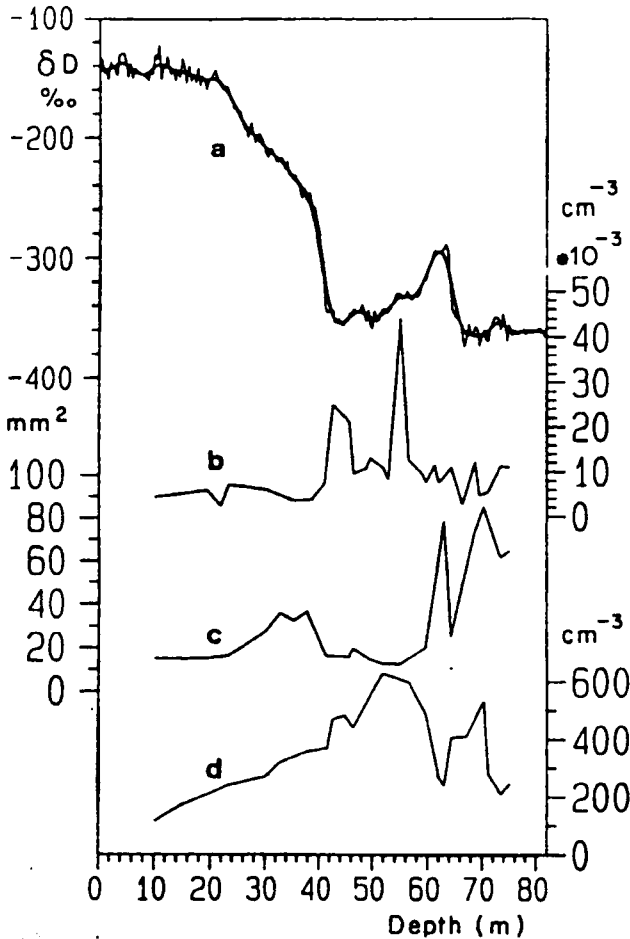


Figure 1.8 :

Forage Caroline (Terre Adélie) avec en fonction de la profondeur a) la teneur en deutérium (ensemble des points et courbe lissée) b) teneur en aérosols insolubles c) taille des cristaux d) concentration des bulles d'air. Le forage Caroline couvre probablement les 80.000 dernières années (d'après Yao et al., 1990).

- une approche purement théorique qui a consisté à incorporer les cycles isotopiques dans un modèle climatique simple et à comparer dans les

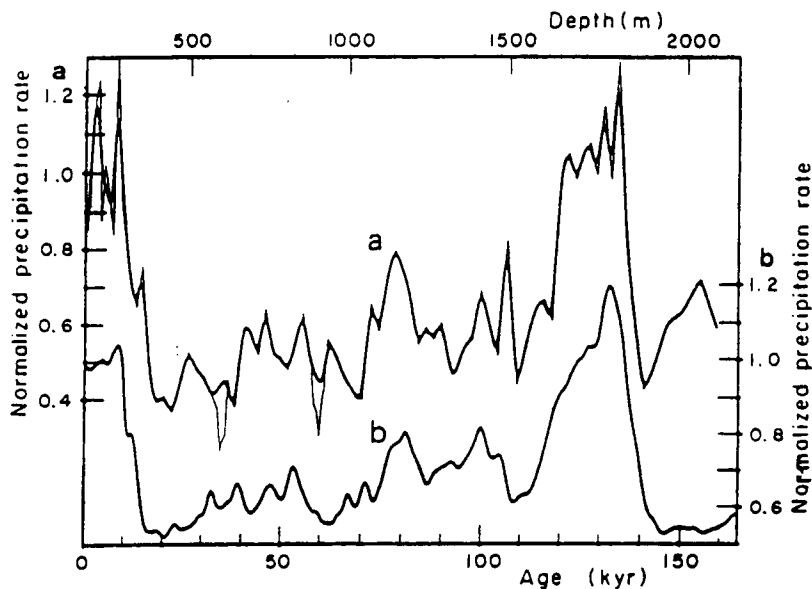


Figure 1.9 :

Taux de précipitation (normalisé par rapport à la valeur de l'Holocène) estimé : a) à partir de l'enregistrement ^{10}Be b) à partir du profil de température déduit de l'analyse de la teneur en deutérium (Lorius et al., 1989 ; Jouzel et al., 1989).

domaines temporel et spectral les séries simulées pour les sédiments marins et pour les calottes de glace. Les résultats mettent en évidence des hautes fréquences liées aux non linéarités du système et montrent que la stratégie d'une datation indépendante des carottes de glace (telle que nous l'avons adoptée pour Vostok) est préférable à une datation basée sur la comparaison avec l'enregistrement marin (Le Treut et al., 1988).

une analyse des hautes fréquences à Vostok établie à partir de la méthode non paramétrique de Thomson mieux appropriée que celle du maximum d'entropie utilisée antérieurement. Cette analyse illustre la richesse du spectre de Vostok dans le domaine des hautes fréquences. Elle a, par ailleurs, permis de mettre en évidence le dédoublement du pic précessionnel de façon très similaire à celle observée pour le forçage astronomique qui confirme l'intérêt de l'approche comparaison modèle simple-données dans le domaine spectral (Yiou et al., sous presse).

II.1.4.3 - POUSSIÈRES

Les aérosols insolubles contenus dans la neige et la glace antarctique ont une origine principalement continentale. Ceci est confirmé par des études à la microsonde sous microscopie électronique permettant d'identifier différents argiles et quartz (collaboration Lefevre et Gaudichet, Créteil). L'étude de la présence des divers types d'argile dans quelques niveaux de glace du forage de Vostok a permis de discuter l'origine géographique des poussières en comparant les résultats expérimentaux avec ceux fournis par le modèle de circulation générale du LMD (collaboration Joussaume, LGI). Si la contribution des différents continents de l'hémisphère Sud, en particulier l'Australie, semble bien présente dans les niveaux Holocène, on doit suggérer pendant la dernière période glaciaire la contribution dominante d'une source supplémentaire de poussières localisée sans doute en Amérique du Sud (Gaudichet et al., *soumis*).

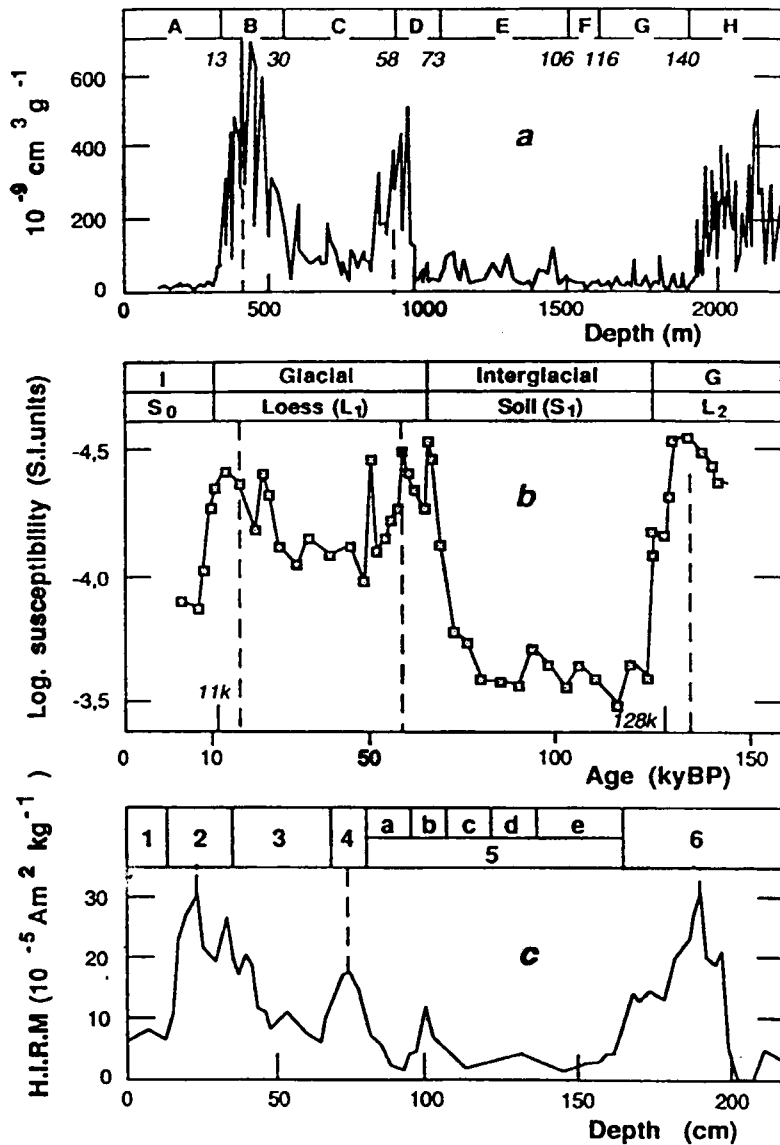


Figure 1.10 :

La quantité de poussières émise par les continents au cours du dernier cycle climatique a atteint des valeurs élevées au cours des périodes les plus froides ou au moment de l'extension des glaces terrestres. La comparaison entre différents enregistrements continentaux et océaniques suggère que ce phénomène serait une caractéristique globale :

- a) Vostok : concentration (volume total) des poussières insolubles,
- b) abondance de loess en Chine : site de Xifeng (dédié de la susceptibilité magnétique),
- c) signal éolien en Atlantique Nord : site King's Through Flank (dédié de mesures magnétiques (d'après Petit et al., 1990).

Sur les 2200 m du forage 3Γ de Vostok, le profil des concentrations en poussières est marqué par des augmentations significatives qui apparaissent en général pendant les périodes glaciaires. Ceci est interprété par l'augmentation de l'aridité continentale couplée à une circulation atmosphérique méridionale plus intense favorisant le transport des aérosols au-dessus de l'Antarctique. La mobilisation et le transport des poussières continentales pendant la période glaciaire semblent être un phénomène global comme le suggère la comparaison de la série Vostok à la série du loess de Chine ou des poussières en Atlantique Nord (*Figure 1.10*).

La chronologie du forage de Vostok est basée sur un modèle glaciologique donnant l'âge de la glace avec une précision de l'ordre de 10 % et constitue une série climatique datée de façon indépendante. La comparaison de Vostok avec les séries marines fait apparaître une différence de l'ordre de l'imprécision du modèle, vers 150.000 ans. Aussi avons nous proposé d'utiliser les poussières continentales comme marqueur stratigraphique. Nous avons retenu le carottage de RCII-120 dans l'Océan Indien qui est l'une des séries de base pour l'établissement de la chronologie SPECMAP et pour lequel il existe des mesures magnétiques. En faisant l'hypothèse que le flux de susceptibilité magnétique pouvait représenter le flux de poussières continentales, nous avons proposé une corrélation entre les deux séquences (*Figure 1.11*). Si notre hypothèse est vérifiée, les transitions glaciaire-interglaciaire seraient en phase et la différence de 10000 ans apparaissant entre les chronologies serait un artefact sans que nous puissions dire quelle chronologie est la bonne.

II.1.4.4 - LE FORAGE 4Γ : DONNEES PRELIMINAIRES

Le forage de Vostok a été poursuivi jusqu'à la profondeur de 2546 m et les analyses des concentrations en poussière continentale sont en cours. Les résultats préliminaires montrent que la période glaciaire avec de fortes concentrations en poussière qui se termine vers 1850 m de profondeur aurait débuté vers 2500 m environ. La portion de glace au-delà de 2500 m de profondeur a des concentrations en poussière semblables à celle de

l'Holocène. Elle correspondrait donc à une période interglaciaire que l'on trouverait sur les séquences marines pendant la période antérieure à 200.000 ans. L'étude conjointe des isotopes et des gaz à effet de serre est en cours.

II.2 - ETUDE DE L'AIR PIEGE DANS LA GLACE

Les thèmes abordés couvrent les domaines suivants

- 1 - Une approche **glaciologique** visant à comprendre les **mécanismes** de piégeage des gaz atmosphériques. Cette étude de mécanismes est indispensable pour **dater l'air** inclus dans la glace.
- 2 - L'étude de l'**évolution des gaz à effet de serre** à partir de l'analyse de l'air piégé dans la glace, afin d'appréhender :

- . le **rôle climatique** des variations des gaz radiativement actifs,
- . les interactions entre **cycle du carbone, cycles biogéochimiques et climat** qui mettent en jeu les réservoirs **océan et biosphère continentale**.

L'effort particulier porté sur les gaz radiativement actifs est lié à la perspective d'un réchauffement planétaire consécutif à l'augmentation, induite par l'homme, de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Cette perspective alerte actuellement l'opinion et les pouvoirs publics internationaux. La modélisation de l'impact climatique d'une augmentation des gaz radiativement actifs, rassemble les efforts de différents groupes au niveau international. Elle reste présentement imparfaite en raison de la complexité du système climatique (problème des effets rétroactifs) et des interactions mises en jeu entre cycles biogéochimiques et climatiques. Ceci justifie l'importance d'une approche complémentaire telle que celle fournie par l'étude des carottes de glace.

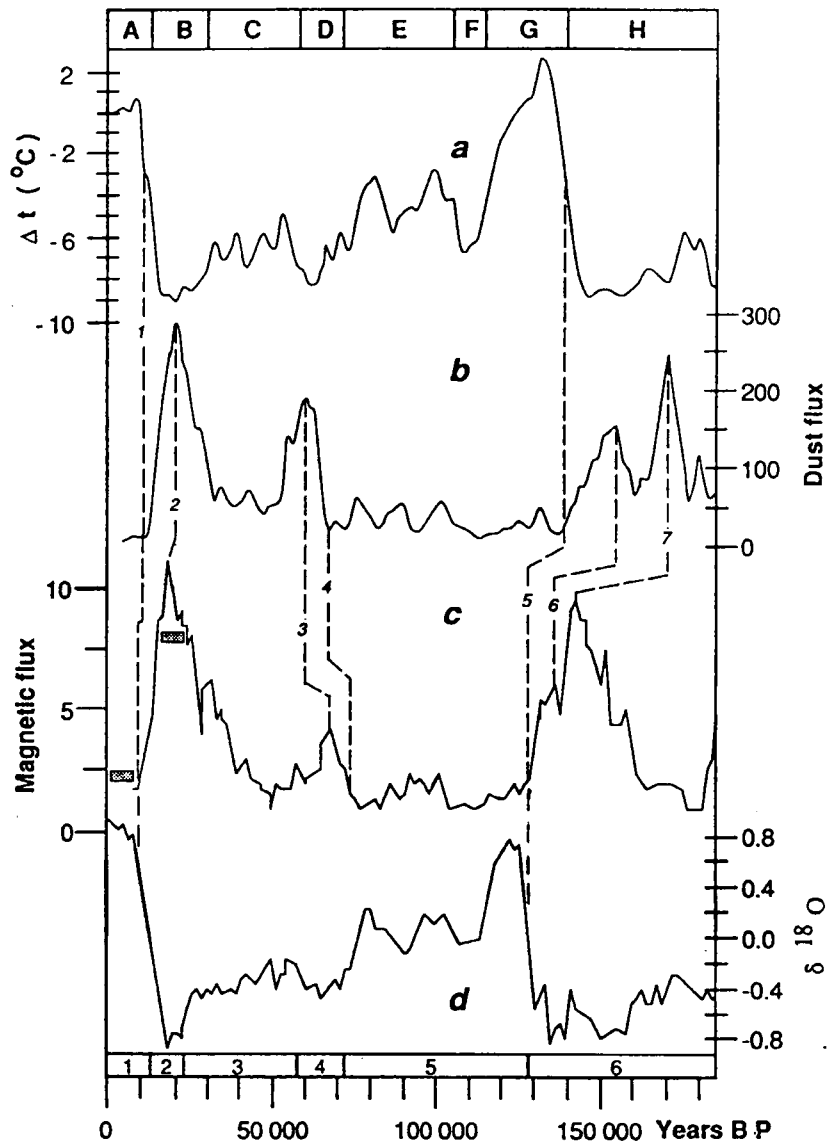


Figure 1.11 :

Comparaison entre les enregistrements de Vostok et de RC 11-120 (océan indien) au cours du dernier cycle climatique et leur correspondance stratigraphique au moyen des événements poussières :

a) Vostok : variation de la température,

b) Vostok : flux de poussières terrigènes,

c) RC 11-120 : flux de susceptibilité magnétique suggéré comme représentatif des poussières terrigènes. Les rectangles représentent les valeurs calculées du flux de quartz.

d) courbe normalisée Specmap de la teneur isotopique de l'eau de mer.

Les transitions glaciaire-interglaciaire entre milieu marin et Antarctique se produiraient en phase (d'après Petit et al., 1990).

Cette approche permet de déchiffrer les variations des constituants atmosphériques à effet de serre et à les comparer à celles de l'évolution du climat et de différents indicateurs des cycles biogéochimiques au cours du passé.

3 - Etude de la **phase atmosphérique du cycle de l'oxygène** à partir de l'analyse de celui contenu dans les bulles d'air de la glace. Il s'agit d'une approche originale et nouvelle, complémentaire de l'étude du **cycle du carbone** pour l'aspect de la **paléoproduktivité primaire**. Elle ouvre en outre des perspectives intéressantes dans le domaine de la corrélation entre **archives glaciaires et archives sédimentaires marines**.

4 - L'étude des **conditions de pression atmosphérique en surface des calottes au cours du passé** à partir de l'analyse de la teneur en air de la glace. Ce signal est susceptible de refléter des **changements d'épaisseur de la calotte et de circulation atmosphérique en région polaire**.

II.2.1 - Etude des mécanismes de piégeage de l'air atmosphérique par la glace (J.M. Barnola, P. Martinerie, D. Raynaud)

Il s'agit d'une étude de processus nécessaire à toute interprétation fine de l'enregistrement constitué à partir de l'occlusion des bulles d'air de la glace.

Les couches de neige déposées en surface se transforment progressivement en glace, milieu à porosité fermée n'échangeant plus avec l'atmosphère. Une conséquence directe est le fait que l'air piégé dans la glace (environ 10 % de son volume) est plus jeune que celle-ci.

L'interprétation fine des analyses de cet air en terme d'évolution de l'atmosphère, nécessite en particulier de **déterminer à quel moment et en combien de temps, l'air des bulles a cessé d'échanger avec l'atmosphère**.

Pour résoudre ce problème nous développons deux approches :

Mesures de porosité fermée dans le névé en transformation en glace (programme Eurocore) et mesures de différents traceurs : teneur en air de la glace, évolution de la composition de l'air dans les pores du névé, traceurs isotopiques ($\delta^{15}\text{N}$ en collaboration avec l'Université de Rhode Island, $^3\text{He}/^4\text{He}$ en collaboration avec le LGI Saclay), fréons (en collaboration avec LODYC/ORSTOM).

Modélisation de la densification du névé, en collaboration avec l'équipe Mécanique de la glace du LGGE.

Ce sont des travaux à long terme qui passent en particulier par l'obtention de nouveaux carottages pour aboutir à une solution plus globale du problème. Des résultats marquants ont été obtenus dans ce domaine au cours des quatre dernières années, certains en collaboration avec l'Université de Rhode Island :

L'hypothèse d'équilibre gravitationnel pur dans les pores ouverts du névé permet de prédire l'âge moyen de l'air par rapport à celui de la glace, à partir de modèles de densification. En ce qui concerne la séquence de Vostok, nous avons précédemment admis cette profondeur correspondant à la densité 0,815, indépendamment des conditions de température et du taux d'accumulation de la neige. Un modèle de densification tenant compte des variations en température et en accumulation sur cette profondeur a été développé. Cette amélioration sensible ne modifie pas l'âge de l'air en période interglaciaire mais, dans le cas de Vostok, "rajeunit" l'air glaciaire d'environ 1.500 ans. Il s'agit donc là d'une correction significative par rapport à la datation utilisée précédemment, (J.M. Barnola et al., *Nature*).

Des mesures actuelles de certains traceurs suggèrent en fait que l'équilibre gravitationnel n'est pas parfaitement réalisé au moment où l'air des bulles est isolé de l'atmosphère.

Cet effet dépend du site considéré et une évaluation correcte requiert de comprendre les mécanismes associés à la rupture de l'équilibre. Cette étape est

nécessaire pour établir finement certaines **relations de phase** entre les signaux enregistrés dans une même carotte de glace.

Ces résultats ont été présentés dans les publications suivantes :

J.M. BARNOLA ET AL. (TELLUS, 1991) POUR L'APPROCHE MODÉLISATION DE LA DENSIFICATION DU NÉVÉ,

T. SOWERS ET AL. (JGR, 1989) POUR L'APPROCHE TRACEUR $\Delta^{15}\text{N}$,

P. MARTINERIE (THÈSE, 1990) POUR L'APPROCHE TENEUR EN AIR.

II.2.2 - Gaz à effet de serre : CO_2 , CH_4 et N_2O

Cette recherche vise :

- à décrire, à partir de l'analyse des bulles d'air emprisonnées dans la glace, l'évolution passée de la composition de gaz atmosphériques radiativement actifs,
- à comparer ces variations et les changements climatiques,

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

II.2.2.1 - Evolution du CO_2

(J.M. Barnola, D. Raynaud)

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 .

Au début des années 80, les équipes de Berne et de Grenoble, (Nefel et al., Nature 1982 ; Delmas et al., Nature, 1980) montraient à partir des carottes de

glace que les concentrations atmosphériques en CO_2 avaient augmenté d'un facteur 1,4 (passant d'environ 200 à 280 ppmv) au cours de la dernière déglaciation. Cette découverte a largement stimulé la réflexion des biogéochimistes s'intéressant au cycle du carbone mais une explication satisfaisante de la variation atmosphérique observée est toujours recherchée. Les mesures du CO_2 menées au milieu des années 80 sur la carotte de Vostok, (J.M. Barnola et al., Nature, 1987) nous ont permis de montrer qu'il s'agissait d'un phénomène reproductible. La déglaciation précédente est, elle aussi, accompagnée d'une augmentation équivalente des concentrations en CO_2 . De plus, ces mesures révèlent, de façon plus générale, une excellente corrélation entre CO_2 et climat sur l'ensemble du cycle glaciaire-interglaciaire.

Au cours des dernières années, nous avons procédé à un réexamen de la relation CO_2 /climat basé sur de nouvelles mesures le long de la carotte de Vostok (en particulier profil à plus haute résolution sur des périodes-clés) et sur une évaluation plus précise de l'âge de l'air telle qu'elle a été décrite plus haut.

Notre effort a, en particulier, porté sur l'avant-dernière déglaciation (de préférence à la dernière, en raison de la meilleure qualité des carottes). Aux alentours de l'**entrée en déglaciation**, (Figure 1.12), nous disposons désormais d'un pas d'échantillonnage de l'ordre de 800 ans, valeur proche de la meilleure résolution temporelle que l'on puisse espérer pour cette partie de l'enregistrement de Vostok. Notre conclusion est que les **concentrations en CO_2 commencent à augmenter en phase ou légèrement après (moins de 1.000 ans d'écart) le signal climatique** enregistré en Antarctique. Ceci est en accord avec les résultats à haute résolution obtenus par nos collègues suisses sur la carotte de Byrd pour la dernière déglaciation. Par contre, il est confirmé qu'à l'entrée en régime climatique glaciaire aux hautes latitudes sud la baisse des concentrations en CO_2 prend place plusieurs milliers d'années après la baisse de température (Figure 1.12). L'ensemble de cette réévaluation de la relation CO_2 /climat d'après les données de Vostok, a été publié dans Tellus (J.M. Barnola et al., Tellus, 1991).

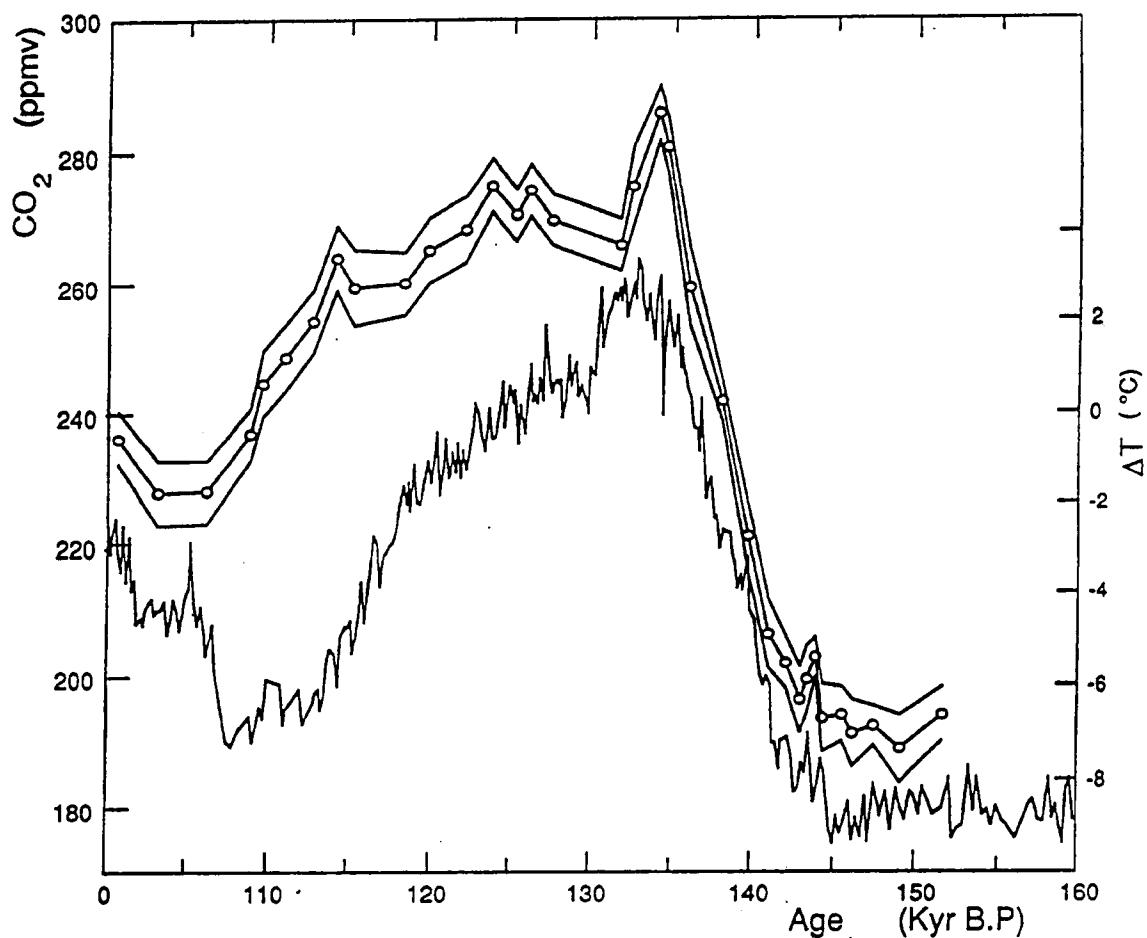


Figure 1.12 :

Station Vostok - variations du CO₂ et de la température en surface (déduite de la mesure isotopique de la glace) entre 100 et 160 kans BP. L'enveloppe de la courbe CO₂ reflète les incertitudes sur la détermination des concentrations.

Nous avons enfin initié une étude détaillée du CO₂ au cours de la période pré-industrielle (de l'an mille à la montée industrielle du CO₂), avec comme objectifs :

- 1) confirmer ou infirmer l'existence de variations du CO₂ en relation avec les épisodes climatiques du petit âge glaciaire ou de l'optimum médiéval,
- 2) identifier le sens et l'amplitude du gradient interhémisphérique. Pour ce faire nous étudions parallèlement une carotte groenlandaise (EUROCORE en collaboration avec le groupe de Berne) et de carottes antarctiques (D47 et D57). Les résultats préliminaires obtenus indiquent que les teneurs atmosphériques mesurées sur la carotte de l'hémisphère Nord sont plus élevées que celles provenant des carottes antarctiques.

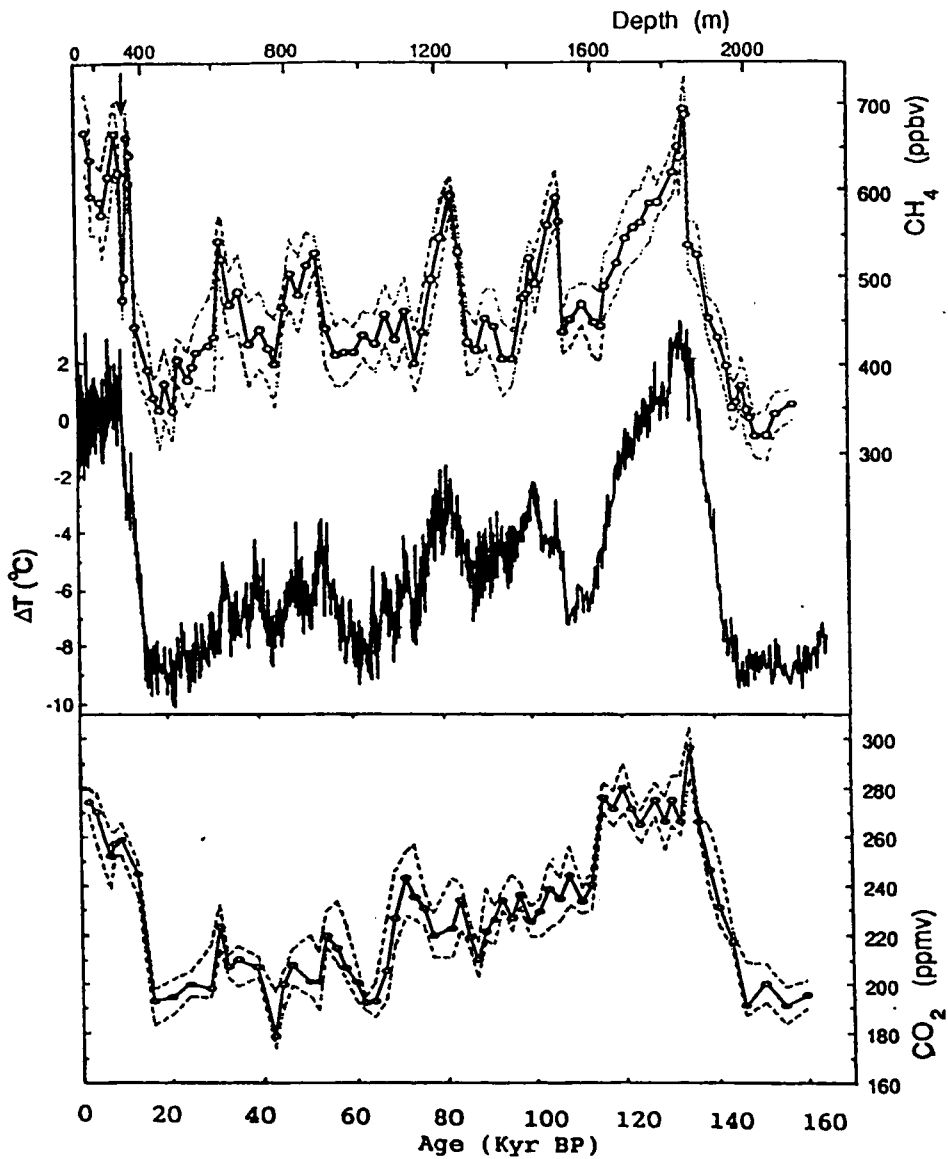


Figure 1.13 :

Carotte de Vostok.

Evolution du CH₄ (courbe du haut) au cours du dernier cycle climatique.

La flèche identifie l'oscillation attribuée au Younger Dryas. On note la relation de phase entre les variations du CH₄ et celles de la température en Antarctique (courbe du milieu) déduite de la composition isotopique de la glace. On a porté, pour comparaison, les variations en CO₂ obtenues sur la même carotte (courbe du bas).

II.2.2.2 - EVOLUTION DU CH₄

(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 CH₄ tient avec le CO₂ une place privilégiée (en raison de ses teneurs et de ses caractéristiques).

Les résultats obtenus depuis 1987 (D. Raynaud et al., *Nature*, 1988 ; J. Chappellaz et al., *Nature*, 1990) conduisent à la première reconstitution des variations du CH₄ tout au long du dernier cycle climatique et à une évaluation des causes possibles en terme d'évolution de ses sources et puits.

L'ensemble de l'enregistrement indique des variations marquées des concentrations en CH₄ dans la fourchette 0,35-0,65 ppmv, c'est-à-dire à des niveaux très nettement inférieurs à la teneur atmosphérique actuelle (~ 1,7 ppmv). Comme pour le CO₂, les variations les plus importantes sont observées approximativement en phase avec les deux réchauffements glaciaire-interglaciaire aux hautes latitudes Sud et il existe une **bonne corrélation** ($r^2 = 0,78$) **sur l'ensemble du cycle climatique entre le climat de Vostok et le CH₄ atmosphérique** : valeurs élevées (faibles) en CH₄ pendant les périodes chaudes (froides). On note cependant (*Figure 1.13*) des différences marquées entre les enregistrements CO₂ et CH₄ : en particulier à l'entrée en régime glaciaire à Vostok le CH₄ est pratiquement en phase avec la température et au cours de la période glaciaire il existe 4 pics de CH₄ bien résolus et pouvant atteindre des valeurs proches des niveaux interglaciaires ; ces pics sont généralement en phase avec des épisodes plus chauds de la température glaciaire à Vostok. Enfin il existe une oscillation de large amplitude (~ 60 % de la variation glaciaire-interglaciaire) au cours de la dernière déglaciation (*Figure 1.13*). Nous pensons que cette oscillation en CH₄ est associée au Younger Dryas, un événement abrupt de refroidissement intense observé dans l'hémisphère Nord au cours de la déglaciation.

Nous interprétons les variations observées tout au long du cycle climatique comme résultant

essentiellement des variations du flux de CH₄ émis par les sols saturés en eau sous l'influence de paramètres climatiques (précipitation, température...). De plus la morphologie de l'enregistrement du CH₄ à Vostok suggère l'importance des régions à basse latitude soumises aux variations d'intensité de la mousson. Bien qu'une évaluation quantitative des flux de CH₄ entrant et sortant du réservoir atmosphérique soit actuellement du domaine de la prospective (évolution du taux de destruction du CH₄ dans l'atmosphère par les OH, autres sources potentielles comme la décomposition de clathrates...) **les changements liés aux sols saturés en eau à basses et hautes latitudes sont vraisemblablement des éléments clés dans la régulation du CH₄ atmosphérique au cours du cycle climatique.**

En ce qui concerne la **période pré-industrielle**, nous menons un programme de mesures du CH₄ parallèle à celui du CO₂. Comme pour ce dernier, les résultats préliminaires indiquent des concentrations plus élevées dans l'Hémisphère Nord (Groenland) par rapport à l'Antarctique.

II.2.2.3 - EVOLUTION DU N₂O

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

En ce qui concerne le N₂O, 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 et montrent en particulier une augmentation d'une vingtaine de ppbv entre le 17e siècle et le début du 20e siècle. Ces résultats suggèrent, en outre, qu'au cours de la dernière transition glaciaire-interglaciaire les concentrations en N₂O atmosphérique aient pu être en augmentation. Ainsi N₂O apparaît 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.

Depuis un an, nous avons procédé à la mise au point au LGGE d'une nouvelle ligne d'extraction couplée à un chromatographe équipé d'un détecteur à capture d'électrons. L'extraction se fait par broyage sous vide d'environ 40 g de glace. La précision obtenue sur la mesure chromatographique du N_2O dans des conditions de pression partielle équivalentes à celles du gaz extrait de la glace est comprise entre 5 et 10 ppbv (teneurs attendues en N_2O entre 200 et 300 ppbv).

II.2.2.4 - IMPACT SUR LE CLIMAT

(J. Jouzel, C. Lorius, D. Raynaud, J.M. Barnola, J. Chappellaz)

Nous avons tenté d'évaluer la contribution des variations du CO_2 et du CH_4 (le N_2O n'étant pas encore suffisamment documenté) à la variabilité climatique à l'échelle du cycle glaciaire-interglaciaire.

On estime que l'effet radiatif direct de l'augmentation glaciaire-interglaciaire du CO_2 et du CH_4 (y compris la participation des variations de l'eau stratosphérique et de l'ozone troposphérique générées par celle du CH_4) conduit à un réchauffement d'environ $0,65^\circ C$, (Chappellaz et al., 1990), dont $0,5^\circ C$ pour le seul CO_2 . Ces chiffres sont à comparer à un réchauffement glaciaire-interglaciaire moyen en surface de l'ordre de 4 à $5^\circ C$. La difficulté majeure est d'évaluer la part des effets rétroactifs climatiques rapides (vapeur d'eau troposphérique, glace de mer, nuages) induits par les changements des concentrations en gaz à effet de serre.

Dans ce but nous avons examiné, sur l'ensemble du cycle climatique observé à Vostok, l'influence relative en tant que forçages climatiques du CO_2 , de l'insolation locale ($78^\circ S$) et de l'insolation (juillet) à $65^\circ N$ (qui contrôle vraisemblablement les variations de volume des grandes calottes de l'Hémisphère Nord) à partir d'une analyse multivariée (Genthon et al., 1987).

Nous avons depuis amélioré l'approche en ajoutant les forçages du CH_4 , de la charge en aérosols (à partir du profil poussière) et de la quantité de noyaux de condensation des nuages (à partir du profil en

sulfates ne provenant pas du sel marin). En ce qui concerne les seuls gaz à effet de serre ($CO_2 + CH_4$), le forçage global (reflétant les effets radiatifs et les effets rétroactifs climatiques rapides) expliquerait environ 50 % du signal de température déduit du profil isotopique de Vostok et couvrant l'ensemble du cycle climatique (Lorius et al., 1990). **En extrapolant ce résultat à une échelle plus globale, environ la moitié du réchauffement glaciaire-interglaciaire pourrait être le fait de la variation CO_2-CH_4 , la seconde moitié étant essentiellement associée à la disparition des grandes calottes de l'Hémisphère Nord.**

II.2.3 - Evolution du cycle de l'oxygène

(D. Raynaud en collaboration avec l'Université de Rhode Island)

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, en collaboration également 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 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 22.000 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 en gros à la variation isotopique de l'eau de mer liée à la fusion de la glace continentale à la fin de l'âge glaciaire.

La méthode a depuis été affinée tant au niveau expérimental qu'au niveau de la compréhension des corrections à introduire pour tenir compte du léger fractionnement prenant place au moment du piégeage du gaz par la glace. Ce travail, fondamental au niveau de la méthode, a été publié au JGR (*Sowers et al., 1989*).

L'étape suivante a permis de confirmer la variation glaciaire-interglaciaire en $\delta^{18}\text{O}$ de l'oxygène atmosphérique. Nous avons étudié l'avant-dernière déglaciation à Vostok (extraction des gaz à Grenoble, mesure spectrométrique à l'Université de Rhode Island). Les résultats, comparés à ceux obtenus à partir de l'analyse isotopique des foraminifères fossilisés dans les sédiments marins, indiquent que la variation du $\delta^{18}\text{O}$ atmosphérique (1,5‰) est bien semblable à celle du $\delta^{18}\text{O}$ océanique (1,3‰). De plus, ces deux variations semblent s'effectuer sur des intervalles de temps relativement proches. Nous proposons alors d'utiliser la variation glaciaire-interglaciaire du $\delta^{18}\text{O}$ atmosphérique comme proxy de la variation du volume de glace. Il devient ainsi possible **d'appréhender, à partir des seules carottes de glace, la relation de phase entre forçage climatique dû au gaz à effet de serre et volume des glaces continentales au cours de la déglaciation**. Nos résultats sur Vostok suggèrent, que dans le cas de l'avant-dernière déglaciation, l'augmentation du CO_2 atmosphérique démarre au moins 3.000 ans avant l'introduction significative d'eau de fusion provenant des glaces continentales dans l'océan (*Sowers et al., soumis à la revue *Paleoceanography**).

II.2.4 - Paleo-altitudes et paleo-pressions

(*P. Martinerie, D. Raynaud*)

(*Collaboration avec l'Institut de Recherches Arctiques et Antarctiques de Leningrad*)

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. Il faut noter que les variations climatiques 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 original dont nous avons la maîtrise au niveau international : la mesure de la **teneur en air de la glace** qui reflète à la fois la **pression atmosphérique** et donc l'**altitude** à laquelle la glace s'est formée, et la **porosité** de la glace au moment où l'air est isolé. Nous avons 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. La variation de la porosité à l'isolement avec la température est paramétrisée à partir du comportement observé de la teneur en air dans les conditions climatiques actuelles.

Le travail des dernières années a d'abord consisté à améliorer la méthode analytique (*P. Martinerie et al., J. Glaciology, 1990*) et à affiner très sensiblement la paramétrisation de la porosité (*P. Martinerie, Thèse, 1990 ; P. Martinerie et al., soumis à EPSL*). Nous montrons que ces améliorations sont de second ordre et que, **dans les conditions actuelles, la teneur en air est bien, de façon générale, un indicateur fiable de la pression atmosphérique moyenne régnant en surface**.

Parallèlement nous avons mené, en collaboration avec l'Institut de Recherches Arctiques et Antarctiques de Leningrad, un ambitieux programme de mesures de la teneur en air, le long de la carotte de Vostok (*P. Martinerie, Thèse, 1990 ; Lipenkov et al., sous presse*).

L'ensemble des mesures effectuées (plus de 1.000 mesures) constitue le premier profil haute résolution jamais obtenu de teneur en air sur une période glaciaire-interglaciaire. Cet enregistrement unique est compatible avec un **épaississement de quelques centaines de mètres des régions centrales de l'Antarctique de l'Est au cours des transitions**

glaciaires-interglaciaires (épaississement attribué à une augmentation substantielle des précipitations). Par contre, un tel effet ne peut expliquer qu'une partie de la variation observée en teneur en air. Ceci implique aussi des **pressions atmosphériques en surface au-dessus de l'Antarctique, plus élevées au cours des périodes glaciaires et/ou un comportement différent de la porosité à l'isolement par rapport à celui observé dans les conditions actuelles.**

Plusieurs "anomalies" abruptes de la teneur en air apparaissent en outre au cours des périodes glaciaires étudiées sur l'enregistrement de Vostok, suggérant elles-aussi un effet de porosité en conditions glaciaires non pris en compte par la paramétrisation liant porosité à l'isolement et température. Une des explications pourrait résider en l'existence de périodes à vents fortement variables en surface.

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
- 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).

Ces collaborations permettent de plus le lien avec les paléoclimatologues marins et la modélisation de

l'atmosphère (LMD).

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 Léninegrad) 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 (actuellement au laboratoire pour un séjour de 9 mois, bourse MRT) et B.A. Krutskikh de l'Institut de Recherches Arctiques et Antarctiques de Léninegrad,
- 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.
- Qin Dahé, Institut de Géophysique et Cryopédologie de Langzhou (Chine) qui a effectué un séjour de deux mois au LGGE,

III.2 - ETUDE DES GAZ ATMOSPHERIQUES :

Les travaux sur le CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ de la carotte du Mont Logan.

- une collaboration avec l'équipe de W. Seiler (Fraunhofer Institut 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 CO₂ du PNEDC.

III.3 - CONTRATS

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

IV - PUBLICATIONS

IV.1 - REVUES A COMITE DE LECTURE

Lorius, C., Barkov, N.I., Jouzel, J., Korotkevich, Y.S., Kotlyakov, V.M. and Raynaud, D. (1988) : Antarctic ice core : CO₂ and climatic change over the last climatic cycle, *EOS*, **69**, N° 26, 683-684.

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

Raynaud, D., Chappellaz, J., Barnola, J.M., Korotkevich, Y.S. and Lorius, C. (1988) : Climatic and CH₄ cycle implications of glacial-interglacial CH₄ change in the Vostok ice core, *Nature*, **333**, 655-657.

Gaudichet, A., De Angelis, M., Lefebvre, R., Petit, J.R., Korotkevich, Y.S. and Petrov, V.M. (1988) : Mineralogy of insoluble particles in the Vostok Antarctic ice core over the last climatic cycle (150 kyr), *Geophys. Res. Lett.*, **15** (13), 1471-1474.

Souchez, R., Lorrain, R., Tison, J.L. and Jouzel, J. (1988) : Co isotopic signature of two mechanisms of basal ice formation in Arctic outlet glaciers, *Annals of Glaciology*, **10**, 163-166.

Souchez, R., Tison J.R. and Jouzel, J. (1988) : Deuterium concentration and growth of Antarctic first year sea ice, *Geophys. Res. Lett.*, **15** (12), 1385-1388.



- Le Treut, H., Portes, J., Jouzel, J. and Ghil, M. (1988) : Isotopic modeling of climatic oscillations : implications for a comparative study of marine and ice core records, *J. Geophys. Res.*, D8, 9365-9381.
- Legrand, M., Lorius, C., Barkov, N.I., Petrov, V.N. (1988) : Atmospheric chemistry changes over the last climatic cycle (160,000 years) from Antarctic ice, *Atmospheric Environment*, **22**, n°2, 317-331.
- Ram, M., Gayley, L and Petit, J.R. (1988) : Insoluble particles in Antarctic ice : Background aerosol size distribution and diatom concentration, *J. of Geophysical Res.*, **93** (D7), 8378-8382.
- Sowers, T., Bender, M., Raynaud, D., (1989) : Elemental and isotopic composition of occluded O₂ and N₂ in polar ice, *J. of Geophys. Res.*, **94**, D4, 5137-5150.
- Zardini, D., Raynaud, D., Scharffe, D., Seiler, W., (1989) : N₂O measurements of air extracted from Antarctic ice cores : implications on atmospheric N₂O back to the last glacial interglacial transition, *J. of Atmospheric Chemistry*, **8**, 189-201.
- Lorius, C., Raisbeck, G., Jouzel, J. and Raynaud, D., (1989) : Long-term environmental records from antarctic ice cores, *Dahlem workshop PCB, "The Environmental Record in Glaciers and ice sheets"*, eds. H. Oeschger and C.C. Langway Jr., Wiley, 343-361.
- Jouzel, J., Raisbeck, G., Benoist, J.P., Yiou, F., Lorius, C., Raynaud, D., Petit, J.R., Barkov, N.I., Korotkevich, Y.S. and Kotlyakov, V.M., (1989) : The Antarctic climate over the late glacial period, *Quaternary Research*, **31**, N° 2, 135-150.
- Jouzel, J., Barkov, N.I., Barnola, J.M., Genthon, C., Korotkevich, Y.S., Kotlyakov, V.M., Legrand, M., Lorius, C., Petit, J.R., Petrov, V.N., Raisbeck, G., Raynaud, D., Ritz, C. and Yiou, F., (1989) : Global change over the last climatic cycle from the Vostok ice core record (Antarctica), *Quaternary International*, **2**, 15-24.
- Lorius, C., Barnola, J.M., Genthon, C., Jouzel, J., Legrand, M., Petit, J.R., Raisbeck, G., Raynaud, D., Ritz, C., Yiou, F., Barkov, N.I., Korotkevich, Y.S., Kotlyakov, V.M. and Petrov, V.N., (1989) : Long term climatic and environmental record from Antarctic ice, in : Berger A., Dickinson R. and Kidson J. (eds.), "Contribution of Geophysics to Climate Changes Studies", *Geophysical Monograph 52 AGU*, Washington DC, 11-16.
- Lorius, C. (1989) : Polar ice cores and climate, *Climate and Geo-sciences*, (A. Berger et al. eds), pp. 77-103, Kluwer Academic Publishers.
- Petit, J.R., Mounier, L., Jouzel, J., Korotkevich, Y.S., Kotlyakov, V.M. and Lorius, C. (1989) : Paleoclimatological and chronological implications of the Vostok dust record, *Nature*, **343**, 56-58.
- Lorius, C. (1990) : Environmental Records from polar ice cores. Earth's Climate and Variability of the sun over recent millenia, *Phil. Trans. R. Soc., London A.*, **330**, 459-462.
- Yao, P.P., Petit, J.R., Jouzel, J., Lorius, C. and Duval, P. (1990) : Climatic record from an ice margin area in East Antarctica, *Annals of Glaciology*, **14**, 323-327.
- Chappellaz, J., Barnola, J.M., Raynaud, D., Korotkevich, Y.S. and Lorius, C., (1990) : Atmospheric CH₄ record over the last climatic cycle revealed by the Vostok ice core, *Nature*, **345**, 127-131.
- Lorius, C., Jouzel, J., Raynaud, D., Hansen, J. and Le Treut, H., (1990) : The ice core record : climate sensitivity and future greenhouse warming, *Nature*, **347** (6289), 139-145.
- Aristarain, A., Jouzel, J. and Lorius, C. (1990) : A 400 years isotope record of the Antarctic Peninsula Climate, *Geophysical Research Letters*, **17**, n°12, 2369-2372.
- Martinerie, P., Lipenkov, V. and Raynaud, D., (1990) : Corrections of the air content measurements in polar ice for the effect of cut bubbles at the

- surface of the sample, *J. of Glaciology*, **36** (124), 299-303.
- Genthon, C., Le Treut, H., Jouzel, J. and Sadourmy, R. (1990) : Parametrization of Eddy Sensible Heat Transports in a Zonally Averaged Dynamic Model of the Atmosphere. *J. of the Atmospheric Sciences*. **47**, n°21, 2475-2487.
- Jouzel, J., Petit, J.R. and Raynaud, D., (1990) : Paleoclimatic information from ice cores : The Vostok records, *Transactions of the Royal Society of Edinburgh (Earth Sciences)*, **81**, 349-355.
- Raisbeck, G., Yiou, F., Jouzel, J. and Petit, J.R. (1990) : ^{10}Be and δD in polar ice cores as a probe of the solar variability's influence on climate. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A*. **330**, 463-470.
- Jouzel, J., Koster, R.D., Suozzo, R.J., Russell, G.L., White, J.W. and Broecker, W.S. (1991) : Simulations of the HDO and H_2 ^{18}O atmospheric cycles using the NASA GISS general circulation model : sensitivity experiments for present day conditions. *J. of Geophysical Research*, **96** (D4), 7495-7507.
- Barnola, J.M., Pimienta, P., Raynaud, D. and Korotkevich, Y.S., (1991) : CO_2 -climate relationship as deduced from the Vostok ice core : a reexamination based on new measurements and on a reevaluation of the air dating, *Tellus*, **43B**, 83-90.
- Martinerie, P., Lipénkov V., and Raynaud D., (1991) : Correction of air-content measurements in polar ice for the effect of cut bubbles at the surface of the sample, *J. of Glaciology*, **36** (124), 299-303.
- Ménières, M.A., Martinerie, P., Raynaud, D. and Lliboutry, L., (1991) : Glacial-interglacial mean sea level pressure change due to sea level, ice sheet and atmospheric mass changes, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology (Global and Planetary Change Section)*, **89**, 333-340.
- Petit J.R., White J.W., Young N., Jouzel J., Korotkevitch Y.S. (1991) : Deuterium excess in recent antarctic snow, *J. Geophys. Res.*, **96**, 5113-5122.
- Martinerie, P., Raynaud, D., Etheridge, D. and Mazaudier, D. (1991) : Physical and climatic parameters which influence the air content in polar ice, *Earth and Planetary Science Letters*, sous presse.
- Sowers, T., Bender, M., Raynaud, D., Korotkevich, Y.S. and Orchado, J. (1991) : The $\delta^{18}\text{O}$ of atmospheric O_2 from air inclusions in the Vostok ice core : timing of CO_2 and ice volume changes during the penultimate deglaciation, *Paleoceanography*, sous presse.

IV.2 - COMMUNICATIONS, COLLOQUES

Jouzel, J., Lorius, C., Petit, J.R., Genthon, C., Barkov, N.I., and Korotkevich, Y. (1988) : Climatic interpretation of continuous deuterium profile obtained from the Vostok ice core, Antarctica (160,000 yrs), *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.

Sowers, T.A., Bender, M.L., Raynaud, D. and Lorius, C. (1988) : Elemental and isotopic composition of O_2 and N_2 gases in ice cores (Abstract), *Annals of Glaciology*, **10**, 218.

Koster R., Jouzel J., Suozzo R. and Russell G. (1988) : Effect of the evaporative source temperature of HDO concentrations in Antarctic precipitation, *AGU Meeting, Baltimore, USA*, EOS, **69** (16) 366.

Petit J.R., Jouzel J., Lorius C., Genthon C., Barkov N.I. (1988) : L'enregistrement de la température et de l'environnement au cours du dernier cycle climatique (160 000 ans) à partir du forage de Vostok, *Société Hydrotechnique de France*,

section de Glaciologie, Paris, 10-11 mars 1988.

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 (extended abstract), *Annals of Glaciology*, **11**, 203.

Zardini, D., Raynaud, D., Scharffe, D. and Seiler, W. (1988) : N₂O measurements on air extracted from Antarctic ice cores (Abstract), *Annals of Glaciology*, **10**, 222.

Yiou P., Genthon C., Ghil M., Jouzel J., Le Treut H., Lorius C., Korotkevich Y. S. (1988) : High frequency paleoclimatic variability : a spectral analysis of the Vostok ice core isotopic record, *Scaling, fractals and non-linear variability in Geophysics, II : Fundamentals and applications*, Paris, Juin.

Jouzel J. (1988) : Isotopes in ice cores : a review, European Association for Geochemistry, Paris, septembre 1988, *Chemical Geology*, **70**, 109.

Petit J.R., White J.C., Young N., Jouzel J. and Korotkevich Y.S. (1988) : Deuterium excess in surface snow and the origin of Antarctic precipitation, *AGU Fall Meeting decembre 1988* (communication invitée).

Lorius C., Barnola J.M., Legrand M., Petit J.R., Raynaud D., Genthon C., Jouzel J., Barkov N.I., Korotkevich Y.S. and Kotlyakov V.M. (1988) : Vostok ice core data : key series for paleo-oceanography of the last climatic cycle, *AGU Fall Meeting, Dec; 1988* (communication invitée).

Jouzel J. and Raynaud D. (1989) : Atmospheric record from Vostok : recent results, *SPECMAP Workshop meeting*, Edimburg, 28-30 juin).

Jouzel J., Petit J.R. and Raynaud D. (1989) : Paleoclimatic information from ice cores, *Meeting on the Late Cenozoic Ice Age*, Edimburg, 3-5 juillet.

Petit J.R., Yao T., Barnola J.M., Duval P., Jouzel J. and Lorius c. (1989) : Climatic record from an ice margin area in East Antarctica, *Symposium on ice and climate*, Seattle, 21-25 août.

Yiou P., Genthon C., Ghil M., Jouzel J., Le Treut H., Lorius C., Korotkevich Y.S. (1989) : High frequency paleovariability in climate and in CO₂ levels from Vostok ice core records, *Conference on Modelling of global climate change and variability, Hambourg* (RFA), 11-15 septembre 1989.

Jouzel J. (1989) : Long term climatic changes : evidence from ice cores, *Meeting of future climate change and radioactive waste disposal*, University of East Anglia, Norwich, 1-3 Novembre.

Jouzel J. (1989) : Climat du passé, forçage astronomique et effet de serre, *Journées de l'Environnement*, Paris, 30 Novembre-1er décembre.

Raynaud, D., Jouzel, J., Barnola, J.M., Chappellaz, J. (1990) : Interactions between greenhouse gases and climate over the last climatic cycle as deduced from the Vostok ice core record. *Proceeding of the 28th Liege International Astrophysical Colloquium "Our changing atmosphere"*, pp. 385-401.

Jouzel J. (1990) : The Vostok ice core and its paleoenvironmental record. *Conference on Accelerator Mass Spectroscopy*, Paris, Avril 1990.

Lorius C., Raynaud D., Jouzel J., Chappellaz J., Barnola J.M. (1990) : Ice core data, climate and greenhouse forcing, *Congrès International de Chimie atmosphérique et pollution globale*, Chamrousse (France) 5-11 septembre.

Barnola, J.M., Genthon, C., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N., Korotkevich Y.S., Kotlyakov, V.M. et Lorius, C. (1991) : Reconstitution des variations du CO₂ atmosphérique en relation avec le climat au cours des derniers 160 000 ans à partir de la carotte de Vostok (Antarctique), *Symposium on "The beginning of an inland glaciation facts and*

- problems of climate dynamics", 12-14 Novembre 1987, Mayence (RFA), Palaoklimaforschung, sous presse.*
- Barnola J.M., Chappellaz J., Jouzel J., Raynaud D. and Lorius C. (1990) : Long term variation rates of climatic parameters recorded in the Vostok ice core, *Symposium Past and present climate dynamics, reconstruction of rates of changes*, Locarno, Suisse, 24-28 Septembre 1990.
- Ciais P., Jouzel J., Petit J.R., Barkov N.I., Kotlyakov V.M., Lipenkov V. and Lorius C. (1990) : A presentation of holocene antarctic ice record, *Symposium Past and present climate dynamics, reconstruction of rates of changes*, Locarno, Suisse, 24-28 Septembre 1990.
- Ciais P., Jouzel J., Petit J.R. and White J.W.C. (1990) : Deuterium excess in recent Antarctic snow deduced from a new isotopic cloud model, *Symposium Past and present climate dynamics, reconstruction of rates of changes*, Locarno, Suisse, 24-28 Septembre 1990.
- Joussaume S. and Jouzel J. (1990) : La modélisation des paléoclimats, *Journée "Géologie et climats", Variabilité climatique à différentes échelles de temps", Paris* octobre 1990.
- Petit J.R., Lorius C., Mounier L., Jouzel J., Korotkevich Y.S., Kotlyakov V.I. (1990) : Carottes glaciaires et marines, comment les corrélent ? *Journée "Géologie et climats", Variabilité climatique à différentes échelles de temps", Paris*, octobre 1990.
- Jouzel J. and Chappellaz J. (1990) : Climate during the Younger Dryas : ice cores, *NATO ARW Meeting "The last deglaciation : absolute and radiocarbon chronologies"* Erice, Italie, 10-11 décembre 1990.
- Lorius, C., Jouzel, J., Raynaud, D., Korotkevich, Y.S. and Kotlyakov, V.M. (1991) : Greenhouse warming, Climate sensitivity and Vostok data, *Proceedings of the International Symposium on Glaciers-Ocean-Atmosphere Interaction* Leningrad, sept. 1990.
- Martinerie, P., Raynaud, D., Lipenkov, V. Ya and Barkov, N.I. (1991) : Total gas content in ice cores : palaeoaspects, *Proceedings of the International Symposium on Glaciers-Ocean-Atmosphere Interaction*, Leningrad, Sept. 1990, Extended abstract.
- Lorius, C. (1991) : Polar ice cores : a record of climatic and environmental changes, *Global Changes of the Past*, (Raymond S. Bradley Eds.), OIES, Boulder, pp. 261-294.

IV.3 - AUTRES PUBLICATIONS

Petit, J.R., Duval, P. and Lorius, C. (1988) : Long term climate changes from crystal growth, *Nature* (correspondence), **332**, 593-594.

Burckle, L.H., Gayley R.I., Ram, M. and Petit, J.R. (1988) : Diatoms in Antarctic ice cores : some implications for the glacial history of Antarctica, *Geology*, **16**, 326-329.

Raynaud, D. (1988) : Climatic information obtained from air trapped in Antarctic ice. Antarctic Climate Research, *Antarctic Climate Research*, **3**, 3-5.

Petit, J.R., Gaudichet, A., De Angelis, M. Mounier, L. and Lefebvre, R. (1988) : Continently derived microparticles in central Antarctic ice core samples and their implications for climate studies, *Antarctic Climate Research*, **3**, 6-9.

Jouzel, J. (1988) : Ice isotopic records and Antarctic climate, *Antarctic Climate Research*, **3**, 13-14.

Joussaume, S. and Jouzel, J. (1988) : Ice cores and atmospheric modelling, *Antarctic Climate Research*, **3**, 11-12.

Raynaud, D. (1988) : Les calottes glaciaires : des archives du climat et de l'environnement de la planète. *Arts et Manufactures*, N° de décembre

Lorius, C. et Jaubert, J.L., (1988) : Terres et Océans

- Lorius, C. et Jaubert, J.L., (1988) : Terres et Océans Polaires, *Périscope*, PEMF, 50 p.
- Lorius, C. (1988) : Carottages profonds dans la glace Antarctique : variations à long terme du climat et de l'environnement atmosphérique, *Bulletin de la Société Française de Physique*, **70**, 13-16.
- Raynaud, D. (1989) : Archives glaciaires de l'Antarctique : climat et environnement atmosphérique au cours du dernier cycle climatique. Livre commémoratif du centenaire de la Station d'Endoume sur "Océanologie : Actualité et Prospective".
- Lorius, C. (1989) : Les archives glaciaires, *CNRS "Images de l'Environnement"*, 12-13.
- Lorius, C. (1989) : Antarctique : glaciologie, in *"Encyclopaedia Universalis"*, pp. 481-485.
- Jouzel, J. (1989) : Gaz carbonique et climat : le témoignage du passé, *Clefs CEA*, **13**, 2-16.
- Lorius C, Jouzel J. et Raynaud D. (1989) : Carottes de glace : âges glaciaires et effet de serre, *Libération*, N° Hors Série "La Terre Perd la boule", 22.06.89.
- Budd W.F., Andrews, J.T., Finkel, R.C., Fireman, Graf W., Hammer C.U., Jouzel J., Raynaud D., Reeh N., Shoji H., Stauffer B. and Weertman J. (1989) : How can an ice core chronology be established ? in *"The Environmental Record in Glacier and ice sheets"*, H. Oeschger and C.C. Langway eds, pp. 177-182.
- Yiou P., Genthon c., Jouzel J., Ghil M., Le Treut H., Barnola J.M., Lorius C., and Korotkevich Y.S. (1990) : High frequency paelo variability in climate and in CO₂ levels from Vostok ice core records. *Interactions of the global carbon and climate system, Electric power Research Institution Report*, ed. P. Keir.
- Lorius, C. (1990) : Calottes polaires et climat. *Le Grand Livre de l'Eau* (La Villette - La Manufacture), 247-249.
- Lorius, C. (1991) : *Glaces de l'Antarctique : une mémoire, des passions*, Editions Odile Jacob, 301 p.
- Jouzel, J., Lorius, C., et Raynaud, D. (1991) : Chauds et froids d'autrefois, *Sciences et Vie*, **174**, 32-39
- Lorius, C., Huet, S., Piro, P. et Delaleu, I. (1991) : Antarctique, laboratoire de la planète, *Sciences et Avenir*, **530**, 49-65.

IV.4 - THESES

- Chappellaz, J. (1990) : Etude du méthane atmosphérique au cours du dernier cycle climatique (à partir de l'analyse de l'air piégé dans la glace antarctique). *Thèse de Doctorat U.J.F Grenoble 1*. mention Mécanique. 210 p.
- Martinerie, P. (1990) : Teneur en gaz des glaces polaires. Variations géographiques actuelles, variations au cours du dernier cycle climatique dans la région de Vostok). *Thèse de Doctorat U.J.F Grenoble 1*. mention Physique. 412 p.

+ ° + ° +

CHAPITRE 2 :

**MODELISATION
DES ECOULEMENTS
DE GLACE**



I - OBJECTIFS GENERAUX

Ce thème s'intègre dans les recherches menées au Laboratoire en ce qui concerne :

- Les archives glaciaires. La modélisation de l'écoulement de la glace vise entre autre à déterminer l'âge et de l'origine géographique des carottes de glace. D'autre part les simulations globales des aérosols marins et

désertiques peuvent être testées avec le contenu en aérosols de la glace polaire.

- L'évolution du climat, avec un volet sur la modélisation de l'atmosphère et un autre sur la modélisation des calottes glaciaires (écoulement de la glace et évolution de la géométrie en réponse aux variations climatiques).

II - RESULTATS OBTENUS AU COURS DES QUATRE DERNIERES ANNEES

II.1 - MODÉLISATION CLIMATIQUE

(C. Genthon)

Un volet de modélisation climatique a été mis en oeuvre récemment (septembre 1989) au laboratoire. Deux axes d'étude ont déjà été engagés : la simulation des aérosols naturels et le développement de modèles d'intégration rapide adaptés à la simulation évolutive à long terme. Les travaux entrepris concernent essentiellement les échelles globales, avec néanmoins un intérêt particulier pour les régions polaires. On étudie le climat actuel ainsi que celui des âges glaciaires.

II.1.1 - Simulations globales des aérosols marin et désertique

Un ensemble de paramétrisations décrivant les principaux processus qui régissent la production naturelle et la distribution dans l'atmosphère des aérosols marin et désertique a été couplé à un modèle de climat, le Modèle de Circulation Générale (MCG) du Goddard Institute for Space Studies (GISS) (C. Genthon, 1991). Le choix et le développement de ces paramétrisations, leur insertion dans le modèle climatique et un certain nombre de simulations préliminaires ont pu être réalisés au cours du séjour post-doctoral de C. Genthon au GISS. Ce travail est actuellement

poursuivi depuis le laboratoire grâce à un réseau informatique international.

On s'intéresse à la propriété qu'ont ces aérosols naturels de tracer les changements du climat et de l'environnement. Les cycles glaciaires-interglaciaires ont été accompagnés de variations importantes des flux moyens de déposition des aérosols dans plusieurs régions du globe, et en particulier dans les régions polaires ainsi que l'a montré l'analyse des carottes de glaces. Afin d'interpréter ces observations, on compare dans le modèle l'importance relative des différents paramètres climatiques qui ont pu perturber le cycle de ces traceurs : aridité, vent de surface, turbulence atmosphérique, précipitation...

Appliquée au climat contemporain, la simulation d'aérosols-traceurs simples permet de mettre clairement en évidence des caractéristiques de la circulation atmosphérique qui peuvent influencer la distribution d'autres constituants plus complexes de l'atmosphère. Le cycle saisonnier des aérosols marin et désertique en Antarctique est en opposition de phase, une caractéristique que le modèle paraît reconstruire correctement (Figure 6.1). On peut aisément analyser les raisons de ce déphasage dans le modèle. Le cycle du sel marin en Antarctique est dominé par le cycle de sa production, et donc du

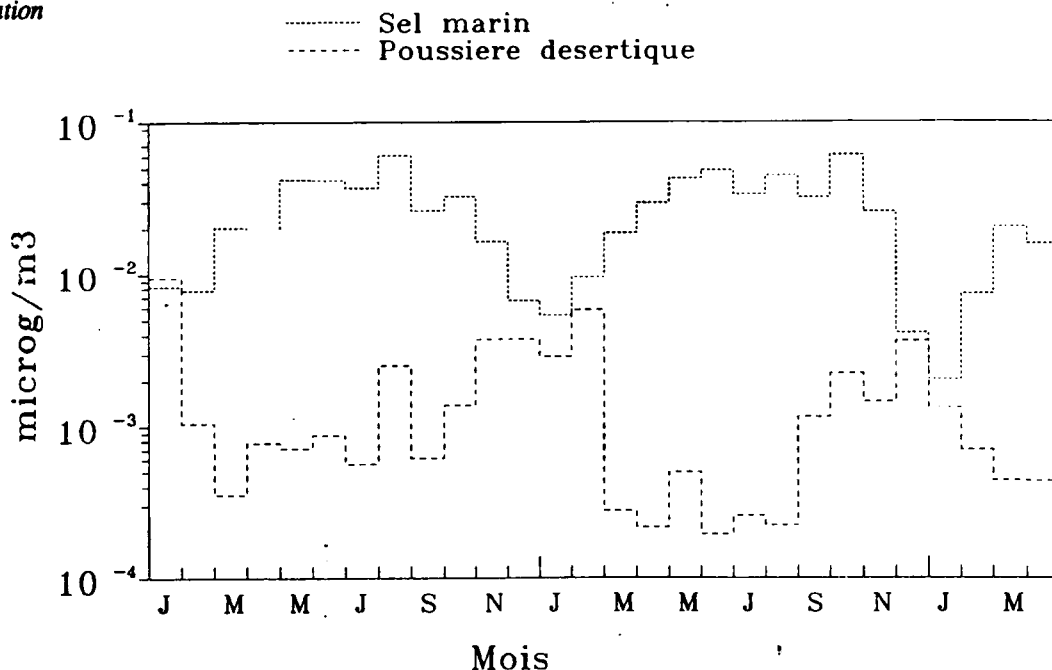


Figure 2.1 :
Concentrations en aérosols simulées au Pôle Sud

vent, à la surface de l'océan. Celui des poussières désertiques est au contraire contrôlé par la vitesse d'échange à travers la couche limite de surface, et donc par la stabilité de cette dernière.

La simulation globale d'aérosols reste cependant un problème complexe à cause de l'incompatibilité entre les échelles du modèle de climat d'une part et celles des mécanismes qui régissent la distribution des aérosols d'autre part. Ces derniers sont d'ailleurs fort mal connus. On part donc de formulations simples, pour certaines très empiriques, que l'on s'applique à tester et à affiner. On se heurte ainsi, à des problèmes intrinsèquement importants : définition et modélisation des zones arides, modélisation des échanges océan-atmosphère en présence de glace de mer, lessivage des constituants de l'atmosphère par la pluie... Une simulation correcte des aérosols constitue une contrainte forte et donc un test critique de la validité des solutions proposées pour ces problèmes très généraux.

Les paramétrisations mises en oeuvre, sauf pour les sources et la production, sont *a priori* utilisables pour n'importe quel type d'aérosol moyennant un éventuel ajustement de paramètres. Ceci permet d'utiliser le modèle pour l'étude du cycle d'autres éléments particuliers dans l'atmosphère, de tester et d'ajuster le modèle par simulation d'aérosols intrinsèquement moins intéressants, mais dont les

sources et la distribution en général sont mieux connues (par exemple, les radio-éléments fixés sur des particules : ^{210}Pb , ^7Be ...).

II.1.2 - Modélisation dynamique bidimensionnelle de l'atmosphère

Pour l'étude du climat à long terme, un Modèle Dynamique en Moyenne Zonale (MDMZ) constitue un compromis judicieux entre une indispensable rapidité d'intégration numérique et une représentation physique détaillée des processus climatiques. Construit par "zonalisation" d'un Modèle de Circulation Générale (MCG), un MDMZ conserve les formulations dynamiques et physiques complexes d'un MCG, qui sont simplement réécrites à deux dimensions. Certains processus de l'atmosphère fortement dépendant de la variance zonale des variables climatiques ne supportent pas cette zonalisation. Des paramétrisations de ces processus "azonaux" doivent donc être développées.

Une première étude (Genthon, 1987 ; Genthon et al. 1990) avait montré la faisabilité de la paramétrisation des transports méridiens et verticaux azonaux des énergies sensibles et latentes. Le MDMZ avait été développé à partir d'une version ancienne du MCG du Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) de Paris. Au cours de son séjour post-doctoral au GISS, C. Genthon a pu étudier la paramétrisation de l'effet

de la distribution océan-continent en longitude sur les flux de surface. Pour cette étude, c'est le MDMZ du GISS, apparemment le seul autre MDMZ existant de structure réellement comparable à celle d'un MCG, qui a été utilisé.

L'approche testée calcule les flux d'échange en surface (chaleur, humidité, quantité de mouvement) pour chaque type de surface (océan, terre, glace) existant dans une bande de latitude donnée. Pour ce calcul, les mêmes variables climatiques de première couche atmosphérique (température, humidité, vents), les variables moyennes zonales pronostiquées par le modèle, sont utilisées pour toutes les surfaces. La somme des flux de surface, pondérée par la fraction de chaque type de surface intervenant, affecte à son tour ces variables de première couche.

Cette formulation n'a pas d'emblée donné satisfaction. Dans les moyennes latitudes de l'hémisphère Nord, où la fraction continentale est relativement importante, on observe des températures de plusieurs degrés trop élevées et un assèchement complet du sol. L'atmosphère, plus chaude que la surface de l'océan, est rapidement isolée de celui-ci par le profil stable de la couche limite. L'évaporation au dessus de l'océan étant empêchée, l'atmosphère s'assèche et assèche le réservoir du sol. Le réchauffement du sol qui en résulte retro-agit positivement sur la température atmosphérique.

Diverses paramétrisations de la variabilité océan-continent de la température ont été testées, et des résultats acceptables ont été finalement obtenus. Il apparaît néanmoins que, quitte à devoir paramétriser des caractéristiques atmosphériques différentes au-dessus des différents types de surface, on peut d'emblée conserver un traitement explicite séparé d'un certain nombre de processus sur toutes l'épaisseur de l'atmosphère.

II.2 - MODELISATION DES CALOTTES GLACIAIRES

(C. Ritz, A. Letréguilly)

Ce travail a deux objectifs : modéliser l'évolution d'une calotte polaire sous l'action du climat et interpréter le mieux possible les données obtenues dans les forages profonds. Ils ne sont pas indépendants. Les données tirées des forages peuvent en effet servir soit d'entrée dans les modèles d'évolution (pour donner par exemple les

variations de la température en surface) soit de test des modèles (profils de température, inclinométrie). Réciproquement la connaissance des variations d'épaisseur de la calotte polaire au cours du temps permettrait une meilleure interprétation des forages profonds. Bien que ces deux problèmes nécessitent, en général, des modèles à des échelles différentes, les processus à prendre en compte sont les mêmes. Il faut savoir comment la calotte polaire est alimentée (précipitations) et comment la glace s'écoule et s'évacue vers les bords.

Nous disposons de deux types de modèles, tous deux bi-dimensionnels :

- L'un est dans un plan vertical et résout le problème couplé température/écoulement. Il s'agit d'un modèle forcé dans lequel la géométrie de la calotte est imposée (éventuellement variable au cours du temps). Il est principalement utilisé pour la datation des carottes et pour le calcul du champ de température qui peut être ainsi comparé avec les températures mesurées in situ dans les trous de forage.
- L'autre est dans un plan horizontal et permet en particulier d'étudier l'influence de la topographie du solce rocheux. Ce type de modèle est théoriquement plus réaliste car on ne fait pas d'hypothèses sur l'état stationnaire de la calotte mais il y a de fortes limitations sur les pas de temps et d'espace.

II.2.1- Paramétrisation des conditions aux limites basales pour calculer le champ de température dans les calottes glaciaires.

Le modèle résout, pour une ligne de courant, l'équation de la chaleur dépendante du temps. Les paramètres les plus sensibles sont ceux liés aux conditions aux limites.

Plusieurs auteurs ont envisagé des perturbations de température en surface, les autres paramètres cités plus haut étant supposés constants. L'objectif était en général d'interpréter les profils de température mesurés dans les trous de forage.

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

Modélisation

Pour le flux géothermique, il a fallu résoudre l'équation de la chaleur non seulement dans la glace mais aussi dans la couche de socle sous-jacente. Nous avons montré que cette précaution est indispensable pour bien simuler l'amplitude des variations de température d'origine climatique à l'interface glace-rocher. Grâce à cette étude nous avons déterminé l'épaisseur optimale de la couche de socle à introduire (5 km).

II.2.2 - Interprétation du profil de température mesuré à Vostok. (Ritz, 1989)

Notre but était de déterminer quelles informations il est possible d'obtenir à partir d'un profil de température mesuré.

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, la température calculée n'est en accord avec les mesures de terrain qu'avec les jeux de paramètres impliquant qu'au site même de Vostok, la base du glacier est au point de fusion.

En ce qui concerne le flux géothermique, il n'est pas possible d'obtenir un bon accord (mesure-calcul) pour des valeurs inférieures à 50 MW/m² car alors la température calculée est systématiquement trop froide quelle que soit l'accumulation. Il n'y a pas une très grande différence avec la valeur communément utilisée (le flux moyen pour un bouclier précambrien soit 40 MW/m²), mais cela conduit à une température à la base du glacier supérieure de 10°C, ce qui signifie une vitesse d'écoulement 5 fois plus élevée. Cette sensibilité au flux géothermique met en évidence un des problèmes majeurs de la modélisation à grande échelle de l'Antarctique : la mauvaise connaissance du flux géothermique. Réciproquement, on peut remarquer 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.

De même, il est possible de donner une limite supérieure pour l'accumulation actuelle (l'accumulation passée s'en déduisant grâce à l'enregistrement isotopique). La limite ainsi trouvée (2.6 cm/an) correspond à la borne supérieure des mesures de surface.

Il faut rappeler ici que l'âge calculé pour la glace de Vostok est inversement proportionnel à la valeur d'accumulation choisie et qu'il est donc très important de la déterminer le mieux possible. Cette valeur maximum donnée par l'étude du profil de température valide ainsi la chronologie donnée.

II.2.3 - Datation du forage de Vostok

Nous avons repris la datation du forage de Vostok publiée en 1985 (Lorius et al, 1985) en introduisant de notables améliorations dans les modèles d'écoulement et d'accumulation (Ritz, 1991). L'objectif était d'effectuer une étude de sensibilité systématique de façon à mieux cerner l'incertitude sur la datation et également de prendre en compte certaines nouvelles données :

- L'enregistrement en deutérium est beaucoup plus détaillé et mesuré sur une plus grande profondeur (2.500 m) que l'enregistrement initial en ¹⁸O. De plus, le deutérium est supposé mieux refléter la température.
- Le forage de Dôme B montre que l'accumulation en amont de Vostok est 50% plus forte que ce que prédit la relation basée sur l'isotope.
- La précipitation en Antarctique est plus élevée en hiver qu'en été ce qui contredit l'idée que la précipitation est uniquement gouvernée par la température.

Nous avons développé un modèle simple de précipitation (à une dimension) basé sur le bilan de vapeur d'eau dans le but d'expliquer au moins de façon qualitative ces deux derniers points et d'en tenir compte dans la datation. Il en ressort que la précipitation dépend non seulement de la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère (et donc de la température) mais aussi des processus de refroidissement de la masse d'air qui sont essentiellement la détente adiabatique, le déficit radiatif et la subsidence. L'importance relative de ces mécanismes dépend de caractéristiques locales telles que la topographie de la surface de la calotte.

On explique également pourquoi la précipitation est plus forte en hiver qu'en été : le déficit radiatif est plus grand en raison de la nuit polaire et la circulation atmosphérique est plus intense entraînant un refroidissement adiabatique plus fort.

Ce modèle s'il ne permet à lui seul de déterminer l'accumulation (il faudrait mieux connaître la circulation atmosphérique), permet par contre d'estimer quelles ont été les variations d'accumulation dans le passé. En particulier, sur le Plateau Antarctique, le mode de refroidissement est principalement le déficit radiatif et l'accumulation dépend essentiellement de la température (qui peut être obtenue à partir de l'isotope) et des caractéristiques locales qui sont supposées constantes dans le temps.

Finalement, pour reconstituer l'épaisseur initiale des couches de glace, l'enregistrement isotopique n'est pas suffisant. Il faut de plus tenir compte des caractéristiques (principalement l'accumulation actuelle) du site d'origine de la glace.

Les résultats de cette nouvelle étude sur la datation de Vostok par modélisation sont les suivants :

- Le modèle d'écoulement a une faible influence. Ceci est dû, entre autre, au fait que le forage de Vostok ne couvre qu'environ la moitié de l'épaisseur de glace et que les perturbations dues à l'écoulement n'apparaissent que dans le fond du glacier. Les variations d'épaisseur de la calotte dans le passé n'affectent pas non plus la chronologie de façon sensible.

- Le paramètre le plus sensible est l'accumulation actuelle à Vostok (car elle sert de référence aux variations spatiales et temporelles). Pour une profondeur donnée, l'âge est inversement proportionnel à cette valeur. Il est donc possible de caler la chronologie si l'on dispose d'un repère stratigraphique (par exemple les poussières, *Petit et al. 1990*).

- La variation d'accumulation entre Vostok et Dôme B joue également un rôle important. La *Figure 2.2* montre le signal en température à Vostok en fonction du temps selon plusieurs hypothèses sur ce type de variation.

II.2.4 - Modèle d'évolution appliqué à une ligne de courant en Antarctique.

Il s'agit, connaissant la géométrie de la calotte (surface et socle) ainsi que le champ de température à un instant donné, d'obtenir ces mêmes variables à l'instant suivant tout en satisfaisant les équations de conservation de la masse, de la chaleur, d'équilibre

quasi-statique et de comportement (rhéologie de la glace).

La démarche suivie consiste à calculer successivement les diverses variables :

- le champ de température (prognostique) est calculé en premier en résolvant l'équation de la chaleur dépendante du temps. Le forçage climatique intervient au niveau de la condition à la limite supérieure puisqu'on impose la température en surface.

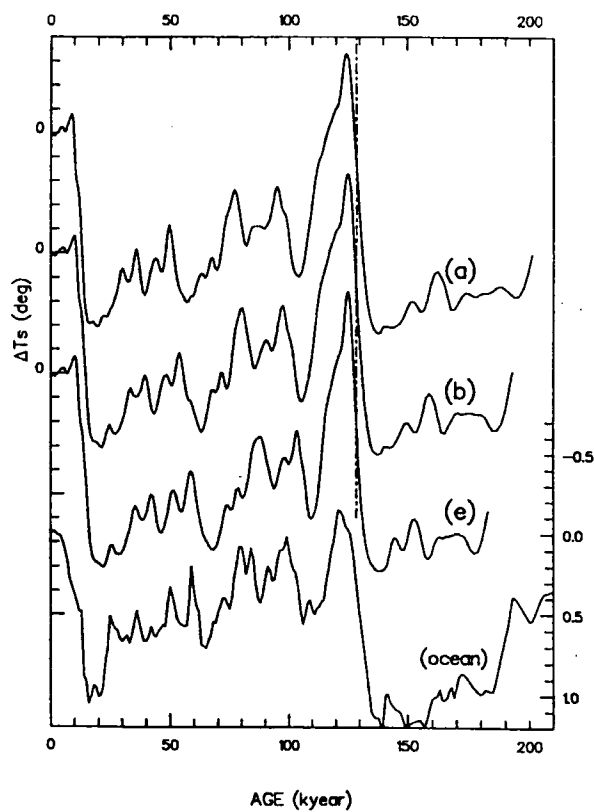


Figure 2.2

- les vitesses d'écoulement (diagnostiques) sont obtenues en simplifiant les équations d'équilibre quasi-statique. A ce stade du modèle, nous nous limitons à faire des études de sensibilité sur le glissement.

- L'épaisseur de glace le long de la ligne de courant est calculée en appliquant la conservation de la masse ce qui revient à résoudre une équation de diffusion (équation d'évolution) dont la diffusivité est proportionnelle au produit (vitesse x épaisseur).

- L'enfoncement du socle est supposé ne dépendre

Modélisation

que de l'épaisseur de glace à l'endroit considéré, et se produire après un temps de réaction que nous imposons comme paramètre.

Le couplage température-écoulement ne pose pas de problèmes particulier à condition de choisir un schéma "upwind" (vers l'amont) pour introduire l'advection dans l'équation de la chaleur. Pour l'équation d'évolution nous utilisons une méthode de résolution semi-implicite, mais même avec une telle méthode, la non-linéarité impose des limitations sur le pas de temps (de l'ordre de 10 ans pour une maille de 25 km).

Nous utilisons un modèle relativement sommaire d'ice-shelf (isotherme et non confiné), et calculons le déplacement de la ligne d'ancrage par une procédure itérative. Il apparaît cependant que les résultats sont très sensibles aux hypothèses faites sur le comportement mécanique de la nappe de glace dans la zone de transition entre calotte de glace (ancrée) et ice-shelf (flottant). Dans le cas d'une ligne de courant typique de l'Antarctique de l'Ouest, c'est-à-dire avec un socle au dessous du niveau de la mer, cette sensibilité est telle que la calotte peut se désintégrer ou non (dans les calculs) selon la paramétrisation de la contrainte longitudinale. Il faut noter que dans la littérature plusieurs auteurs se sont heurtés à ce problème. L'amélioration de cette condition à la limite est nécessaire pour simuler de façon réaliste le comportement des calottes glaciaires marines et une recherche spécifique sur ce thème a été entamée.

II.2.5 - Modèle de calotte isotherme appliqué à la Fennoscandie.

Il s'agit d'un modèle d'écoulement à 2 dimensions horizontales, c'est-à-dire un modèle qui prend en compte la topographie terrestre et l'épaisseur de

glace, mais pas les variations verticales de vitesses d'écoulement et de températures dans la glace. Cette simplification est faite afin de pouvoir simuler l'évolution de la calotte glaciaire sur des périodes de temps de 100.000 ans, ce qui est de l'ordre des cycles glaciaires/interglaciaires, à l'aide de temps de calculs acceptables sur l'ordinateur du LGGE. Le modèle intègre la déflexion isostatique de la lithosphère sous le poids de la glace.

Nous l'avons appliqué à la Fennoscandie (calotte aujourd'hui disparue, qui existait sur le nord de l'Europe à l'âge glaciaire et s'étendait alors vers le Sud jusqu'en Angleterre, couvrant une partie du Danemark et du Nord de l'Allemagne) afin d'estimer les possibilités pour l'Indlandsis Nord Européen de s'étendre encore plus au Sud au cours d'une glaciation future et plus précisément d'atteindre la Champagne (contrat CEA). Un des sites envisagés pour stocker les déchets nucléaires à longue durée de vie se trouve en effet dans cette région et la proximité d'une calotte glaciaire perturberait considérablement la région et donc la sécurité du site. Il semble en particulier qu'à la limite d'un Indlandsis il puisse se former de profondes tranchées (plusieurs centaines de mètres de profondeur), vraisemblablement sous l'action des torrents d'eau de fonte.

Le résultat des premières expériences effectuées avec ce modèle est une croissance incontrôlable de l'Indlandsis qui nous paraît due, d'une part à une mauvaise prise en compte de l'effet continental, d'autre part à une précipitation trop importante pour les très basses températures. La principale amélioration envisagée concerne donc le bilan avec le développement d'un modèle d'accumulation basé sur le bilan de l'eau atmosphérique et un modèle d'ablation dépendant du nombre de jours de température positive dans l'année.

III - COLLABORATIONS ET CONTRATS

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 de comparer la partie calcul du champ de température avec celle développée à Grenoble.

A. Letrégilly, embauchée à l'Université J. Fourier en Octobre 1990, a travaillé trois ans à l'Alfred

Wegener Institut, à Bremerhaven en RFA, sur 2 projets avec N. Reeh : le premier consistait en la collection d'échantillons de glace superficielle en zone d'ablation, au Groenland, afin de reconstituer les paléotempératures des 150.000 dernières années, le second en la modélisation de l'indlandsis groenlandais, à l'aide d'un modèle d'écoulement de la glace développé par Ph. Huybrechts (Université libre de Bruxelles, Belgique). Les températures dérivées par le premier projet ont été utilisées comme signal climatique pour l'entrée du modèle.

C. Genthon a travaillé plus d'un an au NASA Goddard Institute for Space Studies de New York, sur les thèmes de la modélisation climatique bidimensionnelle et de la simulation des aérosols dans l'atmosphère.

Collaborations nationales.

Sur le plan national cette équipe collabore avec :

- Le LMD et le LODYC de Paris : Modélisations climatiques globales tridimensionnelle et bidimensionnelle, simulation d'aérosols dans un modèle de circulation générale de l'atmosphère (Robert Sadourny, Hervé Le Treut, Sylvie Joussaume).
- Le GRGS de Toulouse : Etude des calottes polaires par satellite (J.F. Minster, F. Remy, M. Lefèvre).
- Le LGI de Saclay : Application du modèle forcé à l'interprétation du forage de D47 (P. Ciais).

IV - PUBLICATIONS

IV.1 - REVUES A COMITE DE LECTURE

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

Genthon, C., Le Treut, H., Jouzel, J. and Sadourny, R. (1990) : parameterization of eddy sensible heat transports in a zonally averaged dynamic model of the atmosphere. *J. of the Atmospheric Sciences*. **47**, n°21, 2475-2487.

Genthon C., (1991) - Simulations of the long range transport of desert dust and sea-salt in a general circulation model in *Proceedings of the 5th International Symposium "Precipitation Scavenging and Atmosphere-Surface Exchange Processes"*, Richland, WA, USA, 15-19 Juillet 1991.

IV.3 - AUTRES PUBLICATIONS

Ritz, C. (1988) : Dating of the Vostok ice core by flow modeling, *Antarctic Climate Research*, **3**, 15-16.

IV.4 - THESES

Genthon C., (1988) : Climat à long terme - Thèse de doctorat de l'Université de Paris VI, Septembre 1988.

+°+°+°+

CHAPITRE 3 :
TELEDETECTION

I - OBJECTIFS GENERAUX

Trois orientations principales ont été définies qui concernent l'Antarctique, la glace de mer et les régions alpines.

- En **Antarctique** le manque de données est un problème crucial dans le développement 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. Pour répondre à cet objectif, il est nécessaire d'étudier le rayonnement émis ou réfléchi par la neige dans différents domaines spectraux. Suivant la fréquence, on a en effet accès à des paramètres différents, soit de surface, soit de volume, jusqu'à quelques mètres de profondeur. Dans un premier temps, il s'agit de bien comprendre les phénomènes physiques influant sur la mesure. Il s'agira ensuite d'utiliser conjointement les informations délivrées par les nombreux instruments programmés pour les années à venir.
- Les études sur la **glace de mer** sont motivées par

son impact 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 amenés à étudier les possibilités de l'imagerie radar SAR (Synthetic Aperture Radar) qui offre une bonne résolution spatiale (30 m) 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 Groënland où ont lieu plus de 80% des échanges entre l'Océan Arctique et le reste des océans.

- Les études en cours dans les **régions alpines** ont pour but de valider les méthodes qui seront mises en oeuvre sur l'Antarctique. La proximité des Alpes nous offre la possibilité d'utiliser des instruments aéroportés ou de terrain conjointement à des mesures in situ beaucoup plus faciles à réaliser que sur les calottes polaires.

II - RESULTATS MAJEURS OBTENUS AU COURS DES QUATRE DERNIERES ANNEES

II.1 - ANTARCTIQUE

Les conditions météorologiques qui règnent en Antarctique (température, vent, rayonnement, précipitation) déterminent les processus d'accumulation de la neige ainsi que son métamorphisme. Le manteau neigeux est alors caractérisé par plusieurs paramètres physiques qui

dépendent de la profondeur : température, densité, taille et forme des grains principalement. Ce sont ces paramètres déterminants vis à vis de la signature spectrale de la neige que nous cherchons à évaluer à partir des données de télédétection disponibles.

II.1.1 - Radiométrie microonde

Les radiomètres microondes sont des instruments bien adaptés à l'étude de la neige. D'une part, ils sont presque indépendants des conditions d'éclairement et nuageuses et d'autre part ils donnent une information de volume sur une épaisseur de neige allant jusqu'à quelques mètres. Leur faible résolution (de l'ordre de plusieurs dizaines de kilomètres) n'est pas un handicap pour l'étude des grandes étendues polaires. Elle permet au contraire d'en assurer une couverture globale en quelques jours.

II.1.1.1- ETUDE STATISTIQUE DES DONNEES SMMR

(M. Fily, J.P. Benoist)

Le SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer) a été lancé en 1978 sur le satellite Nimbus 7 et a fonctionné pendant presque 9 ans fournissant un ensemble de données intéressant pour des études climatiques. Cet instrument mesure le rayonnement émis par la surface à cinq fréquences (6.6, 10.7, 18., 21. et 37. GHz) et aux deux polarisations horizontale et verticale.

Nous avons analysé les données du SMMR pour quatre périodes de l'année 1981 et pour une même période de chaque année de 1978 à 1985.

- 1) Aucun changement significatif n'a pu être décelé sur les 7 années étudiées.
- 2) La structure spatiale des données est très stable au cours de l'année.
- 3) Une analyse en composantes principales a révélé l'importance des basses fréquences dans la variabilité du signal. A partir de cette étude deux indices ont été choisis comme caractéristiques de la signature spectrale de la surface de la calotte polaire :

- le Rapport de Polarisation à 6.6 GHz

$$PR(6.6) = (TB_{6.6V} - TB_{6.6H}) / (TB_{6.6V} + TB_{6.6H})$$

avec TB : Température de Brillance

- le Gradient en Fréquence entre 18 et 6.6 GHz, polarisation verticale

$$GR(18-6.6) = (TB_{18V} - TB_{6.6V}) / (TB_{18V} + TB_{6.6V})$$

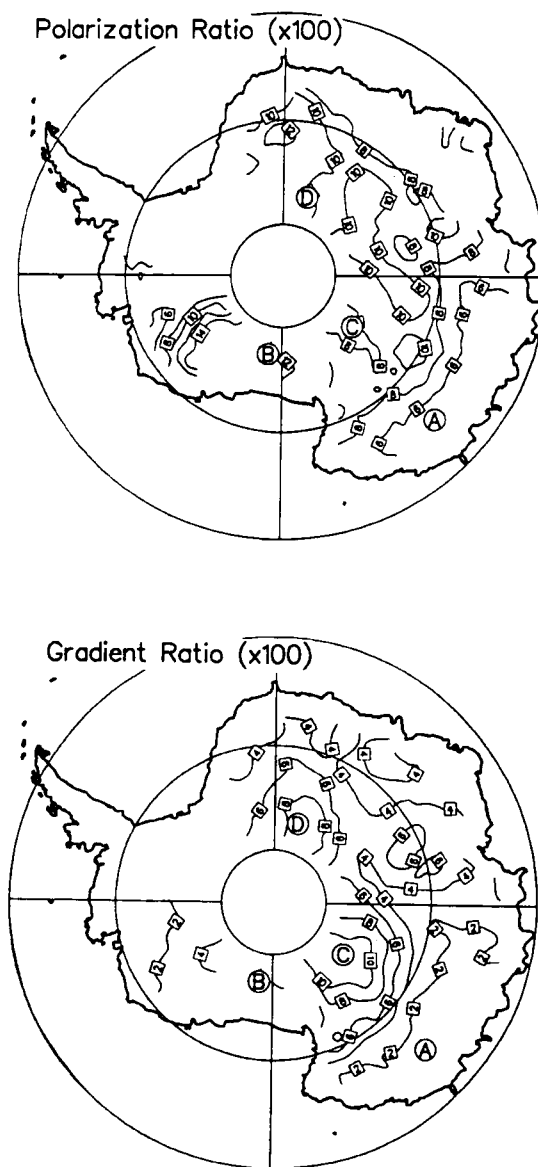


Figure 3.1 :
Distribution spatiale de PR et GR (cf. chapitre II.1.1.1) en Antarctique à partir des données de Novembre 1981. La valeur des isolignes est multipliée par 100.

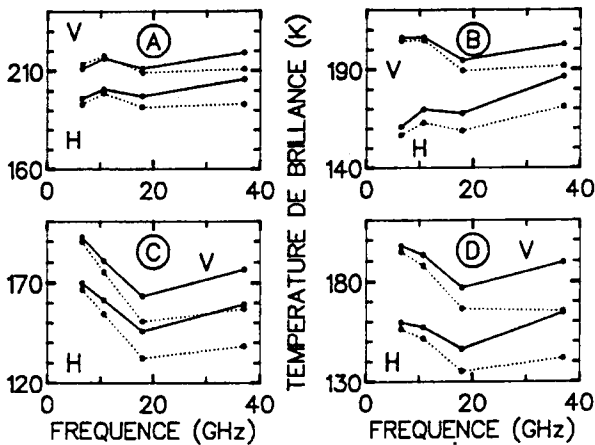


Figure 3.2 :

Exemples de signatures spectrales à partir des données du SMMR de 1981. Les lettres A, B, C, et D correspondent aux zones indiquées sur les cartes de la Fig. 1. H représente la polarisation horizontale et V la polarisation verticale. Les courbes en trait plein correspondent aux données de Janvier et celles en tiretés au mois de Juillet.

- 4) Les données ont été comparées aux données géophysiques à grande échelle (topographie, température, accumulation de neige) :
- les grandes valeurs de PR (6.6) sont caractéristiques des zones où l'accumulation est relativement faible par rapport à la température à cause d'un faible contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère.
 - Le Gradient en Fréquence a été relié à la topographie, les faibles valeurs de GR (18-6.6) apparaissant plutôt sur les dômes et crêtes. Cette particularité des zones de divergence apparaît également dans l'étude des différences été-hiver suivant les fréquences, qui est un indicateur de la profondeur de pénétration du signal.

La signature spectrale de la neige est donc clairement liée à différents processus d'accumulation et de métamorphisme de la neige.

La compréhension détaillée de ces relations et surtout leur quantification nécessite l'emploi d'un modèle d'émissivité.

II.1.1.2 - MODELE D'EMISSIVITE MICROONDE DE LA NEIGE

(S. Surdyk, M. Fily)

Le modèle utilisé est basé sur la solution aux ondes : résolution des équations de Maxwell au travers de la théorie des fortes fluctuations (Thèse en cours de S. Surdyk). La neige sèche, constituée d'air et de glace, est un milieu diffusant. Les caractéristiques diélectriques très différentes de ces éléments entraînent de fortes fluctuations dans le milieu. Le problème est divisé en deux parties traitées séparément, l'une caractérisant le milieu moyen et l'autre la partie aléatoire. La principale différence par rapport aux modèles existants basés sur la théorie du transfert radiatif (résolution en intensité au lieu de solution aux ondes) réside dans le fait que les couplages entre grains de neige γ sont considérés. Lorsque la fréquence augmente, les effets de couplage augmentent et pour des fréquences supérieures à 10 GHz, le modèle de transfert radiatif doit faire appel à un paramètre empirique.

Les grains de neige ne sont pas représentés par des sphères mais par une fonction d'autocorrélation à symétrie sphérique. Un premier cas (neige isotherme et homogène) a été traité en utilisant une solution analytique.

L'influence de trois paramètres a été étudiée : la température (T_n), la taille des grains de neige (Φ) et la densité (ρ). Quelques résultats sont présentés sur la Figure 3.3 pour différents types de neige, caractérisant la surface de la calotte polaire Antarctique.

Cette étude montre que :

- l'influence de la température est faible sur l'émissivité,
- la taille des grains a un effet très important sur le gradient en fréquence,
- la densité agit principalement sur la différence de polarisation.

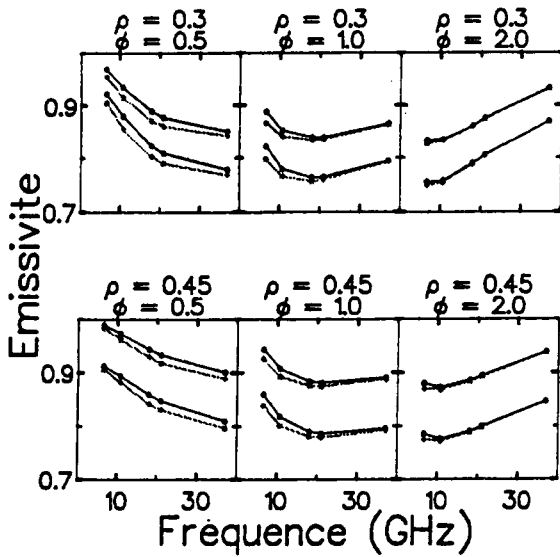


Figure 3.3 :

Emissivité de la neige calculée par le modèle pour différentes caractéristiques du manteau neigeux. ρ est la densité, Φ le diamètre des grains en mm. Les courbes en trait plein correspondent à une température $T = 220$ K, et les courbes en tiretés à $T = 250$ K. Les émissivités sont calculées pour les cinq fréquences du SMMR. Pour chaque cas les valeurs les plus fortes correspondent à la polarisation verticale et les plus faibles à la polarisation horizontale.

Le travail en cours consiste en l'amélioration du modèle précédent par l'introduction d'un profil de température et d'une stratification horizontale. Le profil de température a une grande incidence sur le gradient de la température de brillance suivant la fréquence puisque la profondeur de pénétration diffère à chaque fréquence. Dans ce cas, la solution fait appel à une résolution numérique.

II.1.1.3 - COMPARAISON DES DONNEES SMMR AVEC DES DONNEES DE TERRAIN
(S. Surdyk, M. Fily)

Plusieurs raids à travers l'Antarctique réalisés dans les années 60-70, ont permis de collecter des informations relatives au couvert neigeux. Cet ensemble de mesures permet d'évaluer la variation des caractéristiques de surface sur de longues distances. La faible variabilité de la distribution

spatiale de la température de brillance microonde durant les huit années de données du SMMR, nous autorise à comparer des données satellite récentes avec ces données de terrains plus anciennes.

Pour cette étude (Thèse en cours de S. Surdyk) une sélection de raids bien documentés a été faite de manière à échantillonner les différents types de signatures spectrales observés en Antarctique. Un exemple est donné sur la Figure 3.4 (axe Syowa-South Pole).

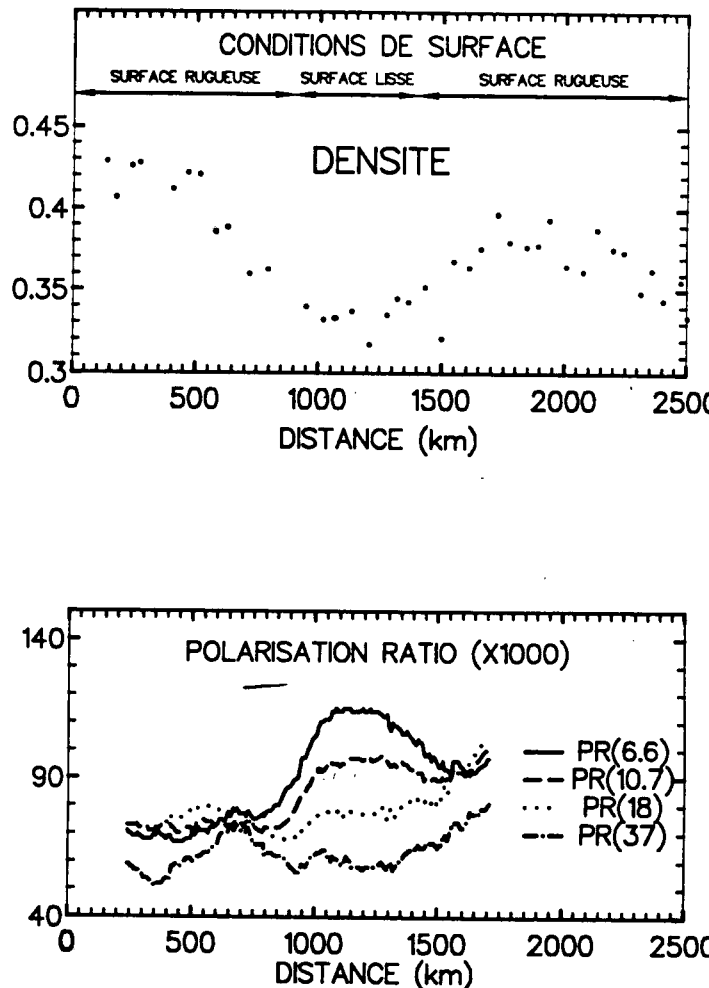


Figure 3.4 :

Variations de la densité et des "Polarization Ratio" (cf. chap. II.1.1.1) le long de l'axe Syowa-Pole Sud, en fonction de la distance à la côte.

Ce type d'étude permet de conclure que :

- 1) la stratification joue un rôle important sur la différence de polarisation et semble, par ailleurs, fortement liée à la densité
- 2) les variations du gradient en fréquence sont liées à la taille des grains d'une manière qui est en bon accord avec les résultats du modèle.

Cette comparaison doit nous permettre de faire apparaître les phénomènes importants qui jouent sur la signature spectrale, de valider les résultats du modèle, de préciser le type de mesure qu'il faut effectuer sur le terrain et enfin d'aider au développement d'un modèle d'évolution du manteau neigeux.

II.1.2 - Radiométrie visible et proche infrarouge (B. Lestringant, M. Fouquemberg, M. Fily)

Dans le proche infra-rouge, la réflectance de la neige dépend de la taille des grains. Pour évaluer si cette propriété contient une information sur la surface du manteau neigeux, nous avons mis en oeuvre un modèle de réflectance basé sur la théorie de la diffusion de Mie. (Stage de M. Fouquemberg).

L'étude d'une image Landsat sur la Terre Adélie est en cours (Thèse de B. Lestringant). Son but est de caractériser la surface de la neige à partir des luminances observées. Il s'agit de déterminer précisément l'influence de l'atmosphère puis de calculer les réflectances de la neige correspondant aux valeurs mesurées au niveau du satellite.

Ce type d'étude sera par la suite étendu à des instruments à large champ (AVHRR, Advanced Very High Resolution Radiometer des satellites NOAA), afin d'aborder la calotte polaire à plus grande échelle.

Parallèlement, la signature spectrale de la glace bleue a été précisée à partir du site connu de Cap Prud'homme.

II.1.3 - Radiométrie infrarouge thermique (V. Liger, N. Voisin, M. Fily)

La température de surface est importante pour établir des modèles de métamorphisme de la neige qui nous permettront d'interpréter les signatures spectrales observées dans le domaine des hyperfréquences. La détermination de ce paramètre par radiométrie infrarouge est le sujet de la thèse en cours de V. Liger.

L'instrument choisi est le THIR (Temperature Humidity Infrared Radiometer) de Nimbus 7 qui mesure le rayonnement à 6.7 μm et 11.5 μm . Ce choix répond à l'objectif initial d'une contribution à l'interprétation des données SMMR. Le travail porte sur le transfert atmosphérique (utilisation du code LOWTRAN 7) et, en particulier, sur les critères de sélection de ciel clair. Le bilan radiatif de surface est paramétrisé afin de comparer les données de télé-détection aux données de terrain dont nous disposons (températures de l'air à 2 ou 3 m de la surface).

Des données AVHRR de NOAA seront ultérieurement utilisées ainsi que les données de l'ATSR (Along Track Scanning Radiometer) de ERS1 qui seront obtenues par l'intermédiaire d'une proposition internationale acceptée par l'ESA.

II.2 - GLACE DE MER

La 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.2.1 - Algorithme de traitement des données radar

(M. Fily, D. Rothrock du PSC, Seattle, USA)

Nous avons utilisé 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 25 m et la taille des images de 100 x 100 km environ. Des algorithmes ont été développés 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 2 km,
- 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. La différence moyenne entre les déplacements obtenus automatiquement et manuellement est de 225 m, la médiane est de 75 m. De forts écarts apparaissent dans les zones très déformées. Par ailleurs, les résultats restent comparables si l'on utilise des données moyennées (1 élément = 3 x 3 pixels). Ceci divise la taille des images par 9 et est extrêmement intéressant d'un point de vue pratique.

Pour l'évaluation 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 apparaît comme un élément essentiel. La méthode de mesure adoptée ne nécessite pas de correction aux déplacements déterminés automatiquement.

II.2.2 - Arctemiz

(M. Fily, J.C. Gascard du LODYC, C. Kergomard du LOA)

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

Plusieurs campagnes ont eu lieu dans le détroit de Fram, avec notamment des études de courants marins et de dérive de glace. Leurs résultats servent de support à l'échantillonnage spatial et temporel des

données SAR.

Cette approche constitue une composante du projet international PIPOR (Program for International Polar Ocean Research) accepté par l'ESA. Elle concerne principalement les données SAR dans le détroit de Fram. Quatre ensembles de données ont été demandés à différentes périodes de l'année. Pour chaque période des couples d'images, à trois jours environ d'intervalle, seront nécessaires pour évaluer le déplacement de la glace.

Parallèlement des données de radiométrie visible et infrarouge (AVHRR de NOAA, ATSR de ERS1), et de radiométrie microonde (SSM/I du DMSP) seront analysées par C. Kergomard au LOA.

II.3 - PROGRAMMES ALPINS

II.3.1 - Radiométrie visible, proche infrarouge et microonde

(M. Fily, J.P. Dedieu du LAMA, E. Brun du CEN)

Nous collaborons actuellement avec le LAMA (Laboratoire de la Montagne Alpine) et le CEN (Centre d'Etude de la Neige) sur un programme d'étude de la radiométrie de la neige dans les Alpes. Un grand atout de ce programme est de disposer de la grande expérience du CEN en matière de mesures in situ .

Un projet d'utilisation de l'avion ARAT a été accepté par le PNTS qui concerne principalement l'utilisation du spectromètre infrarouge MIR. Malheureusement la programmation des vols ARAT entraîne quelques retards.

Un vol avec l'instrument POLDER (radiomètre à large champ et polarisant) a eu lieu en Avril 1990 par mauvaises conditions atmosphériques. Des contacts ont cependant été pris avec R. Frouin du LOA pour éventuellement obtenir des données POLDER lors d'une prochaine campagne en Antarctique.

La résolution de l'instrument PORTOS (radiomètre microonde) étant insuffisante pour une utilisation dans les Alpes à partir d'avion, des contacts ont été

pris pour son éventuelle utilisation à partir d'une cabine de télécabine à l'Aiguille du Midi.

II.3.2 - Données radar

(R. Allemand, M. Fily, J.P. Dedieu du LAMA)

Un des projets du CNES est de mettre en oeuvre sur satellite, d'ici une dizaine d'années, un radar à synthèse d'ouverture à vocation opérationnelle. Dans ce contexte, un groupe a été constitué pour étudier les possibilités thématiques d'un tel radar. Nous sommes en charge de la partie "Neige et Glace".

Une étude bibliographique a été effectuée sur les applications opérationnelles d'un radar sur la glace de mer ainsi que sur les zones enneigées. A cette

occasion ont été précisées les spécifications optimales du radar en termes de fréquence, géométrie, couverture, etc...

Dans ce cadre a eu lieu une expérimentation sur le site des Arcs dans les Alpes qui est bien connu du LAMA. Des images SAR ont été acquises en Décembre 1989 et Avril 1990 à partir d'un avion allemand. Des mesures de terrain ont pu être effectuées surtout en Avril. Le traitement des données a été effectué par le CNES. L'interprétation des données se fait en collaboration avec le LAMA. Le travail s'est d'abord focalisé sur les problèmes de géométrie spécifiques aux zones montagneuses. Il porte actuellement sur l'étude de la radiométrie en fonction du couvert neigeux, de l'angle d'incidence, etc...

III - COLLABORATIONS ET CONTRATS

Cette équipe collabore avec :

- Centre d'Etude de la Neige, Grenoble (E. Brun, Y. Durand)
- Laboratoire de la Montagne Alpine, Grenoble (J.P. Dedieu)
- Laboratoire d'Océanographie Dynamique et de Climatologie, Paris (J.C. Gascard)
- Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Lille (C. Kergomard)
- Polar Science Center, Seattle, USA (D. Rothrock)

Contact a été pris avec C. Matzler, Institute of Applied Physics, Berne, pour collaborer sur l'expérience de radiométrie microonde prévue dans les Alpes.

Dans le cadre de l'utilisation des données du satellite européen ERS1, elle participe aux activités des groupes internationaux :

- Program for International Polar Ocean Research (P. Gudmansen, chairman)
- Ice Sheet-ERS1 (R. Thomas, chairman)

Elle a bénéficié ou bénéficie des contrats suivants :

- 1) en tant que responsable du projet :
 - PNTS 1987 sur l'Antarctique: traitement données microondes principalement,
 - PNTS 1990 sur l'Antarctique: réflectance proche infrarouge,
 - contrat CNES, 1990, pour participation au groupe GARS et expérimentation radar.
- 2) en tant que collaborateur avec d'autres laboratoires :
 - PNTS 1988 sur la glace de mer en Arctique,
 - PNTS 1990 sur un programme alpin avec l'ARAT.
 - ATP "Télé-détection spatiale"

IV - ACTIVITES DE FORMATION

Cette activité est importante dans l'objectif de former une équipe de télédétection. Elle est actuellement assurée par M. Fily en tant qu'enseignant chercheur.

IV.1 - Enseignement

Un cours de télédétection a débuté en 1990 en Maîtrise de Physique et Applications. En 1991, deux nouveaux cours sont programmés en DEA MMGE : un cours en option "Imagerie" et un cours plus spécialisé en option "Neige et glace"

IV.2 - Encadrement de stagiaires

IV.2.1 - Elèves ingénieurs

. N.Voisin (juin-juillet 1989) de l'Ecole Supérieure de Physique de Strasbourg : traitement des données IR thermique sur l'Antarctique.

. M. Founquemberg (mars-juin 1991) de l'ENSP Grenoble : modèle de réflectance de la neige.

. R. Allemand (mars-juin 1991) : ENSP Marseille : traitement données radar SAR sur les Arcs.

IV.2.2 - DEA - Thèses

. B. Lestringeant (DEA MMGE en 1990, thèse en cours) : Réflectance de la neige dans le visible et le proche IR.

. V. Liger (thèse en cours) : Température de la neige en Antarctique par télédétection IR.

. S. Surdyk (DEA OOM juin 1990, thèse en cours) : Radiométrie microonde de la neige en Antarctique.

V - PUBLICATIONS

V.1 - REVUES A COMITE DE LECTURE

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

Fily, M., and Rothrock, D.A. (1990) : Opening and closing of sea ice leads: digital measurements from Synthetic Aperture Radar, *J. of Geophys. Res.*, **95**, C1, 789-796.

Fily, M., and Benoist, J.P. (1990) : Large scale statistical analysis of the Scanning Multichannel Microwave data over Antarctica, *J. of Glaciology* (sous presse).

V.2 - COLLOQUES, SYMPOSIUMS

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

Fily, M. et Rothrock, D.A. (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.

Fily, M., (1989) : Utilisation des données radar (SAR) sur la glace de mer, *Société Hydrotechnique de France, Section de Glaciologie*, réunion du 9-10 mars 1989, Grenoble.

- Fily, M. and Rothrock, D.A. (1989) : Extracting sea ice data from satellite SAR imagery, *9th EARSEL Symposium, Workshop on ice and snow* (Rapporteur M. Fily), 27 June-1 July, Espoo, Finland.
- Fily, M., (1990) : Télédétection des glaces en région polaire, *Colloque télédétection, Mesures physiques, Applications thématiques*, Grenoble, 11 mai 1990.
- Fily, M., (1990) : Applications du positionnement par satellite en glaciologie, *Journée Doris*, 18 Dec. 1990, CNES, PARIS.
- Kergomard, C., Gascard J.C. et Fily, M. (1990) : Using satellite remote sensing imagery for marginal ice zone research in the Arctemiz project, *Proceedings of the Space and Sea Colloquium*, Paris, 24-26 Sept. 1990, **ESA SP-312**, pp. 257-262.
- Fily, M., and Benoist, J.P. (1991) : Large scale study of the microwave signature of the Antarctic ice sheet, *Cinquième colloque international Mesures physiques et signatures en télédétection*, 14-18 Janvier 1991, Courchevel, France. A paraître dans publication ESA.
- Surdyk, S. et Fily, M. (1991) : Comparaison des résultats d'un modèle d'émissivité microonde de la neige avec les signatures spectrales observées sur l'Antarctique, *Cinquième colloque international Mesures physiques et signatures en télédétection*, 14-18 Janvier 1991, Courchevel, France. A paraître dans publication ESA.
- Surdyk, S., et Fily, M. (1991) : Comparaison entre les signatures spectrales observées sur la calotte polaire et un modèle d'émissivité, *Société Hydrotechnique de France, Section de Glaciologie*, Réunion des 25 et 26 mars 1991, Grenoble.

V.3 - PUBLICATIONS DIVERSES

Fily, M. and Rothrock, D.A. (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.

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

Fily, M. et Rothrock, D.A. (1989) : Utilisation des données radar (SAR) sur la glace de mer, *Bulletin Société Française de photogrammétrie et de Télédétection*, 115, 21-23

+°+°+

CHAPITRE 4 :
GLACIOCHIMIE

I - OBJECTIFS GENERAUX

Les études de glaciologie du LGGE s'appuient sur les recherches développées ces dernières années dans le domaine de la chimie atmosphérique, notamment à l'occasion du problème des précipitations acides. Elles constituent une approche originale au niveau international, la majorité des analyses de carottages se faisant généralement sous l'angle purement climatique. Les paléoclimatologues recherchent les mécanismes du climat. Les glaciologistes essaient pour leur part de comprendre quel a pu être **l'impact du climat sur les cycles biogéochimiques**, la période actuelle servant de référence avec, en sens inverse, l'obtention de données qui contribuent à comprendre l'état du système Terre dans des conditions climatiques différentes de celles observées actuellement. Nos recherches visent donc en fait à la compréhension de l'interaction climat-chimie atmosphérique. Dans le sillage des développements récents de grands programmes internationaux sur le maillon atmosphérique des cycles du soufre et de l'azote, ces recherches apportent des **informations inédites sur l'évolution de ces cycles dans le passé**, dans des conditions climatiques différentes.

Mais les travaux du groupe de glaciologie couvrent un éventail très large d'activités débordant largement les seuls cycles du soufre et de l'azote. Il faut mentionner ainsi les acides organiques, l'interférence entre le sel de mer et l'acidité atmosphérique, le paléovolcanisme, la combustion de la biomasse, le trou d'ozone polaire, le phénomène des El Nino, les métaux lourds dans l'environnement, les poussières continentales, la chimie de la neige dans les Alpes, l'étude de la matière extra-terrestre... et d'une façon générale tout ce qui reste à découvrir comme traces minérales ou organiques dans la neige.

Grâce à la détermination quasi systématique pour chaque échantillon d'un bilan ionique complet et équilibré, il est possible d'interpréter le système

chimique atmosphérique comme un tout et d'aborder l'étude d'un composé particulier en relation avec tous les autres.

Il est vrai que pour remonter de l'information glaciologique à la chimie atmosphérique, il faut comprendre la fonction de transfert à l'interface air/neige, ce qui n'est généralement pas un phénomène simple. Des études dans ce domaine fondamental sont désormais en cours de développement au Groenland.

Malgré ce handicap, il s'avère que l'approche glaciologique de la chimie atmosphérique est une méthode très puissante d'investigation de l'environnement et au cours des dernières années des progrès sensibles ont été réalisés, l'intérêt des résultats glaciologiques pour la chimie atmosphérique étant ainsi amplement démontré.

Le développement de **méthodes originales** et adaptées à la mesure des **très basses concentrations** généralement rencontrées dans ces régions de bruit de fond a été poursuivi. Ainsi, 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 méthane sulfonique), grâce à une maîtrise systématique, au cas par cas, des contaminations. Rappelons par ailleurs les très grandes difficultés analytiques à surmonter pour obtenir des résultats fiables de la teneur en certains métaux (Pb, Cd, Cu, Zn) de la neige polaire.

L'introduction 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.

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 comme les volcans.

II - RESULTATS OBTENUS AU COURS DES QUATRE DERNIERES ANNEES

II.1 - CYCLES BIOGEOCHIMIQUES (APPROCHE GLACIOCHIMIQUE)

II.1.1 - Cycle du soufre

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

ionique de la précipitation antarctique a permis de déterminer les différentes formes du sulfate ne provenant pas du sel de mer (le sulfate en excès) présentes dans la neige antarctique, à savoir : Na_2SO_4 , CaSO_4 et H_2SO_4 (Figure 4.1).

Notre effort pour établir systématiquement le bilan

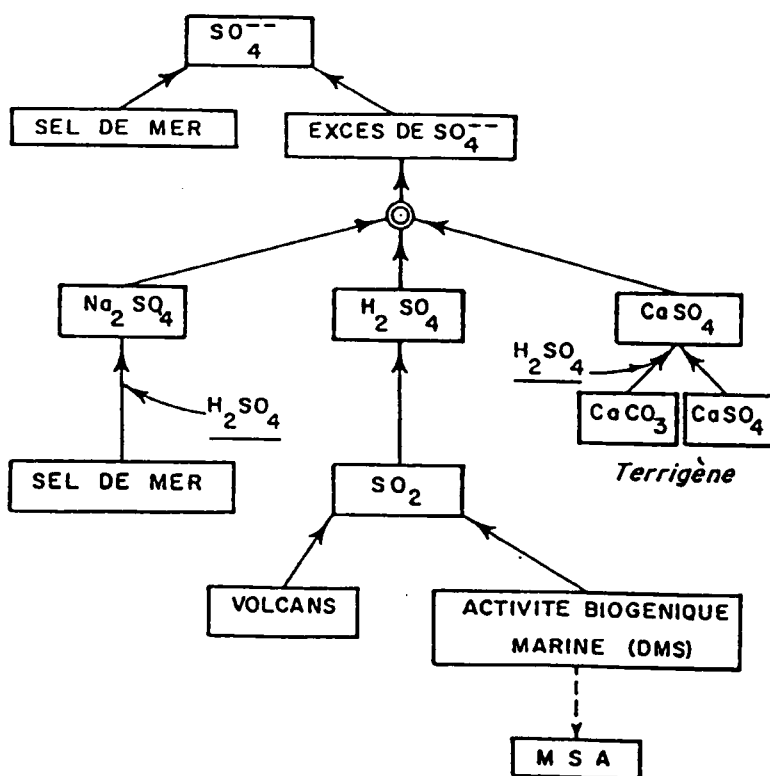


Figure 4.1 :

Les différentes origines du sulfate présent dans la neige antarctique. La contribution terrigène CaSO_4 ne devient significative qu'avec les importantes arrivées terrigènes caractérisant les périodes climatiques très froides.

Le niveau de base du sulfate dans la neige est perturbé sporadiquement par des apports de sulfate d'origine volcanique ayant atteint les hautes latitudes, soit via la troposphère (cas rare des éruptions aux hautes latitudes notamment dans l'hémisphère sud) soit via la stratosphère (cas des 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 s'avère 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 car les niveaux volcaniques s'y détachent beaucoup plus nettement au dessus du bruit de fond "marin biogénique".

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 avait été identifié à tous les sites Antarctiques étudiés.

Au Pôle Sud, le même type d'étude a porté pour la première fois sur les 1000 dernières années (Figure 4.2). Un événement, précisément daté 1259 grâce à une comparaison avec le Groenland, permet de recalibrer la datation de la calotte 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 6 par millénaire au maximum,

parmi lesquelles certaines n'ont d'ailleurs eu vraisemblablement qu'un impact régional (Tableau 4.1).

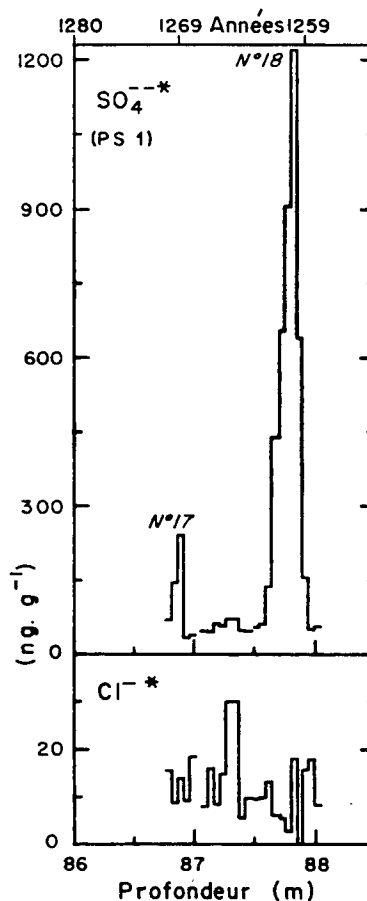


Figure 4.2 :

Eruption d'importance mondiale en 1259, datée par l'intermédiaire d'une intercomparaison avec le Groenland et facilement repérée au Pôle Sud (thèse S. Kirchner). Cet événement exceptionnel est utilisé en Antarctique comme horizon repère pour dater les carottages. Le lieu de l'éruption n'a pas été identifié. Noter l'absence d'un signal chlore durant le pic de sulfate. Une éruption "mineure" est aussi repérée quelques années après (N°17).

L'identification des événements volcaniques repérés est un réel problème d'autant plus aigu qu'on remonte dans le temps. Des travaux (stage de J. Palais) portant sur les couches acides d'origine volcanique démontrent qu'il est possible d'y trouver de très fines cendres ($\Phi < 10 \mu\text{m}$). L'analyse

SIECLE	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10
RETOMBÉES DE SULFATE (NORMÉES SUR LE XXÈME SIÈCLE)	1	14	0	4	1	6	1	22	4	4	1
NOMBRE D'ÉRUPTIONS	1	6	0	3	1	2	1	3	3	1	1

Tableau 4.1 :

Fréquence des éruptions volcaniques majeures repérées au Pôle Sud au cours du dernier millénaire. Noter que les retombées de sulfate ont été les plus importantes au 13è siècle mais que c'est au 19ème que le nombre d'éruptions a été le plus grand (thèse S. Kirchner).

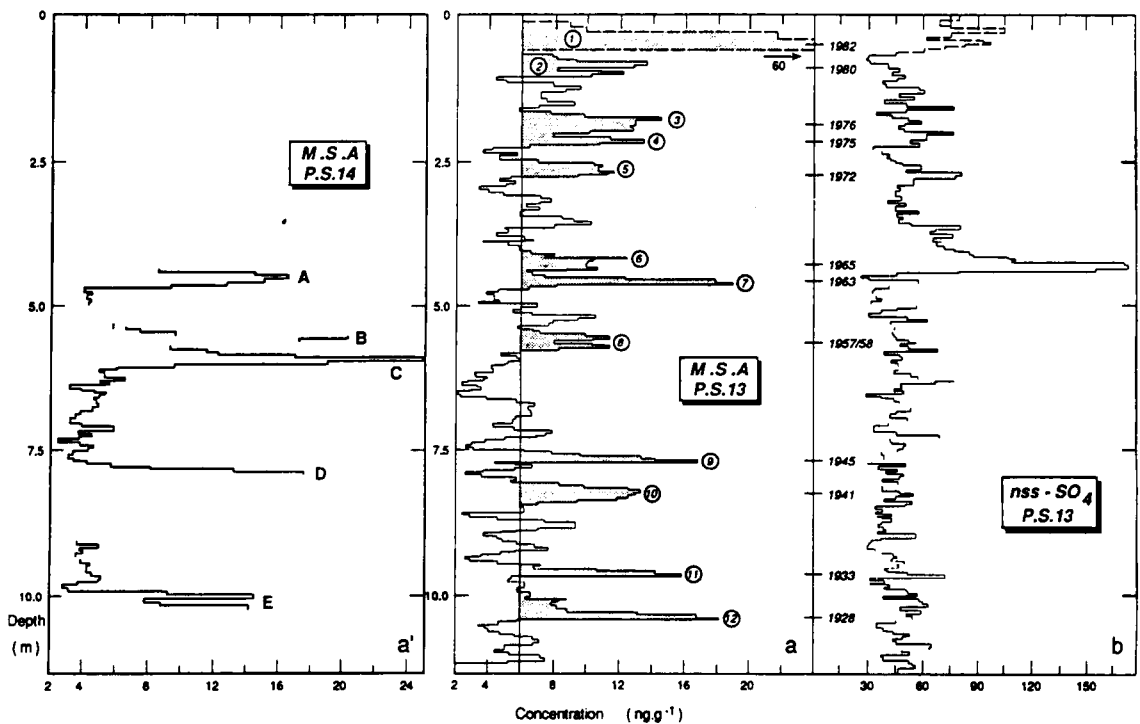


Figure 4.3 :

MSA et excès de sulfate dans la neige déposée au Pôle Sud entre 1922 et 1984. La brusque augmentation de sulfate à 4,3 m correspond à l'éruption du Mont Agung (1963), l'augmentation plus modérée près de la surface à l'éruption du El Chichon (1982). Les pics de MSA N° 1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 correspondent aux El Nino 1982, 1976, 1972, 1965, 1963, 1957, 1943, 1940, 1932 et 1926 (Legrand et Saigne, G.R.L., 1991).

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 (Palais, Kirchner, Delmas, 1990).

Nous avons proposé qu'en période non volcanique l'excès de sulfate provenait de l'oxydation atmosphérique du sulfure de diméthyle (DMS) émis depuis la surface de l'océan. La mise en oeuvre de la mesure de l'acide méthanesulfonique (MSA) (Saigne, Kirchner, Legrand, *Anal. Chim. Acta*, 1987), autre produit d'oxydation du DMS, s'est révélée être un atout indiscutable pour identifier le soufre d'origine volcanique par rapport à celui lié aux émissions biogéniques marines (Legrand et Saigne, *Atmos. Environ.*, 1988). L'étude du MSA dans la neige antarctique confirme que l'excès de sulfate de la précipitation antarctique provient surtout de l'oxydation du DMS. Par ailleurs, l'étude simultanée du sulfate en excès et du MSA dans la neige antarctique a, pour la première fois, montré l'importance relative du MSA sur la production du SO_2 (qui conduit à SO_4) comme produit d'oxydation du DMS dans l'atmosphère des hautes latitudes (Saigne et Legrand, *Nature*, 1987). Ce résultat est important 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 parvenu à résoudre complètement. Dans sa thèse, C. Saigne met ainsi en avant le rôle de la température d'oxydation sur la proportion relative des deux produits d'oxydation majoritaires que sont le SO_2 et le MSA (Legrand et al. *in press*).

L'étude détaillée du profil de MSA obtenu dans la neige déposée au Pôle Sud au cours des 60 dernières années met clairement en évidence une corrélation entre les augmentations de MSA et les plus importants phénomènes El Nino ayant eu lieu sur cette période de temps (Figure 4.3, Legrand et Saigne, 1991).

Ce travail représente peut-être la découverte la plus excitante depuis de nombreuses années en glaciochimie. Dans une publication à *Nature*, nous suggérons quelques hypothèses susceptibles de

rendre compte de cette forte téléconnection. Cette découverte devrait ouvrir de nouvelles voies de recherche sur les échanges océan-atmosphère aux hautes latitudes.

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 zone marine, nous a conduit à nous intéresser au rôle possible du sulfate en excès comme facteur de forçage du climat. Nous avons examiné cette hypothèse à partir du profil de sulfate en excès sur le dernier cycle climatique. D'après celui-ci et le profil de MSA associé, les émissions biogéniques marines soufrées semblent avoir été fortement influencées par les conditions climatiques passées (Legrand et al., *Nature*, 1991) (Figure 4.4)

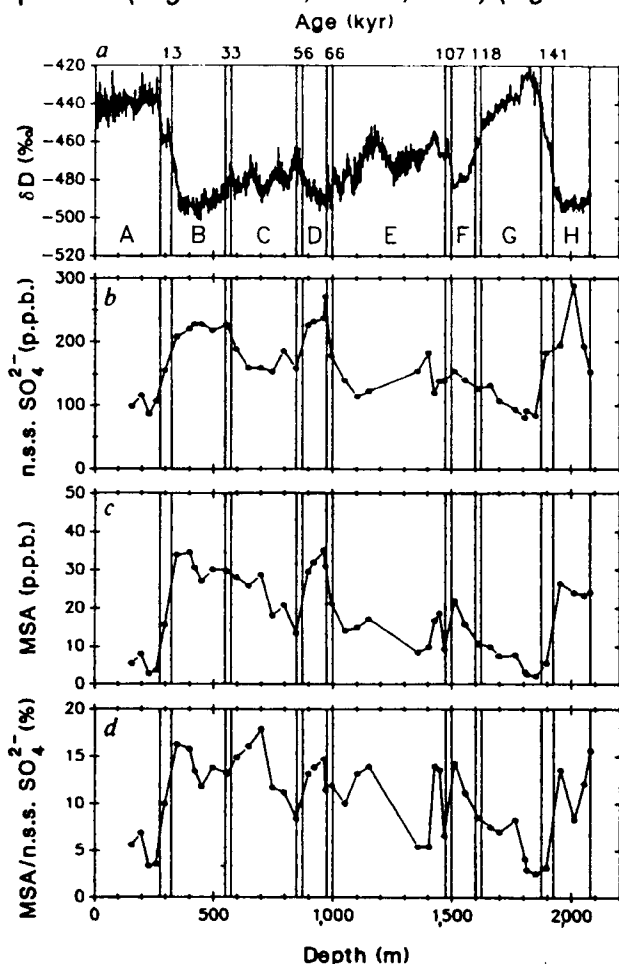


Figure 4.4 :

Evolution de la teneur en sulfate en excès et MSA au cours du dernier cycle climatique (Legrand et al., *Nature*, 1991).

Moyennant certaines hypothèses (Legrand et al., Nature, 1988) (Figure 4.5) un refroidissement purement radiatif pouvant aller jusqu'à 1°C (donc très comparable au 0,6°C potentiel induit par la variation de la teneur en gaz carbonique) pourrait être attribué à ce type d'aérosol entre la période climatique actuelle et le dernier maximum glaciaire (18000 BP).

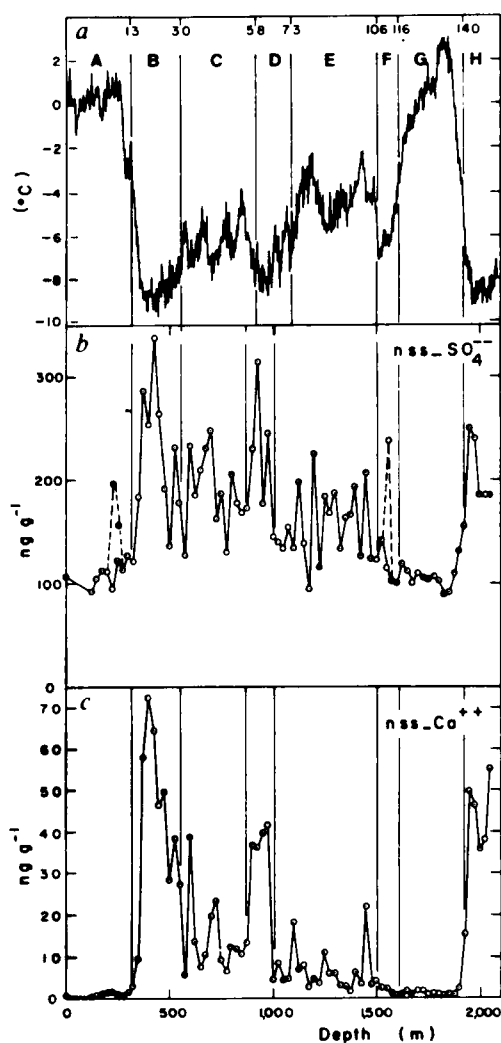


Figure 4.5 :
 Evolution de la teneur en sulfate au cours du dernier cycle climatique (Legrand, et al., Nature, 1988).
 R est l'augmentation de la concentration par rapport à l'Holocène (R' quand on tient compte du changement d'accumulation)

Il est important de noter que cette étude n'apporte pas la preuve du rôle climatique des CCN. Néanmoins, elle représente un argument supplémentaire pour ne plus considérer (comme c'est le cas jusqu'ici dans les modèles climatiques) l'albedo des nuages comme une constante mais bien comme une variable climatique en elle-même.

En comparant les dépôts de sulfate et de ¹⁰Be en régions polaires, et en utilisant la fonction source de ce radioélément naturel, il a été possible d'évaluer la quantité de soufre entrant annuellement dans la troposphère libre. Le chiffre obtenu (2,9 Tg S) est relativement très faible par rapport aux émissions sulfurées calculées au niveau du sol (environ 30 fois plus) ce qui indique que l'essentiel du cycle du soufre se joue dans la basse troposphère (R. Delmas, sous presse).

Au Groenland, les mesures de sulfate et de méthane-sulfonate portant sur Eurocore sont déjà bien avancées. Pour les années récentes, l'impact des apports anthropiques est considérable. Par ailleurs les variations saisonnières de l'ion méthane-sulfonate sont extrêmement marquées, ce qui permet d'utiliser cet ion pour décomposer les années dans les couches de névé.

II.1.2 - Cycle de l'azote
 (M. Legrand, S. Kirchner)

Comme pour le cycle du soufre, les résultats Eurocore portant sur le cycle de l'azote ne sont que partiellement disponibles. C'est pourquoi on ne rapportera ici que les résultats concernant l'Antarctique. L'étude du bilan ionique montre que dans les conditions climatiques actuelles le nitrate de la précipitation antarctique est essentiellement présent sous forme d'acide nitrique. L'étude de l'acide nitrique (produit ultime de l'oxydation atmosphérique des oxydes d'azote NOx) devrait donc fournir des informations importantes sur le cycle de l'azote en région polaire. Les oxydes d'azote jouent un rôle clé dans la chimie de la troposphère de par leur influence sur le budget des OH via la chimie de l'ozone. Les sources d'oxyde d'azote sont malheureusement très délocalisées géographiquement et présentent un caractère très variable

dans le temps. L'étude de l'acide nitrique aux hautes latitudes devrait permettre d'appréhender la redistribution par le transport atmosphérique des NOx émis par ces différentes sources.

Lorsque nous avons entrepris cette étude, plusieurs publications américaines faisaient état d'une modulation par l'activité solaire des retombées de nitrate dans la neige antarctique. Nos premières études de ce composé dans la neige du Pôle Sud n'appuyaient pas cette hypothèse. S'en est suivie une vive polémique, (voir par exemple *Legrand et Delmas, Tellus, 1988*). L'issue de cette controverse était très importante car elle permettait d'émettre des hypothèses sur la source jusqu'alors inconnue des nitrates présents dans l'atmosphère des hautes latitudes. En effet, l'observation d'une modulation des teneurs en nitrate par l'activité solaire suggérerait que la haute atmosphère pouvait être une source dominante des NOx de l'atmosphère antarctique.

Depuis peu ce problème a notablement progressé d'une part par l'obtention de nouveaux profils de nitrate dans la neige antarctique, d'autre part par l'intermédiaire de simulations (séjour post-doctoral de M. Legrand à Oslo).

Les résultats des nombreux profils de nitrate obtenus au Pôle Sud, site particulièrement bien daté, permettent de rejeter l'hypothèse d'une modulation de la teneur en nitrate par l'activité solaire. A titre d'exemple, le profil de NO₃ (*Figure 4.6, Legrand et Kirchner, JGR, 1990*), qui couvre les mille dernières années ne montre aucune réponse des nitrates aux périodes de très faible activité solaire telles que le Maunder et le Spörer Minimum.

L'étude réalisée avec le modèle norvégien 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 l'oxydation de N₂O. Cette étude montre que la réponse à l'activité solaire est faible et en opposition de phase avec le cycle solaire (*Figure 4.7, Legrand et al., Tellus, 1989*).

Cette modélisation a en outre confirmé le rôle significatif des NOx produits par les éclairs sur le budget des oxydes d'azote en Antarctique.

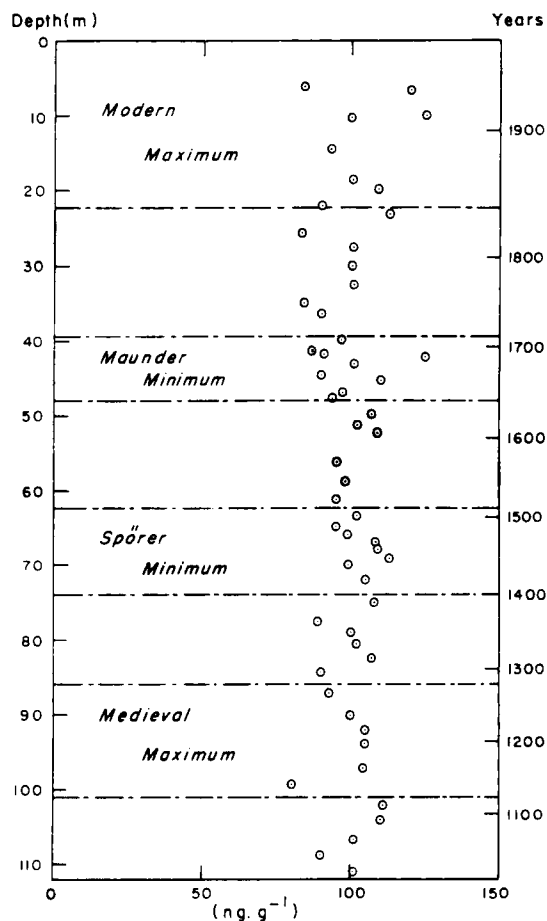


Figure 4.6 :

Teneur en nitrate au Pôle Sud au cours du dernier millénaire. Le profil ne montre aucune variation en réponse à l'activité solaire (Legrand and Kirchner, JGR, 1990).

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 nitrate apparaît au début de l'été correspond assez bien aux années durant lesquelles la basse stratosphère était particulièrement froide (*Legrand et Kirchner, GRL, 1988*).

Par ailleurs, l'étude détaillée de la teneur en HNO₃ de la neige déposée au Pôle Sud fait apparaître un maximum de printemps/été de plus en plus prononcé à partir de 1986 (*Figure 4.8*).

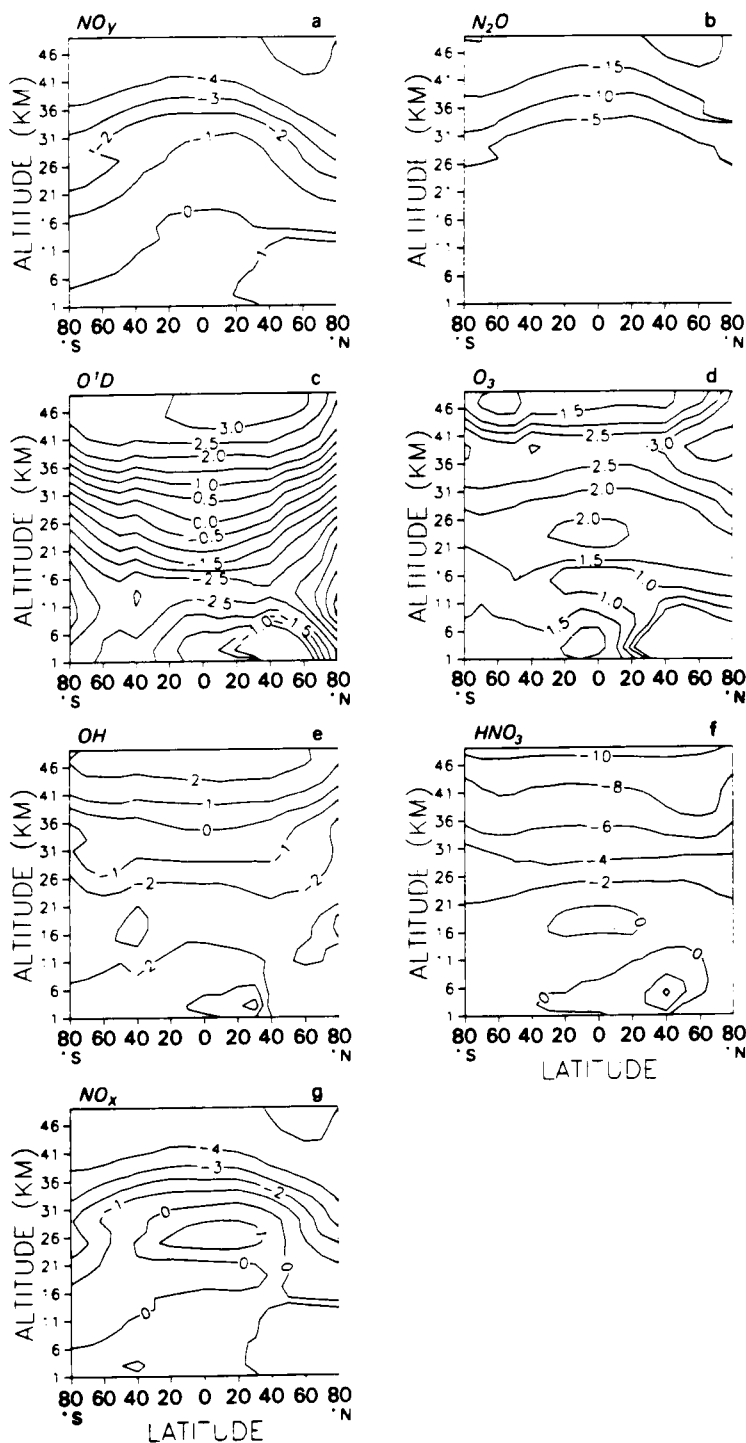


Figure 4.7 :

Variations en % des concentrations de différentes espèces chimiques induites par une augmentation du rayonnement UV en réponse à une variation d'activité solaire. L'augmentation de l'ozone est due à une photolyse accrue de l'oxygène et à une destruction plus limitée par les NO_x . Cette figure montre que malgré l'augmentation de $O(1D)$ (liée à l'augmentation d'ozone), la réponse des NO_x est en opposition de phase car la photolyse de N_2O est très importante (Legrand et al., Tellus, 1989).

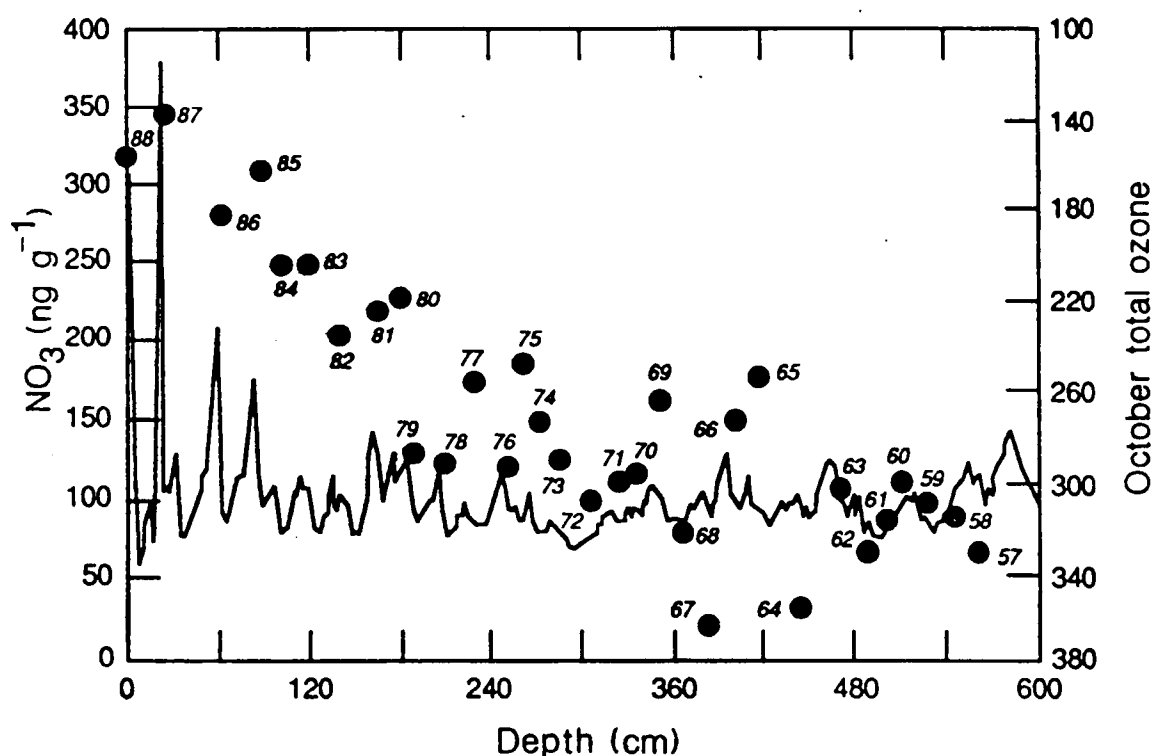


Figure 4.8 :

Etude détaillée de la teneur en NO_3 des couches de neige récentes au Pôle Sud : les maxima en 1985, 1986, 1987, 1988 reflètent peut être une dénitrification plus intense de la basse stratosphère (Mayewski et Legrand, Nature, 1990).

Cette amplification récente du signal saisonnier de HNO_3 a été interprétée comme étant peut-être une conséquence du développement de plus en plus marqué du déficit en ozone au printemps (Mayewski and Legrand, 1990) via un transfert stratosphère/troposphère d'acide nitrique fixé sur les cristaux de glace des nuages stratosphériques polaires.

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.

Plus récemment encore, notre étude des couches de

neige déposées au Pôle Sud montrait que les éruptions volcaniques majeures s'accompagnaient non seulement d'une augmentation de la teneur en H_2SO_4 de la neige antarctique (en liaison avec les injections de SO_2 dans la stratosphère) mais d'une diminution simultanée des teneurs en acide nitrique (Figure 4.9, Legrand et Kirchner, JGR, 1990).

Cette anticorrélation HNO_3 - H_2SO_4 ne peut s'expliquer par une simple intervention de SO_2 sur le budget des OH (qui limiterait ainsi la conversion NO_x - HNO_3) ni par un pur effet de circulation. Nous comptons utiliser un modèle 2D chimie et transport pour tenter de mieux comprendre cet important couplage entre le cycle de N et de S.

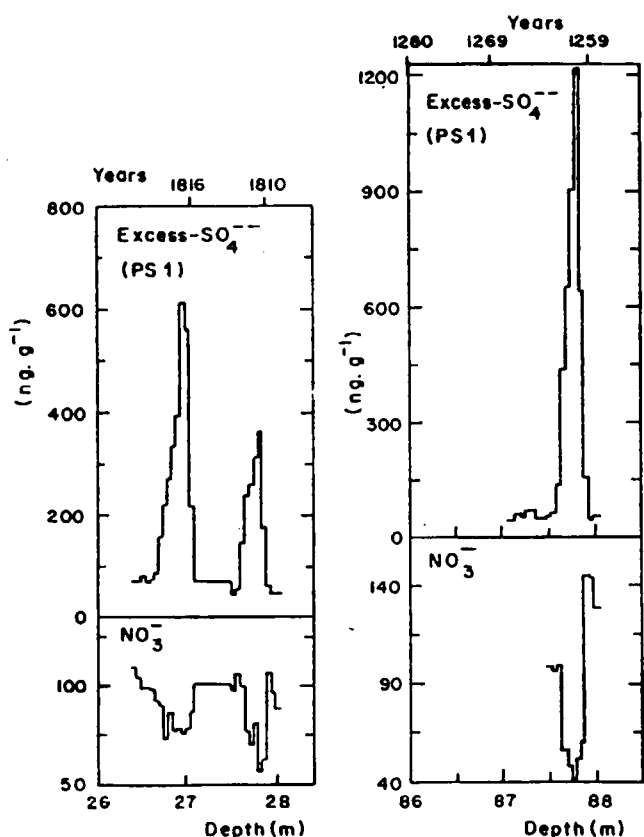


Figure 4.9 :

Evolution de la teneur en nitrate de la neige au Pôle Sud au moment des retombées d'acide sulfurique ayant suivi les éruptions de 1815 (Tambora), 1810 et 1259 (Legrand et Kirchner, JGR, 1990).

II.1.3 - Cycle des Halogènes

(M. Legrand, M. de Angelis, A. Léopold, R. Delmas)

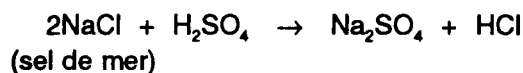
La large couverture spatiotemporelle de notre étude simultanée du chlore et du sodium de la précipitation antarctique a montré que :

- 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 antarctiques, et pour les conditions climatiques actuelles, le rapport

varie largement de 0,2 à 10 (Legrand and Delmas, JGR, 1988).

Avec l'aide du bilan ionique de la neige, il est possible de montrer 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



Dans les régions centrales, durant les périodes les plus froides, le rapport Cl/Na de la précipitation demeure voisin de 1,8 suggérant l'absence d'altération du sel de mer, ce qui correspond à des conditions météorologiques très turbulentes (voir l'évolution du rapport Cl/Na observée le long de la carotte de Vostok, Figure 4.10).

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 (stade G, Figure 4.10) la précipitation à Vostok présente des rapports Cl/Na dont les valeurs sont relativement élevées alors qu'au contraire durant la période chaude actuelle (stade A, Figure 4.10), le rapport est souvent très faible.

Depuis 2 ans, l'étude des halogènes s'est élargie au fluor dont le cycle atmosphérique est très mal connu. L'ensemble des résultats concernant les variations spatio temporelles de la concentration en fluor de la précipitation antarctique permet de suggérer que :

- La part du fluor correspondant à la dégradation des fréons dans la stratosphère reste, au milieu des années 1980, mineur dans le bilan des apports au réservoir troposphérique de cet élément aux hautes latitudes de l'Hémisphère Sud.
- Les éruptions volcaniques cataclysmiques n'ont aucun impact sur la teneur en fluor de

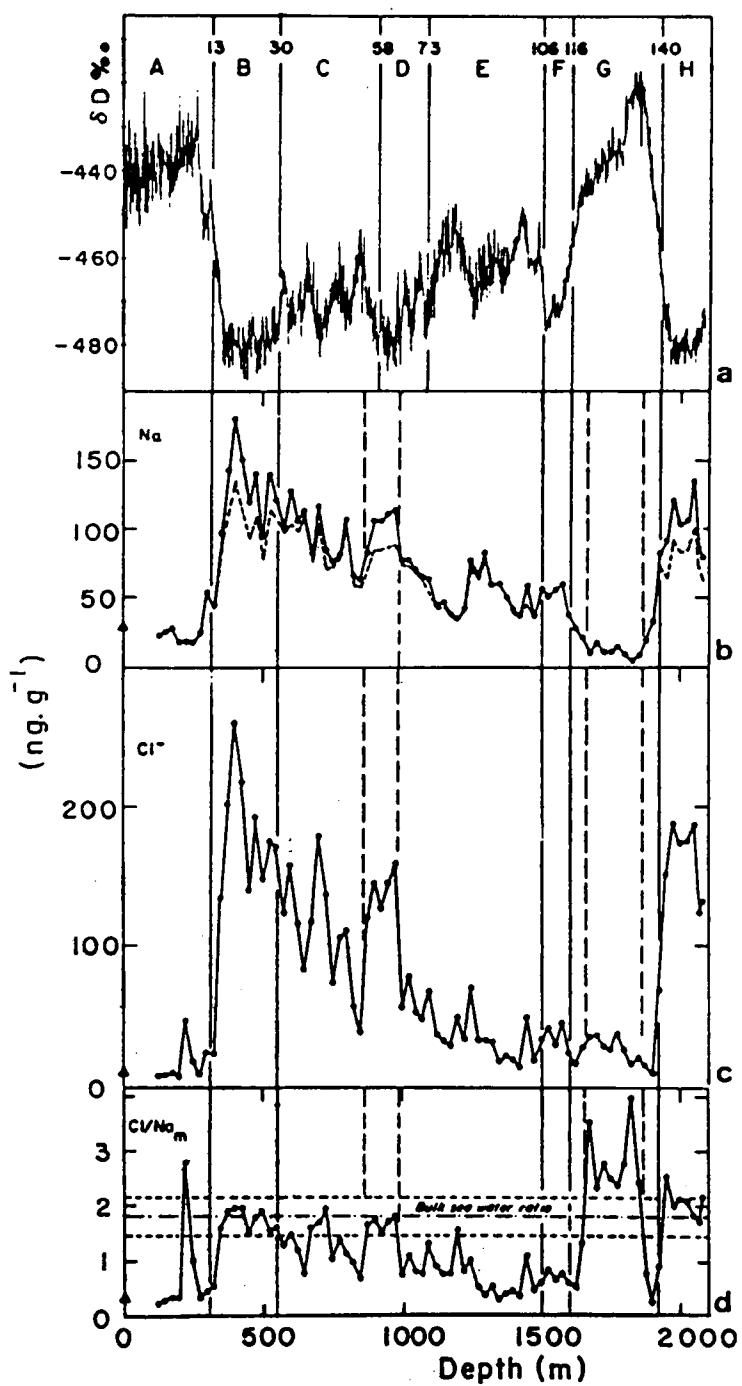


Figure 4.10 :

Evolution du rapport Cl/Na le long de la carotte de Vostok qui couvre le dernier cycle climatique (Legrand et al., Atmos. Environ., 1988).

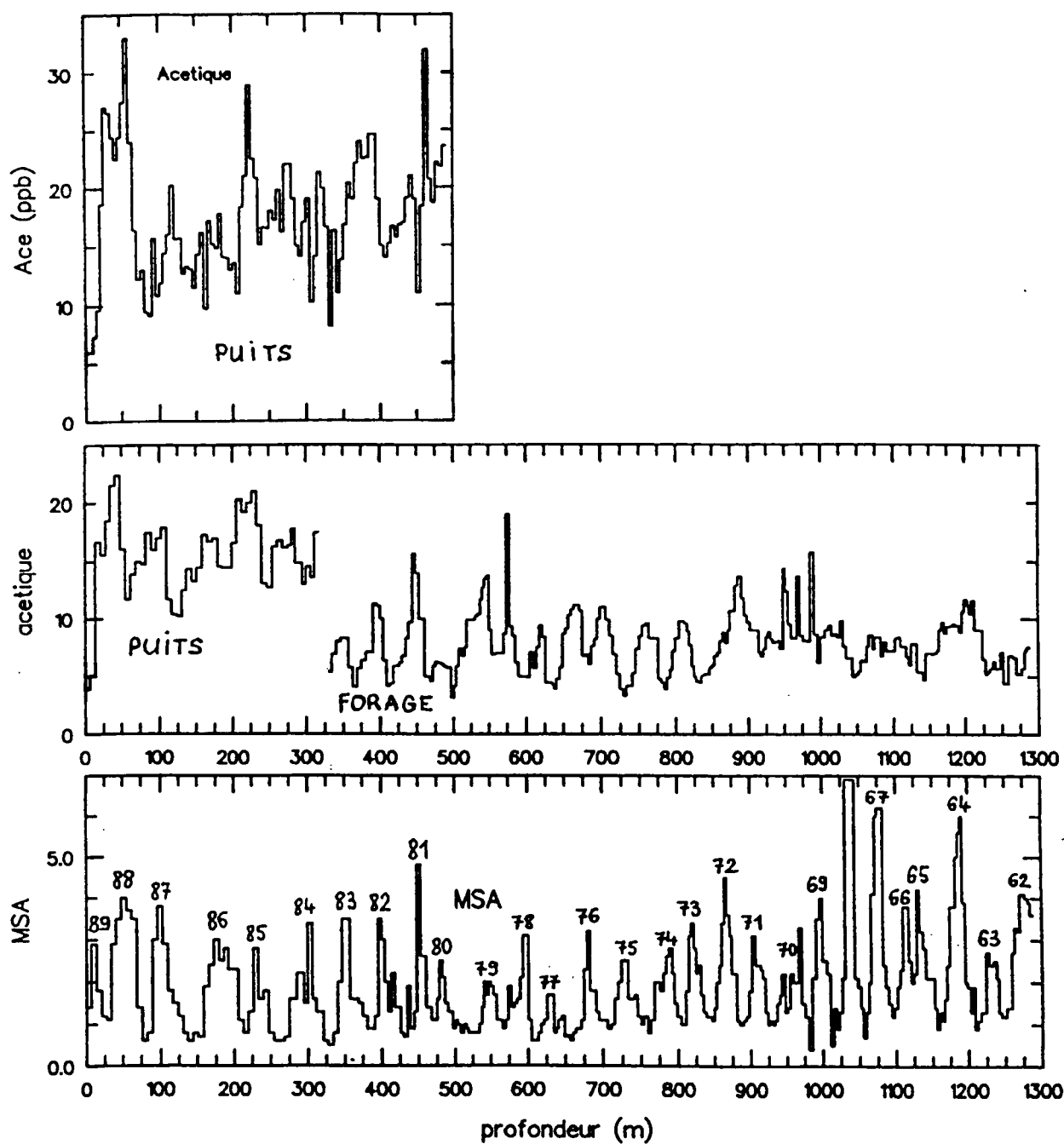


Figure 4.11 :

Concentrations en acide acétique dans des puits sur des carottes de névé conditionnées plusieurs jours après extraction (les teneurs en MSA reportées en bas présentent une variation saisonnière marquée permettant de dater les couches de névé). Les valeurs plus élevées d'acide acétique observées dans les puits suggèrent que, pendant le stockage, les carottes de névé ont partiellement perdu de l'acide acétique (M. Legrand, résultats non publiés).

atmosphère Antarctique.

- Le fluor, largement présent dans la précipitation antarctique en excès par rapport à la composition de l'eau de mer, semble essentiellement provenir des émissions terrigènes. Cette contribution en fluor pendant les périodes glaciaires (par rapport aux conditions climatiques actuelles) présente en effet des valeurs pouvant atteindre 1 ppb au lieu des 0,1 ppb actuellement.

II.1.4 - Cycle du carbone

(M. Legrand, M. de Angelis)

Notre activité s'est récemment portée sur l'étude des hautes latitudes de l'hémisphère Nord dans le cadre de programmes de recherche engagés depuis 2 ans au Groenland par les communautés scientifiques européenne et américaine. Après deux campagnes au Groenland nous avons obtenu une vaste moisson de résultats actuellement en cours d'exploitation ; l'une concerne les acides organiques.

Nous avons tout d'abord mis en évidence un phénomène de réémission de l'acide acétique après dépôt dans les couches superficielles de névé (Figure 4.11). Ce phénomène post-dépôt (mis en évidence pour la première fois et qui ne se produit pas pour les espèces minérales), met en garde le glaciochimiste vis-à-vis de l'interprétation hâtive des paléodonnées de certaines espèces organiques.

L'étude des acides organiques à chaîne courte nous a permis de mettre en évidence un phénomène beaucoup plus intéressant pour les chimistes de l'atmosphère. Nos résultats montrent que l'atmosphère de ces hautes latitudes de l'hémisphère Nord reçoit parfois (environ tous les 7 ans) des apports considérables de formate d'ammonium (Figure 4.12). Une forte augmentation de la teneur en acide oxalique est associée à ces événements. La découverte au Groenland de cet acide, un composé caractéristique de l'oxudation des terpènes suggère que ces événements de formate d'ammonium sont liés à la combustion de la biomasse végétale.

Les paléodonnées de ce type obtenues à la fois au

Groenland et en Antarctique, constituent un atout supplémentaire dans le travail que nous menons sur l'étude de la phase atmosphérique des grands cycles biogéochimiques.

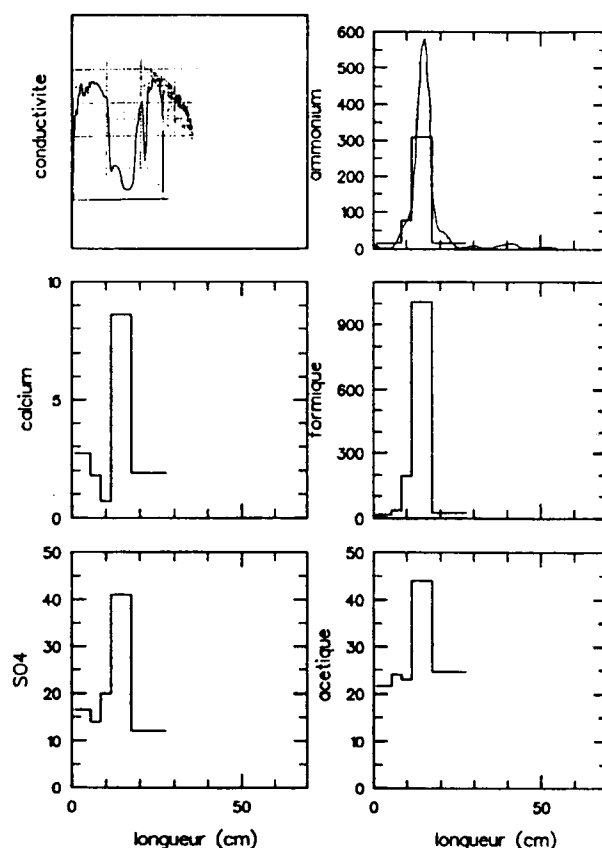


Figure 4.12 :

Événement observé à 250 mètres de profondeur dans la calotte du Groenland (Dôme Summit, âge environ 1.700 ans) : fortes augmentations simultanées de l'ammonium (x 60) et du formate (x 90). (M. Legrand, et al. non publié).

II.1.5 - Cycle des métaux lourds

II.1.5.1 - MÉTHODES ANALYTIQUES

(C. Boutron, U. Görlach, J.P. Candelone)

Au cours de ces dernières années, l'amélioration de la fiabilité des techniques de prélèvement et de mesures des très basses concentrations de métaux lourds dans les neige et glace de l'Antarctique et du

Groenland a été poursuivie dans différentes directions :

- réalisation d'un carottier de gros diamètre entièrement fabriqué en matière plastique (polycarbonate) ultranettoyé à l'acide permettant d'obtenir des carottes de neige de très grande propreté jusqu'à une quinzaine de mètres de profondeur.
- amélioration d'une méthode de décontamination des carottes de névé de faible densité par enfoncement de tubes en polyéthylène ultrapropres dans des surfaces vierges obtenues par fracture des carottes.
- amélioration de la méthode de préconcentration par évaporation calme dans des containers en téflon de façon à la rendre totalement fiable pour Pb, Cd, Cu et Zn, jusqu'à des niveaux de concentration extrêmement bas (atteignant 0,1 pg/g pour Cd), l'analyse finale étant réalisée par spectrométrie d'absorption atomique avec four graphite (GFAAS).

La coopération mise en place avec l'Institut de Spectroscopie de l'Académie des Sciences de l'URSS s'est avérée très fructueuse. Elle nous a donné l'occasion de participer au développement de la toute nouvelle technique de Spectrométrie de Fluorescence Atomique Laser (LEAFS). Les références ultra diluées fabriquées dans notre laboratoire ont permis d'étalonner le spectromètre LAFAS-1 de cet institut pour Pb et Cd jusqu'à 0,01 pg/g, *Figure 4.13*, (ce qui, pour les volumes très faibles injectés dans le spectromètre, correspond à des masses détectées de l'ordre de 10^{-15} g). De nombreux échantillons de l'Antarctique et du Groenland ont ensuite pu être analysés directement. Pour une partie de ces échantillons, les valeurs obtenues par LEAFS ont pu être comparées avec celles précédemment obtenues par Dilution Isotopique avec Spectrométrie de Masse (IDMS) et par GFAAS après préconcentration. L'accord obtenu est excellent (*Tableau 4.2*).

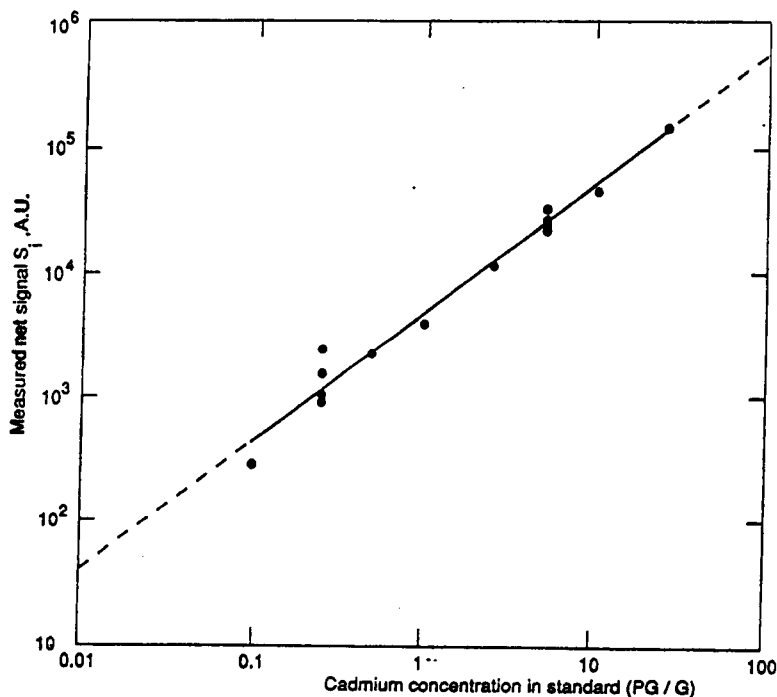


Figure 4.13 :

Etalonnage du Spectromètre de Fluorescence Atomique Laser LAFAS-1 pour le cadmium (volumes introduits : 50 µl). Après soustraction du bruit de fond, la limite de détection obtenue est proche de 0,01 pg Cd/g, ce qui correspond à une limite de détection en masse de l'ordre de 5×10^{-16} g.

PROFONDEUR (M)	CONCENTRATIONS EN CADMIUM MESURÉES (PG/G)	
	GFAAS APRÈS PRÉCONCENTRATION	LEAFS
1,97	1,3 ± 0,3	1,4 ± 0,8
3,40	2,0 ± 0,4	2,2 ± 1,2
6,46	3,3 ± 0,7	2,9 ± 1,6
8,82	3,9 ± 0,8	3,7 ± 2,1

Tableau 4.2 :

Mesure comparative de Cd par GFAAS après préconcentration et par LEAFS directe dans quatre échantillons prélevés à Summit, Groenland central.

Plusieurs autres collaborations ont été mises sur pied dans le but de compléter les analyses réalisées sur nos échantillons. Il s'agit de l'analyse de Hg (Prof. W. Fitzgerald), des composés organiques de Pb (Prof. F. Adams) et des isotopes de Pb (Prof. K. Rosman). Dans chacun de ces cas, nous nous sommes associés aux meilleures équipes existant dans ces domaines très spécifiques.

II.1.5.2 - ETUDE DE LA FONCTION DE TRANSFERT AIR-NEIGE POUR LES MÉTAUX LOURDS AU GROENLAND (C. Boutron, F. Ducroz, U. Görlach, I. Sherjal)

Il n'existe actuellement que très peu de données sur la fonction de transfert air-neige pour les métaux au Groenland ou en Antarctique, les rares études fiables ne portant d'ailleurs que sur des périodes de temps très courtes, pendant l'été. En vue de mieux préciser cette fonction de transfert, nous avons participé à partir de 1988 au programme américain DGASP (Dye 3 Gas, Snow and Air Sampling Program) à la station Dye 3 au Groenland du Sud puis à partir de 1989, au programme américain ATM au camp américain de Summit au Groenland central, en collaboration notamment avec le groupe de C.I. Davidson et J.L. Jaffrezo.

Ces deux programmes nous ont permis de réaliser en parallèle le prélèvement de nombreuses chutes de neige individuelles et de filtres pompés pendant la période de temps correspondante, non seulement

pendant l'été mais aussi pendant l'hiver et le printemps. L'analyse des échantillons pour Pb, Cd, Zn et Cu est maintenant très avancée.

Une très grande variabilité des concentrations de métaux dans la neige fraîche du Groenland d'une chute de neige à l'autre est mise en évidence, avec de très grands pics de concentration liés à l'arrivée de masses d'air polluées provenant d'Amérique du Nord ou d'Europe (*Figure 4.14*). De tels événements ont notamment été mis en évidence au printemps (Avril-Mai). Cette très forte variabilité est également observée dans l'air (mesures sur filtres).

II.1.5.3 - VARIATIONS DES CONCENTRATIONS DE MÉTAUX LOURDS AU COURS DES DERNIÈRES DÉCENNIES AU GROENLAND ET EN ANTARCTIQUE (C. Boutron, U. Görlach, J.P. Candelone)

Il s'agit là d'études en vue de déterminer l'influence de la pollution en métaux à grande échelle dans chacun des deux hémisphères.

L'analyse de Pb, Cd, Zn et Cu dans une séquence d'échantillons intégrant les années 1967-1989, prélevée dans le cadre du programme européen Eurocore (Groenland) indique que Pb, Cd et Zn sont essentiellement d'origine anthropique. A l'inverse Cu apparaît comme d'origine surtout naturelle. Au cours de cette période de temps, on observe une décroissance très marquée (facteur 7,5 environ) des concentrations de Pb, *Figure 4.15*. Cette décrois-

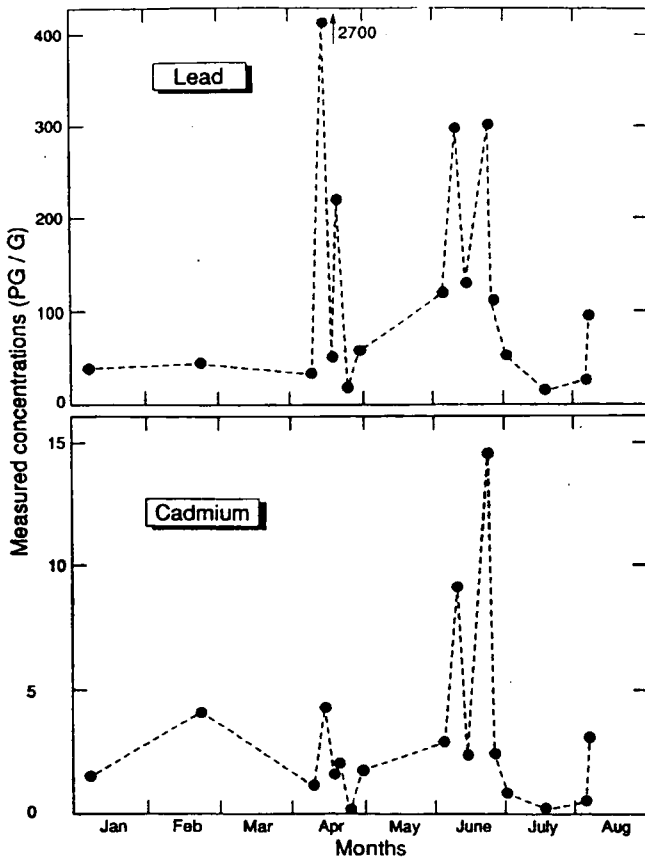


Figure 4.14 :
 Variations des concentrations de Pb et Cd dans les neiges fraîches du Groenland du Sud (Dye 3) de Janvier à Août 1989. Les très grands pics de concentrations observés en Avril et Juin correspondent à des transports rapides de masse d'air pollué provenant d'Europe dans le premier cas et des Etats Unis dans le deuxième.

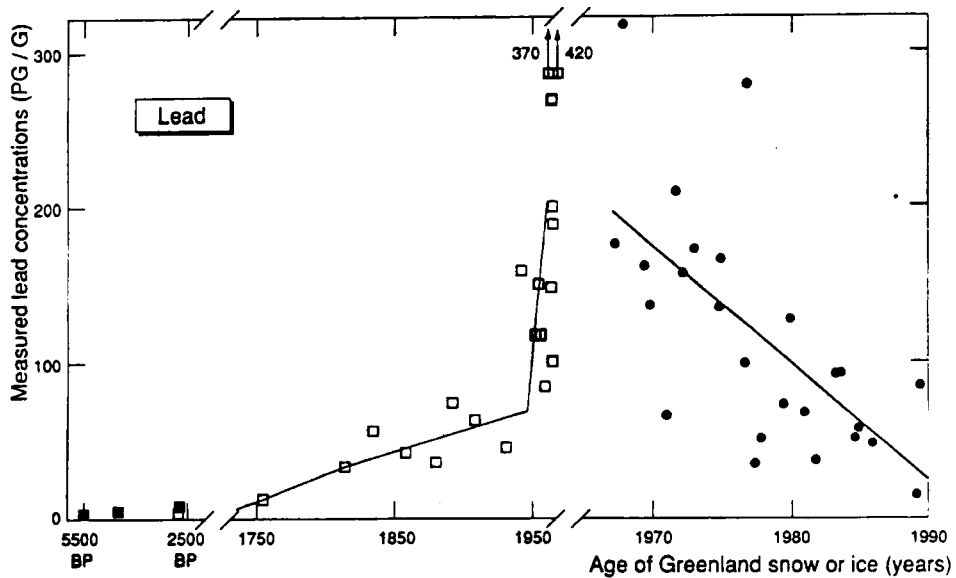


Figure 4.15 :
 Variations des concentrations de Pb dans les glaces et neiges du Groenland de 5500 BP à 1989 (nos mesures pour les années 1967-1989 ; données de C. Patterson et ses collègues pour les années 5500 BP - 1965). Après avoir augmenté d'environ 200 fois entre il y a quelques milliers d'années et le milieu des années 1960, les concentrations ont ensuite diminué d'un facteur 7,5 environ, essentiellement par suite de la diminution de l'utilisation du plomb tetraethyl comme additif dans l'essence.

décroissance, qui fait suite à l'énorme augmentation (x 200 environ) mise en évidence par C. Patterson et ses collaborateurs entre la période pré-industrielle et le milieu des années 1960. L'importante réduction de l'utilisation des additifs au plomb dans l'essence automobile depuis les années 1970 (diminution des concentrations de Pb dans l'essence plombée, et utilisation croissante d'essence non plombée) a conduit à une forte diminution de la pollution à grande échelle de l'atmosphère de l'hémisphère Nord par ce métal (Figure 4.15).

Pendant cette même période, une diminution marquée (facteur 2,5 environ) est également observée pour Cd et Zn. La pollution à grande échelle de l'atmosphère de l'hémisphère Nord apparaît ainsi avoir significativement diminué depuis les années 1970, pour ces deux derniers métaux. Il s'agirait là de la conséquence des nombreuses mesures qui ont été prises, notamment en Amérique du Nord et en Europe, pour réduire les émissions provenant de la combustion des combustibles fossiles, de la métallurgie des métaux non ferreux, de la sidérurgie et de l'incinération des ordures.

L'extension de profils aux années 1940-1967 est actuellement en cours. Elle devrait permettre de déterminer en quelles années a eu lieu le maximum de cette pollution.

En Antarctique, nous avons obtenu les premiers profils fiables de variation des concentrations de Pb, Cd, Zn et Cu pour la période de 40 ans allant de 1940 à 1980. Les concentrations sont parmi les plus faibles jamais mesurées dans les neiges de l'Antarctique. Elles montrent qu'il n'y a pas eu de tendance temporelle significative pour Cd, Cu et Zn au cours de ces quarante années. On observe par contre une augmentation significative (x 2 environ) des teneurs en Pb après le milieu des années 1960, Figure 4.16.

Les concentrations mesurées dans les années 1940 sont par ailleurs supérieures d'un ordre de grandeur à celles de l'Holocène (glace vieille de quelques milliers d'années).

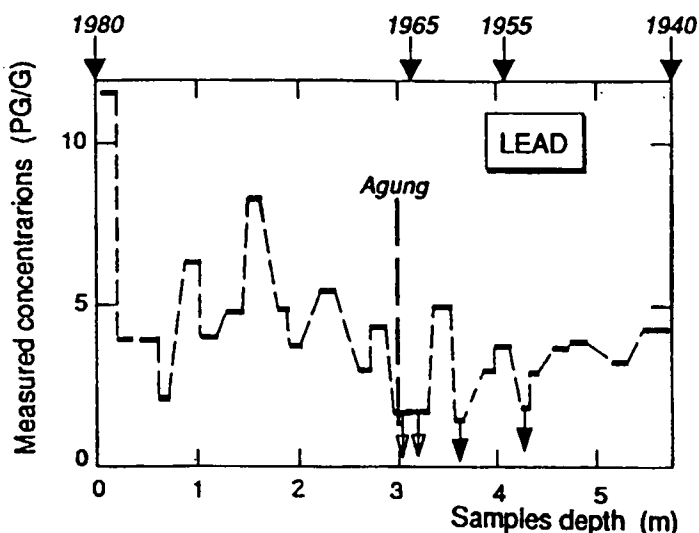


Figure 4.16 :

Variations des concentrations de Pb au cours de la période 1940-1980 à la balise D 55, Terre Adélie en Antarctique. Les concentrations mesurées dans les années 1940 sont déjà supérieures d'un ordre de grandeur à celles précédemment obtenues pour la glace vieille de quelques milliers d'années.

L'essentiel de l'augmentation anthropique des concentrations de Pb dans les régions éloignées de l'hémisphère Sud a donc eu lieu avant 1940, de façon analogue à l'hémisphère Nord, (au Groenland, les concentrations de Pb ont augmenté d'un facteur 100 entre il y a quelques milliers d'années et le début des années 1940, pour n'augmenter ensuite que d'un facteur 2 environ, jusqu'au milieu des années 1960).

II.1.5.4 - VARIATIONS DES CONCENTRATIONS DE MÉTAUX LOURDS AU COURS DES DERNIERS 155.000 ANS EN ANTARCTIQUE (C. Boutron)

Au cours de ces dernières années, nous avons obtenu les premiers profils fiables de variations de Pb, Cd, Zn et Cu dans les glaces de l'Antarctique au cours des derniers 155.000 ans. On observe de très fortes variations liées aux grands changements climatiques (Figure 4.17). Les concentrations sont

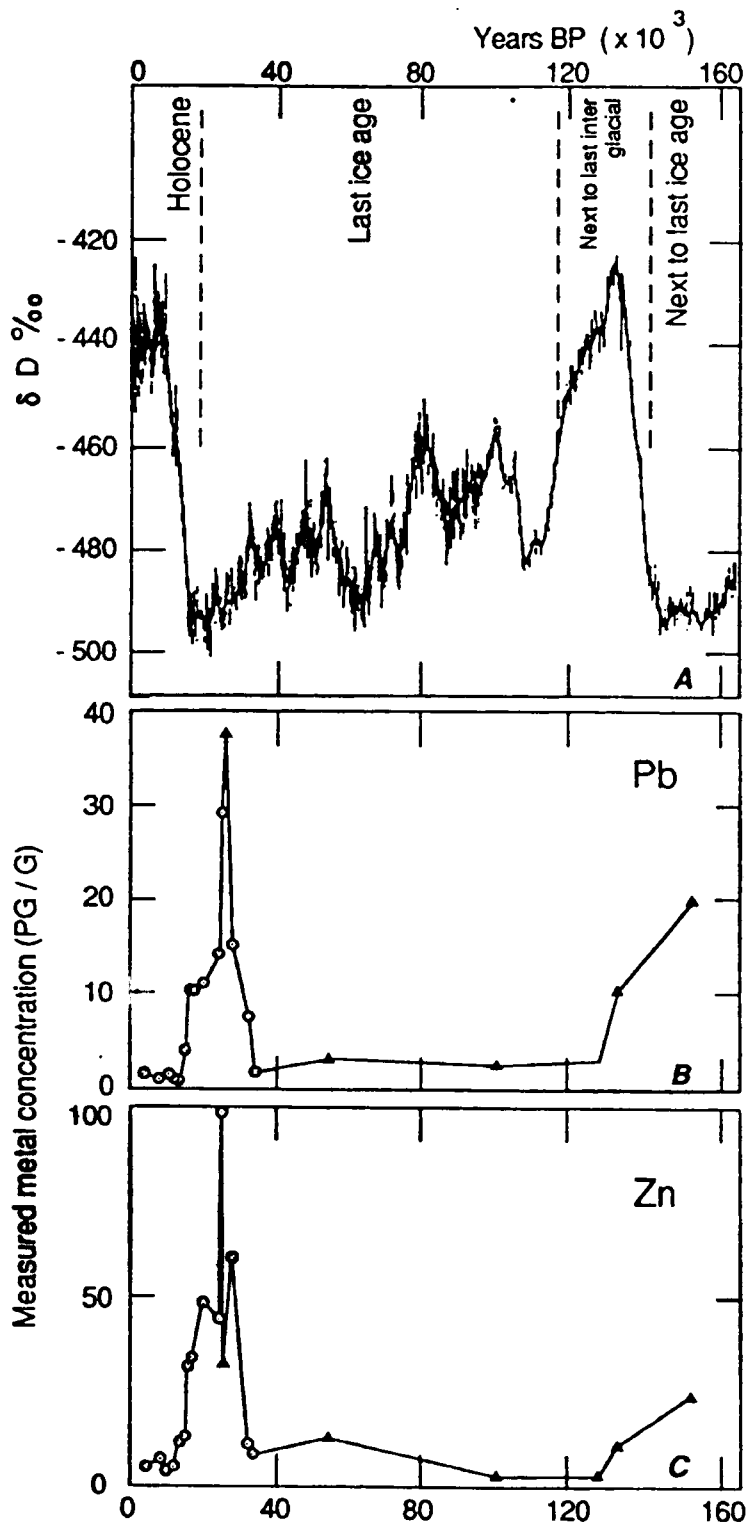


Figure 4.17 :

Variations des concentrations de Pb et Zn dans les glaces de l'Antarctique au cours des 155000 dernières années (cercles : données du Dôme C ; triangles : données de Vostok). Après avoir été décontaminées mécaniquement les carottes ont été analysées par IDMS (Pb, en collaboration avec C. Patterson au California Institute of Technology), GFAAS (Zn) et LEAFS (Pb, en collaboration avec M. Bolshov à l'Institut de Spectroscopie de Moscou).

particulièrement élevées pendant le Dernier Maximum Glaciaire et à la fin de l'avant dernière glaciation. Elles sont beaucoup plus faibles pendant l'Holocène et probablement pendant l'avant dernier interglaciaire. Les profils ont permis de mettre clairement en évidence que pendant les périodes les plus froides, les cycles atmosphériques des métaux lourds étaient dominés par les poussières de roches et de sols. Pendant les interglaciaires par contre, d'autres sources comme le volcanisme peuvent jouer un rôle majeur.

Ces profils sont en cours d'extension à d'autres métaux (Hg et Bi). Les concentrations en Hg apparaissent aussi plus élevées pendant les périodes froides que pendant les périodes chaudes, mais l'interprétation est très différente de celle proposée pour Pb, Cd, Zn et Cu.

II.1.5.5 - ETUDE DES MÉTAUX LOURDS DANS LA NEIGE DÉPOSÉE PRÈS DU CRATÈRE DU NEVADO DEL RUIZ (COLOMBIE)

(C. Boutron, P. Laj)

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

Les résultats obtenus 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 particulières du volcan, a permis d'évaluer les flux efficaces d'aérosols de ce volcan. Par extrapolation, les flux volcaniques mondiaux ont été estimés : Pb = 1.800, Cu = 9.500, Zn = 1.800 (en tonnes/an). Ces valeurs sont en bon accord avec les rares estimations existantes.

II.1.6 - La relation air neige pour les éléments majeurs

(E. Silvente, M. Legrand)

Au cours des campagnes d'été 1990 et 1991 à Summit (Centre du Groenland), nous avons participé

à l'étude de la fonction de transfert air neige au camp atmosphérique mis en place il y a trois ans par les américains.

Nous nous intéressons plus particulièrement aux composés de l'azote (NO_3 et NH_4^+) présents dans l'atmosphère. Les premiers résultats obtenus à partir de collectes atmosphériques confirment qu'une fraction importante du nitrate de l'atmosphère de ces hautes latitudes est présent en phase gazeuse. Nous avons élaboré et mis en oeuvre un protocole de mesure de cette phase gazeuse à l'aide de tube dénudeur.

Au cours de cette première expérience, un important artefact expérimental concernant la mesure de l'ammonium présent dans la phase aérosol a été mis en évidence. Ceci suggère que de nombreuses études actuelles sur le rapport $\text{NH}_4^+/\text{SO}_4^{2-}$ sont à reconsidérer et que l'idée de la neutralisation de l'acidité atmosphérique par l'ammoniac est à remettre en cause dans ces régions dites "de bruit de fond".

II.2 - LA MATIÈRE 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 niveaux correspondant à la fameuse météorite de la Tunguska (1908), menée en collaboration avec le CFR de Gif-sur-Yvette (R. Rocchia) a montré, et ce contrairement aux résultats publiés par d'autres, que les débris de la Tunguska ne sont pas détectables en Antarctique (Rocchia et al., 1989). Par ailleurs, le flux moyen d'Iridium ($10.5\% \text{ g/cm}^3/\text{an}$), d'un ordre de grandeur plus faible que les valeurs antérieurement publiées à partir de mesures dans la neige, serait compatible avec les mesures atmosphériques de cet élément.



II.2.2 - Collecte des micrométéorites

(M. Pourchet, M. de Angelis, C. Vincent,
en collaboration avec M. Maurette)

En 1984, une opération de reconnaissance au Groenland avait permis de montrer que la zone de fusion estivale de la calotte glaciaire 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 tonne 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 µm) jamais recueillie ; ceux-ci appartiennent à la famille la plus intéressante des agrégats chondritiques poreux.

Une campagne de prélèvements a été faite en Antarctique (janvier 1988). La fusion d'environ 100 tonnes de glace bleue ancienne nous a livré plusieurs milliers de grains de poussière cosmique on altérée par un contact prolongé avec l'eau de fonte. Nous avons également pu mettre en évidence un processus d'enrichissement de cette poussière dans la couche de glace superficielle (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).

Une nouvelle collecte a été faite en Janvier 1991 à Cap Prud'homme à partir de 280 tonnes d'eau de fonte.

II.3 - GLACIOCHIMIE ALPINE

Les activités du LGGE dans le domaine de la chimie des neiges alpines ont été régulières depuis une quinzaine d'années. Déposées au coeur d'un continent fortement industrialisé ces neiges sont intéressantes à étudier notamment pour en comparer la composition avec celle des neiges en principe beaucoup plus "propres" des régions polaires. Les recherches de glaciochimie dans les Alpes sont en fait moins simples qu'en régions polaires car les couches de neige sont très irrégulières et les températures (sauf au dessus de 4300 m) insuffisamment basses pour empêcher la fonte partielle (ou même totale) de la neige en été.

Cependant il existe une forte pression internationale pour développer des recherches dans les Alpes, notamment pour y étudier le "bruit de fond" de l'atmosphère au-dessus de l'Europe. Les travaux dont les résultats sont exposés ici sont complémentaires :

- Les dernières décennies au Mont-Blanc à 4350 m d'altitude,
- Evolution chimique du manteau neigeux hivernal à la station du Casset (Alpes du Sud, 1750 m d'altitude),
- Composition chimique du manteau neigeux hivernal en 4 sites de haute altitude des Alpes Françaises

A l'heure actuelle, ces recherches sont soutenues par le programme EUROTRAC/ALPTRAC.

Il faut ajouter à ces travaux des études plus spécifiques relatives aux retombées radioactives de Tchernobyl dans les Alpes et au Spitzberg.

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, a donné lieu à une étude détaillée des apports terrigènes, notamment sous l'angle minéralogique (De Angelis et Gaudichet, 1991).

Les poussières minérales, d'origine essentiellement nord-africaine, dominent largement les dépôts avec de très fortes variations saisonnières (maxima en été). La composante locale ne représenterait que 10

% et 30 % des dépôts de Al et Ca. 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. Depuis 1970, ces apports de poussière semblent avoir augmenté en particulier après 1980.

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 $< 10 \text{ mEq.l}^{-1}$). 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 mEq.l^{-1}) est relativement élevé (voisin de 5).

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

Le but de cette étude a été 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, construite par le 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 (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, dont ceux liés à l'interaction entre l'eau de percolation et les particules retenues dans le manteau neigeux. A ce titre sont importants les phénomènes d'échange cationique et de lessivage des débris végétaux entraînés par le vent en début de saison et ceux de neutralisation de l'acidité au contact de carbonates d'origine saharienne.

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

Il apparaît ainsi 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 fonte et les particules.

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

II.3.3 - Composition chimique de manteau neigeux des glaciers alpins d'altitude (F. Maupetit et R.J. Delmas)

Cette étude, réalisée dans le cadre du projet européen ALPTRAC, vise à étudier le transport et le dépôt des composés atmosphériques dans les hautes régions alpines.

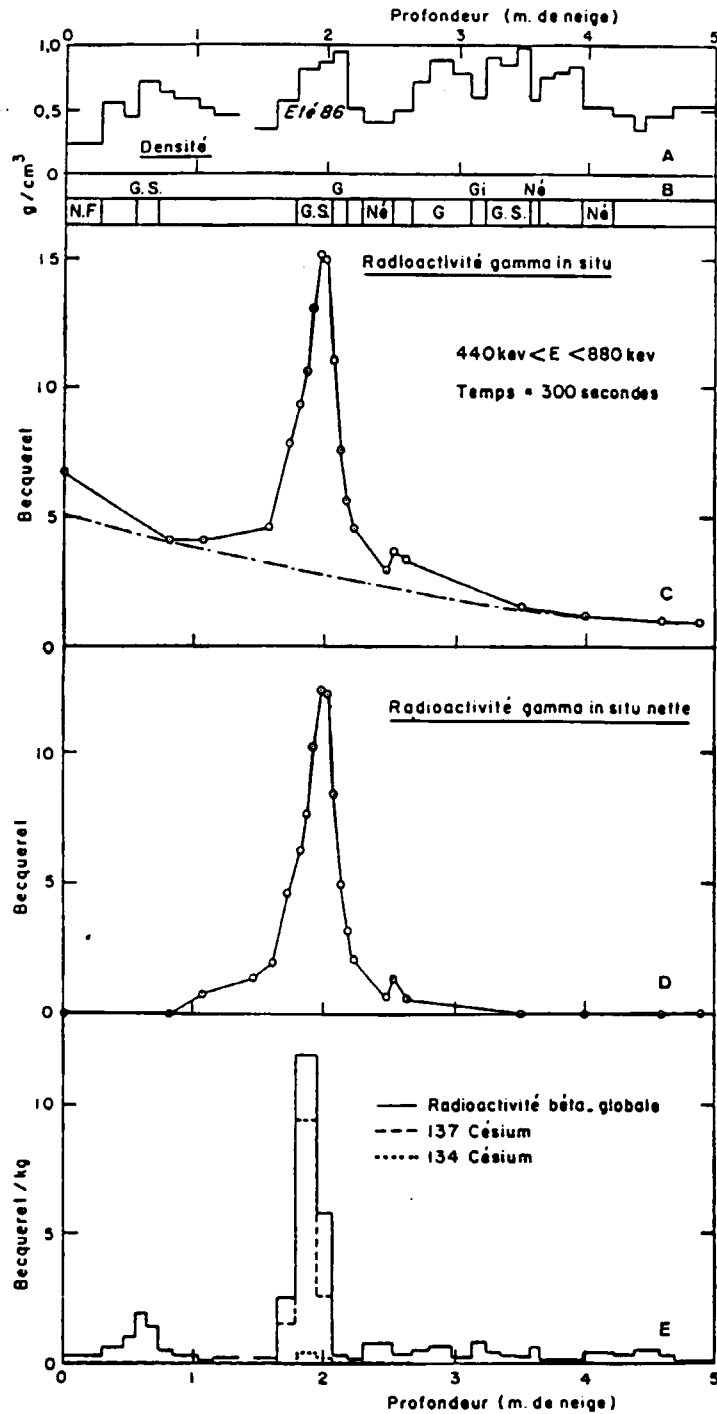


Figure 4.18 :

Mesures de densité (A), Stratigraphie (B), Radioactivité Gamma in situ (C) et (D), Radioactivité beta-globale, Césium 137 et Césium 134 (E), en fonction de la profondeur en neige à la station T3.

Légende (b) : N.F. : Neige Fraîche, G : Glace, S : Sale, NE : Névé, Gi : Givre

Espaces vides : Névé très transformé

(J.F. Pinglot et M. Pourchet, C.R. Ac. Sci. 1989)

Les retombées dues à Tchernobyl déjà repérées au Spitzberg, en Mai 1986, ont également été mesurées dans un carottage réalisé en 1987 à Austfonna (Nordaustlandet). Le bilan en Césium-137 est de $4,5 \text{ Bq.m}^{-2}$ (Pinglot et Pourchet, C.R Acad. Sci., 1989)

Les sites de prélèvement ont été choisis en zone d'accumulation (altitude > 3000 m) de quatre glaciers alpins dans chacun des quatre principaux massifs des Alpes Françaises :

- Col du midi, 3570 m, Massif du Mont Blanc,
- Glacier de la Grande Motte, 3010 m, Massif de la Vanoise,
- Glacier du Grand Sablat, 3310 m, Massif des Grandes Rousses,
- Glacier de la Girose, 3360 m, Massif des Ecrins.

L'ensemble du manteau neigeux (de 4 à 6 m de neige) est prélevé par carottage à la fin de la période d'accumulation hiver/printemps (fin mai) et avant que la fonte estivale ne commence. L'opération a été menée à bien à ces 4 sites au cours des 3 dernières années (1989, 1990, 1991), ce qui représente une remarquable couverture spatio-temporelle au niveau des Alpes Françaises.

En complément, ont été réalisés :

- 1) un échantillonnage de neige fraîche après chaque précipitation sur le glacier de la Girose en 1989/90 et 1990/91,
- 2) un carottage sur un glacier froid (ne subissant pas de percolation estivale et représentant donc un enregistrement de la précipitation annuelle contenant la période été/automne) au Col du Dôme, 4250 m (Massif du Mont Blanc) où les treize mètres de carotte prélevés en avril 1991 représentent quatre années d'accumulation et
- 3) des prélèvements sur des glaciers autrichiens et italiens (en collaboration avec nos collègues d'ALPTRAC)

Comme déjà expliqué dans les 2 paragraphes précédents, il apparaît que la précipitation alpine a un caractère légèrement acide ($0 < \text{H}^+ < 20 \mu\text{eq.l}^{-1}$)

avec des apports sporadiques de poussières sahariennes fortement basiques. Le caractère acide de la neige alpine est stable d'une année sur l'autre, tous sites confondus. L'acidité mesurée est principalement due à l'ion nitrate, le sulfate étant partiellement neutralisé par l'ammonium. Les acides organiques (formique et acétique) ont été mesurés dans la neige fraîche. Leur concentration est très faible ($0,6 \mu\text{eq.l}^{-1}$) et varie très peu. Ils ne représentent chacun que 10% de l'acidité mesurée, et ne contribuent pas de façon significative au bilan ionique. Les trajectographies de masses d'air permettent d'identifier les principales régions industrielles en Europe (Europe centrale, Allemagne et Est de la France, Nord de l'Italie, Nord de l'Espagne) comme "régions sources" des précipitations les plus acides.

Les apports de poussières d'origine saharienne (Nord de l'Afrique), très variables d'une année sur l'autre et d'un site à l'autre, se produisent de façon ponctuelle au printemps, semblent dominer les précipitations estivales et sont caractérisés par de fortes concentrations de sels terrigènes (carbonate de calcium principalement). De par leur caractère basique, ils sont susceptibles parfois de neutraliser l'intégralité de l'acidité accumulée dans le manteau neigeux. Enfin ces poussières jouent le rôle de "piège" pour les acides qu'ils contribuent ainsi à ramener au sol.

La chimie de la précipitation neigeuse alpine a un caractère saisonnier très marqué avec des concentrations très faibles (comparables à celles de la neige des régions polaires) et légèrement acides en hiver. Ces concentrations augmentent au printemps et plus en été ou avec l'arrivée des premiers événements sahariens. Un tel schéma pourrait s'expliquer par des phénomènes de transport et d'advection de masses d'air vers les hautes régions alpines.

Enfin, alors que les concentrations en sulfate sont homogènes le long de l'arc alpin, il apparaît que l'acidité et les concentrations en nitrate sont deux fois plus fortes dans la neige des Alpes Autrichiennes (plus proches des régions industrialisées de l'Europe centrale) que dans celles des Alpes Françaises.

II.3.4 - Bilan régional de l'accident Tchernobyl
(M. Pourchet, J.F. Pinglot)

II.3.4.1 - BILAN REGIONAL DE L'ACCIDENT DE TCHERNOBYL

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 4.18). L'étude du bilan glaciaire en zone d'accumulation a pu être menée en divers sites grâce à ce repère (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 ($\sim 400 \text{ Bq.m}^{-2}$) (Pourchet et al., *J. of Glaciol.*, 1988).

Neuf carottages ont été réalisés en Avril 1990 sur les glaciers Kongsvegen et Sveabreen (Figure 4.19). Chaque carottage a été échantillonné finement (environ 10 échantillons par année d'accumulation) en vue de l'analyse des radioactivités β globale (et γ). A partir de la profondeur équivalente en eau de l'horizon radioactif dû à Tchernobyl en Mai 1986, les valeurs du bilan annuel net glaciaire sont étudiées en fonction de l'altitude des glaciers considérés. Au col, (Kongsvegpasset - 718 m) et aux stations proches B et E situées de part et d'autre, le bilan annuel s'élève à environ 0,66 m d'eau par an et il est le plus important. Le bilan décroît lorsque l'altitude diminue : à une altitude de 500 m environ et pour les 2 glaciers, le bilan net a diminué de moitié et n'est plus que de 0,27 m d'eau par an.

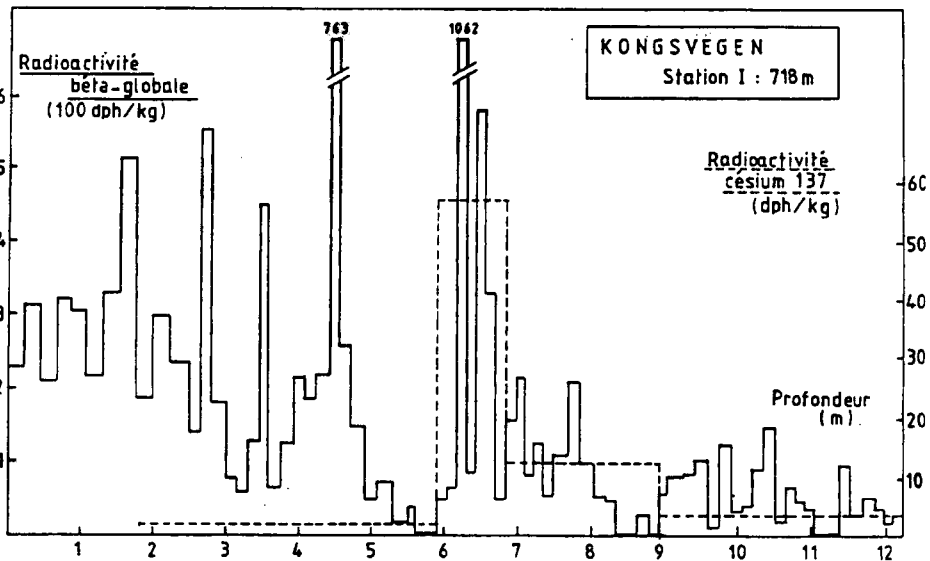


Figure 4.19 :
Radioactivités β -globale et Cesium-137 à la station I du Glacier Kongsvegen

En ce qui concerne la période 1963-1989, le bilan net annuel à la station "Kongsvegen 1989" serait alors compris entre 0,43 et 0,48 m d'eau (les équivalents en eau de 18,7 m et 20,6 m étant respectivement de 11,2 et 12,5 m). Ce bilan est comparable au bilan net de 0,477 m mesuré à partir de l'horizon de Tchernobyl à la station A très proche.

En conclusion, la valeur du bilan net glaciaire sur 26 années (1963 à 1989) ne semble pas significativement différente du bilan sur les 4 dernières années (1986 à 1990).

Au col, le bilan de retombée atteint 22 Bq.m⁻², valeur comparable à celles obtenues au Groënland (10/20 Bq.m⁻²), mais très inférieure à celles déterminées dans les glaciers des Alpes.

II.4 - SEDIMENTS LACUSTRES

(M. Pourchet, J.F. Pinglot)

Dans le cadre d'un programme pluridisciplinaire sur les paléoclimats et les paléo-environnements du Cameroun (ORSTOM-UR-A3) placé sous la direction de J. Maley (ORSTOM-Montpellier) nous avons en février 1987 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 a permis de déterminer des vitesses de sédimentation et leurs éventuelles anomalies.

Nos mesures ont permis d'éclairer certains points relatifs à la catastrophe du Lac Nyos (éruption de CO₂ d'août 1986). 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 4.20*),
- il y avait un excès de Pb 210 dû à un flux additionnel de Radon à travers le sédiment (déséquilibre radiochimique observé entre Pb 210

et Ra 226),

- cette émission de radon, antérieure d'au moins deux ans à l'accident (équilibre radiochimique entre Pb 210 et Po 210), ne pourrait donc pas être corrélée avec un flux local de CO₂ associé à l'évolution d'événements magmatiques profonds.

Ces données et conclusions 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 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 et la question importante est de savoir si un scénario identique à celui de Nyos, se met actuellement en place au lac Bambuluwé. Une augmentation du flux de Radon à travers les sédiments lacustres serait-il précurseur, comme à Nyos, d'un brutal dégazage de CO₂ ?

Au printemps 1989, nous avons prospecté 17 nouveaux lacs, couvrant l'ensemble de la dorsale Camerounaise.

Les mesures radiochimiques des sédiments montrent que dans environ 50% des lacs, les sédiments sont perturbés sur des épaisseurs de l'ordre de 10 cm. Pour les lacs Doubé, Nyos et Monoun, la totalité des carottes échantillonnées étaient mixées. On peut relier le mixage de Doubé à une très forte érosion du bassin versant, liée aux pratiques culturelles locales.

Pour les lacs de Nyos et de Monoun, le mixage des carottes se double d'un excès, par rapport du Cs 137 du Pb 210 non supporté. Les mesures complémentaires effectuées sur le lac de Bambuluwé, permettent maintenant d'estimer qu'il ne présente pas de danger possible d'explosion de gaz.

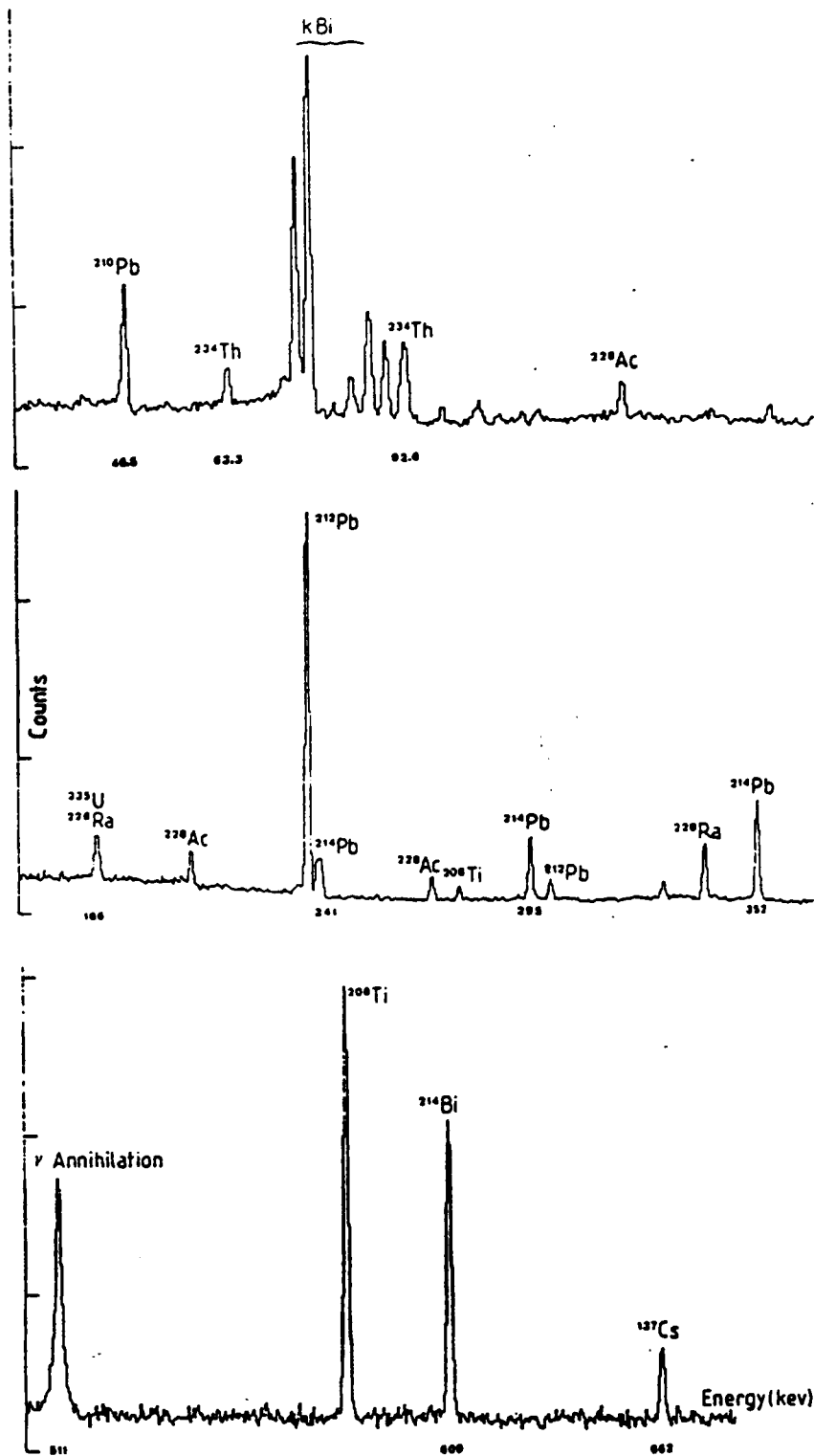


Figure 2.20 :

Spectre gamma d'un échantillon de sédiment de Nyos (128-130 cm). La présence de Cs 137 (662 kev) à cette profondeur indique que ces sédiments ont été fixés par la catastrophe de 1986. (Piboule et al., 1990)

III - COLLABORATIONS ET CONTRATS

Collaborations avec d'autres groupes de recherche

Au plan national :

- . Centre de Spectrométrie Nucléaire et de Spectrométrie de Masse, Orsay (M. Maurette)
- . Laboratoire de Microscopie Analytique appliquée aux Sciences de la Terre, Université Paris Val de Marne à Créteil (R. Lefevre et A. Gaudichet)
- . Centre des Faibles Radioactivités (P. Buat-Ménard, H. Cachier)
- . 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 Antartico Argentino, Mendoza (A. Aristarain)
- . California Institute of Technology, Division of Geological and Planetary Sciences (Dr. Patterson)
- . Institute of Spectroscopy, USSR Academie des Sciences, Moscou, URSS : coopération officielle dans le cadre de sous-groupe sectoriel Franco-soviétique en Instrumentation Scientifique) (Dr. V.G. Koloshnikov, and M.A. Bolshov)
- . British Antarctic Survey, Cambridge, Grande-Bretagne (Drs E. Wolff, D. Peel)
- . Paul Scherrer Institut, Villigen, Suisse (Dr. Baltensperger, Dr. Gäggeler)
- . ENEL/CRTN, Milan, Italie (Dr. Novo, Dr. Rossi)
- . Université de Vienne, Autriche (Dr. Puxbaum, Dr. Winiwarter, Dr. Seibert)
- . Université de Heidelberg, Allemagne (Dr.

Wagenbach)

- . INRS Eau, Québec (Pr. Jones)
- . Institut of Geology, Academy of Sciences, Estonie (J.M. Punning)
- . Centre Géographique National du Cameroun (A. Zogning)
- . Institut for Geophysics, Oslo (I. Isaksen)
- . Institut für Bioklimatologie, Göttingen (G. Gravenhorst)
- . Université de Seattle, USA (R. Charlson)
- . Université de Melbourne (N. Young)
- . Université du New Hampshire (J. Palais, P. Mayewski)
- . KFA Jülich Institut Für Atmosphärische Chemie II (Dr. D. Kley)
- . Carnegie Mellon University, Pittsburgh (C. Davidson)
- . University of Anvers, Belgique (Pr. Adams)
- . University of Connecticut, USA (Pr. Fitzgerald)
- . Curtin University of Technology, Australie (Pr. K. Rosman)

Paul Mayewski de l'Université du New-Hampshire a effectué un séjour au LGGE de sept mois grâce à une bourse MRT. Dans le cadre d'un programme d'aide au développement de la Commission des Communautés Européennes, Alberto Aristarain, de l'Institut Antactique Argentin effectue actuellement un séjour au laboratoire (bourse de un an).

Contrats :

- . C.C.E. STEP (EUROCORE),
- . P.I.R.E.N.,
- . Ministère de l'Environnement,
- . Ministère des Relations Extérieures,
- . Ministère de la Recherche et de la Technologie
- . P.N.E.D.C.
- . N.S.F

Cette équipe bénéficie de l'aide du programme Procope pour l'envoi de jeunes chercheurs à Jülich (Prof. Kley) et Göttingen (Dr Gravenhorst) dans le cadre de programmes de recherche en chimie atmosphérique.

Organisation de congrès :

Deux réunions scientifiques ont été organisées par R. Delmas :

. 26-27/04/1989 Colloque Bade Wurtemberg/
Rhône Alpes de climatologie et
chimie atmosphérique (une
cinquantaine de participants)

. 5-11/09/1990

7ème Symposium International de la Commission de Chimie atmosphérique et pollution à l'échelle du globe qui a regroupé 300 chercheurs.

R. Delmas est co-éditeur du volume spécial du Journal of Atmospheric Chemistry consacré à ce symposium.

IV - PUBLICATIONS

IV.1 - REVUES A COMITE DE LECTURE

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

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 30000 yr, *Annals of Glaciology*, **10**, 116-120.

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

Legrand, M. and Delmas, R.J., (1988) : Reply to C. Laird, E.J. Zeller and G.A.M. Dreschoff, *Tellus*,

40B, 237-240.

Ronseaux, F., and Delmas, R.J., (1988) : Chemical composition of bulk atmospheric deposition to snow at Col de la Brenva (Mt Blanc area). In "Acid deposition at high elevation sites", 491-510, NATO-ASI series, Series C, Mathematical and physical sciences, Vol. 252, Unsworth M.H. and Fowler D. (Eds).

Delmas, V.M., Ronseaux, F., and Delmas, R.J., (1988) : Chemical composition of the seasonal snow cover at a Southern French Alps site : some preliminary results, 511-516. In : "Acid deposition at high elevation sites", NATO-ASI series, Series C, Mathematical and physical Sciences, Vol. 252, Unsworth M.H. and Fowler D. (Eds.).

Pourchet, M, Pinglot, J.F., Maley, J. and Mélières, M.A. (1988) : Another gas burst in a Cameroon

- lake ? *Nature*, **334**, 665.
- Legrand, M. and Delmas, R.J., (1988) : HCl formation in the Antarctic atmosphere, *J. of Geophys. Res.*, **93**, 7153-7168, 1988.
- Legrand, M. and Saigne, C. (1988) : Formate, acetate and methanesulfonate measurements in antarctic ice : some geochemical implications, *Atmos. Environ.*, **22**, 1011-1017.
- Legrand, M. and Kirchner, S. (1988) : Polar atmospheric circulation and chemistry of recent (1957-1983) south polar precipitation, *Geophys. Res. Lett.*, **15**, 879-882.
- Boutron, C., Paterson, C.C., Lorius, C., Petrov, V.N. and Barkov, N.I. (1988) : Atmospheric lead in Antarctic ice during the last climatic cycle, *Annals of Glaciology*, **10**, 5-10.
- Gaudichet, A., De Angelis, M., Lefebvre, R., Petit, J.R., Korotkevich, Y.S. and Petrov, V.M. (1988) : Mineralogy of insoluble particles in the Vostok Antarctic ice core over the last climatic cycle (150 kyr), *Geophys. Res. Lett.*, **15** (13), 1471-1474.
- Pourchet, M., Pinglot, J.F., Reynaud L., Holdsworth, G. (1988) : Identification of Tchernobyl fall out as a new reference level in Northern hemisphere glaciers, *J. of Glaciology*, **34**, n°117, 183-187.
- Mélières, M.A., Pourchet, M., Pinglot, J.F., Bouchez, R. and Piboule, M. (1988) : Tchernobyl ^{134}Cs ^{137}Cs and ^{210}Pb in high mountain lake sediments, *J. of Geophys. Res.*, **93** (D6), 7055-7061.
- Batifol, F., Boutron, C. and De Angelis, M. (1989) : Changes in copper, zinc and cadmium concentrations in Antarctic ice during the past 40,000 yrs, *Nature*, **337**, 544-546.
- Apatin, V.M., Arkhangelskii, B.V., Bolshov, M.A., Ermolov, V.V., Koloshnikov, V.G., Kompanets, O.N., Kuznetsov, N.I., Mikhailov, E.L., Shishkovskii, V.S. and Boutron, C.F. (1989) : Automated laser excited atomic fluorescence spectrometer for determination of trace concentrations of elements, *Spectrochimica Acta*, **44B**, 253-262.
- Boutron, C.F. and Wolff, E.W. (1989) : Heavy metal and sulphur emissions to the atmosphere from human activities in Antarctica, *Atmospheric Environment*, **23**, 1669-1675.
- Bolshov, M.A., Boutron, C.F. and Zybin, A.V. (1989) : Determination of lead in Antarctic ice at picogram-per-gram level by laser atomic fluorescence spectrometry, *Analytical Chemistry*, **61**, 1758-1762.
- Delmas, R.J., and Legrand, M.R., (1989) : Long term changes in the concentrations of major chemical compounds (soluble and insoluble) along deep ice cores, pp. 319-341, in "The Environmental record in glaciers and ice sheets", Dahlem Workshop Reports (Physical, Chemical and Earth Sciences Research Report 8), H. Oeschger and C.C. Langway Jr. editors, J. Wiley and Sons.
- Legrand, M., Stordal, F., Isaksen, I. and Rognerud, B. (1989) : A model study of the stratospheric budget of odd nitrogen, including effects of solar cycle variations, *Tellus*, **41**, 413-426.
- Pinglot, J.F. and Pourchet, M. (1989) : Détermination du bilan glaciaire en zone d'accumulation par mesure in situ de la radioactivité due à Tchernobyl, *C.R. Acad. Sci. Paris, Série 2*, **309**, 365-370.
- Pourchet, M., Pinglot, J.F. and Mélières, M.A. (1989) : Cesium 137 and lead 210 in alpine lake sediments : measurements and modeling of mixing processes, *J. of Geophys. Res.*, **94** (C9), 12761-12770.

- Laj, P. and Boutron, C.F. (1990) : Trace elements in snow deposited at Nevado del Ruiz volcano, Colombia, *J. of Volcanology and Geothermal Res.*, **42**, 89-100.
- Boutron, C.F. (1990) : A clean laboratory for ultralow concentration heavy metal analysis, *Fresenius Zeitschrift fur Analytische Chemie*, **337**, 482-491 (invited plenary paper presented at the 11th International Symposium on Microchemical Techniques, Wiesbaden, Federal Republic of Germany, August 28-September 1, 1989).
- Boutron, C.F., Bolshov, M.A., Koloshnikov, V.G., Patterson, C.C. and Barkov N.I. (1990a) : Direct determination of lead in Vostok Antarctic ancient ice by laser excited atomic fluorescence spectrometry, *Atmospheric Environment*, **24A**, 1797-1800.
- Boutron, C.F., Patterson, C.C. and Barkov, N.I. (1990) : The occurrence of zinc in Antarctic ancient ice and recent snow, *Earth and Planetary Science Letters*, **101**, 248-259.
- Görlach, U. and Boutron, C.F. (1990) : Preconcentration of lead, cadmium, copper and zinc in water at the pg/g level by non boiling evaporation, *Analytica Chimica Acta*, **236**, 391-398.
- Legrand, M. and Kirchner, S. (1990) : Origin and variations of nitrate in south polar precipitation, *J. Geophys. Res.*, **95**, 3493-3509.
- Mayewski, P. and Legrand, M. (1990) : Recent increase in nitrate concentration of Antarctic snow, *Nature*, **346**, 258-260.
- Pourchet, M., Pinglot, J.F., Maley, J., Mélières, M.A., and Zogning, A. (1990) : LETTER. *J. of Volcanology and Geothermal Research*, **42**, 40.
- Piboule, M., Pourchet, M., Bouchez, R., Amosse, J., Brenac, Maley, J., Pinglot, J.F. and Vincent Ch. (1990) : Radiometric studies of Lake Nyos (Cameroon) sediments : evidence of strong mixing and excess ^{210}Pb . *J. of Volcanology and Geothermal Res.*, **42**, 363-372.
- Maurette, M., Olinger, C., Pourchet, M., Brandstätter, F., Bourot-Denise, M., Levy, C.M. and Quarat G. (1991) : A collection of diverse micrometeorites recovered from 100 tonnes of Antarctic blue ice. *Nature*, **351**, 44-47.
- Legrand, M., Feniet-Saigne, C., Saltzman, E.S., Germain, C., Barkov, N.I. and Petrov, V.N. (1991) : An ice core record of oceanic dimethylsulphide emissions during the last climatic cycle, *Nature*, **350**, (6314), 144-146.
- Legrand, M. and Feniet-Saigne, C. (1991) : Methanesulfonic acid in South polar snow layers : a record of strong El Nino ? *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 187-190.
- De Angelis, M. and Gaudichet, A. (1991) : Saharan dust deposition over Mont Blanc (French Alps) during the last 30 years, *Tellus*, **43B**, 1, 61-75.
- Palais, J.M., Kirchner, S. and Delmas, R., (1991) : Identification of some global volcanic horizons by major element analysis of fine ash in Antarctic ice, *Annals of Glaciology*, **14**, 216-220.
- Bolshov, M.A., Boutron, C.F., Ducroz, F.M., Görlach, U., Kompanetz, O.N. and Rudniev, S.N. (1991) : Direct determination of cadmium down to 0.1 pg/g level in Antarctic and Greenland snow and ice by laser atomic fluorescence spectrometry. *Analytica Chimica Acta* (sous presse).
- Görlach, U. and Boutron, C.F. (1991) : Changes in heavy metals concentrations in Antarctic snows from 1940 to 1980. *Journal of Atmospheric Chemistry*. (sous presse)

- Dibb, J.E., Jaffrezo, J.L. and Legrand, M. (1991) : Initial findings of recent investigations of air-snow relationships in the Summit regions of the Greenland ice sheet, *J. of Atmos. Chem.*, (sous presse).
- Legrand, M., Feniet-Saigne, C. and Saltzman, E.S. (1991) : Spatio-temporal variations of methane sulfonic acid and non sea salt sulfate in antarctic ice, *J. of Atmos. Chem.*, (sous presse).
- Maupetit, F. and Delmas R.J. (1991) : Chemical composition of falling snow at Dumont d'Urville (Antarctica). *J. Atm. Chem.*, (sous presse).
- IV.2 - COLLOQUES : COMPTES-RENDUS**
- Boutron, C.F., Patterson, C.C. and Barkov, N.I. (1989) : Assessing the quality of thermally drilled deep Antarctic ice cores for trace elements analysis. In "*Proceedings of the International Workshop on Ice Core Drilling*", Grenoble, France, 10-15 October 1988, 182-197.
- Görlach, U. and Boutron, C.F. (1989) : Heavy metal concentrations in surface snow from central Greenland. In "*Proceedings of the 7th International Conference on Heavy Metals in the Environment*", Geneva, Switzerland, 10-15 September 1989, Vernet J.P. Ed., Page Bros, Norwich, England, 24-27.
- Bolshov, M.A., Boutron, C.F. and Koloshnikov, V.G. (1989) : Direct ultrasensitive determination of lead at sub pg/g level in Antarctic ice by laser atomic fluorescence. *11th International Symposium on Microchemical Techniques*, Wiesbaden, Federal Republic of Germany, August 28-September 1, 1989.
- Bolshov, M.A., Boutron, C.F. and Zybin, A.V. (1989) : Direct determination of lead in Antarctic ice and snow by LEAFS technique. *26th Colloquium Spectroscopical International*, Sofia, Bulgaria, July 2-7, 1989.
- Boutron, C.F. (1990) : Atmospheric lead, cadmium, mercury and arsenic in Antarctic and Greenland recent snow and ancient ice. In "*National Perspectives on Global Metal Cycling*", Hutchinson T.C., Gordon C.A. and Meema K. Eds., Wiley Eastern, New Delhi, India, in press.
- Boutron, C.F., Bolshov, M.A., Barkov, N.I., Koloshnikov V.G. and Patterson C.C. (1990) : Determination of toxic metals in environmental objects by laser excited atomic fluorescence spectrometry, *Proceedings of the Course on Optoelectronics for Environmental Science*, Erice, Italy, 3-12 September 1989, Plenum Press, in press.
- Maupetit, F. and Delmas, R.J. (1990) : Glaciochemical study of four glaciers from the French Alps : Preliminary results. A contribution to subproject ALPTRAC-EUROTRAC Symposium '90. P.Borell et al. pp. 57-60.
- Pinglot, J.F. et Pourchet, M. (1990) : Utilisation du repère radioactif de Tchernobyl pour les mesures d'accumulation de neige dans l'hémisphère nord, *Colloque "Dynamique des Risques Naturels et Glaciologie"*, Grenoble, 5/7 décembre, Quatrièmes entretiens Jacques Cartier, p. 3-23/3.3-27.
- Görlach, U., Candelone,, J.P. and Boutron, C.F. (1991) : changes in heavy metals concentrations in Greenland snow during the past twenty years. Accepted for publication in "*Proceedings of the 8th International Conference on Heavy Metals in the Environment*", Edinburgh, 16-20 September 1991.
- IV.3 - PUBLICATIONS DIVERSES**
- Boutron, C.F. (1988) : Le plomb dans l'atmosphère, *La Recherche*, **198**, 446-455.

- Fehsenfeld, F., Hov, O., Ancellet, G.A., Cox, R.A., Ehhalt, D., Hakola, H., Legrand, M., Liu, S. (1988) : NO_x in the troposphere (working group), *Tropospheric Ozone : regional and global scale interactions*, ed. I. Isaksen, NATO ASI, serie C., **227**, 393-401.
- Albritton, A., Cicerone, R.J., Khalil, M.A.K., Legrand, M., Makide, Y., Rowland, F.S., Steele, L.P., Zander, R. (1988) : Trends in Source Gases (working group at Peterborough, August 1988), **79**, NASA publication 1208.
- Boutron, C.F., Patterson, C.C., Petrov, V.N. and N.I. Barkov (1988) : The occurrence of tropospheric lead in Antarctic ice during the last 155,000 years, *Antarctic Research Climate Newsletters*, **3**, 26-27.
- De Angelis, M., Legrand, M., Barkov, N.I. and Petrov, V.N. (1988) : Chemical measurements on deep antarctic ice cores, *Antarctic Climate Research*, **3**, 20-22.
- Delmas, R.J. and Legrand, M. (1988) : Glacio-chemical studies in the Antarctic and the biogeochemical cycles, *Antarctic Climate Research*, **3**, 23-25.
- Boutron, C., Patterson, C.C., Petrov, N.I. and Barkov, N.I. (1988) : The occurrence of tropospheric lead in Antarctic ice during the last 155,000 years, *Antarctic Climate Research*, **3**, 26-27.
- Pourchet, M., Pinglot, J.F., Maley, J. and Mélières, M.A. (1988) : Another gas burst in Cameroon lake ? *Nature*, Scientific correspondence, **334**, 655.
- Delmas, R.J. (1989) : Silicon 32 and Argon 39. in *"Nuclear Methods of Dating"*, (E. Roth and B. Poty, eds), pp. 455-472.
- Davies, T., Delmas, R.J., Jones, G. and Tranter, M. (1989) : As pure as the driven snow ? *New Scientist*, **1659**, 45-49.
- Brimblecombe, P., Hammer, C., Rhode, H., Ryaboshapko, A. and Boutron, C.F. (1989) : Human influence on the sulphur cycle. In *"Evolution of the Global Biogeochemical Sulphur Cycle"*, Brimblecombe P. and Lein A. Yu Eds., John Wiley and Sons, pp. 77-121.
- Davidson, C.I., Barrie, L.A., Bergametti, G., Boutron, C.F., Harrison, R.M., Kemp, K., Krell, U., Maenhaut, W., Müller, J., Schroeder, W.H. and Ross, H. (1989) : Research needs in understanding processes of transformation, and dry and wet deposition of atmospheric metals. In *"Control and Fate of Atmospheric Trace Metals"*, Pacyna J.M. and Ottar B. Eds., Kluwer Academic Publishers, pp. 355-364.
- Boutron, C.F. and Görlach U. (1990) : The occurrence of heavy metals in Antarctic and Greenland ancient ice and recent snow. In *"Metal Speciation in the Environment"*, NATO ASI Series Vol G 23, Broekaert J.A.C., Gücer S. and Adams F. Eds., Springer Verlag, pp. 137-151.
- Pinglot, J.F. and Pourchet, M. (1990) : Détermination du bilan glaciaire en zone d'accumulation par mesure in situ de la radioactivité due à Tchernobyl. *La Houille Blanche*. n°5 pp.359-364.
- Pourchet, M. and Pinglot, J.F. (1990) : French-Camerounian Field Work. *International Working Group on Crater Lakes. Newsletter*, n°2.
- Maupetit, F. and Delmas, R.J. (1990) : A preliminary geochemical study of our glaciers in the French Alps, *Eurotrac Newsletter*, **6190**, 14-17.
- Maurette, M., Hammer, C. and Pourchet, M. (1990) : Les nouvelles micrométéorites polaires. *Le Courrier du CNRS*, **76**. 1 p.
- Maurette, M., Hammer, C. and Pourchet, M. (1990) : Multidisciplinary investigations of new collections of Greenland and Antarctica micrometeorites. In

"Mantle to Meteorites", (GOALAN Edt), Indian Academy of Sciences, Bangalore. pp. 87-126.

Palais, J.M., Kirchner, S. and Delmas, R. (1990) : Identification and correlation of volcanic eruption horizons in a 1000 yr ice core record from the South Pole, *Antarct. J. of the US*, 101-104.

IV.4 - THESES

Kirchner, S. (1988) : Chimie de la neige (Na, Cl, NO₃, SO₄) à la station Pôle Sud, Thèse Nouveau Régime Paris VII, 239 p.

Delmas, V. (1989) : Chimie de la neige et de la fonte printanière au Casset (Alpes du Sud). Influence des poussières minérales. *Thèse nouveau régime*, Univ. Paris VII.

Feniet, C. (1990) : L'acide méthanesulfonique dans la précipitation Antarctique. Implication pour le cycle du soufre aux hautes latitudes. *Thèse de Doctorat U.J.F Grenoble 1* : mention Mécanique. 260 p.

+°+°+

CHAPITRE 5 :

RHEOLOGIE DE LA GLACE

I - OBJECTIFS GENERAUX

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.

L'équipe "Glace" du LGGE a pour vocation l'étude du comportement mécanique de la glace qui peut être séparée en deux axes selon que l'on s'intéresse au comportement totalement ductile ou au domaine fragile et à la transition ductile/ fragile :

- a) Etude de la rhéologie des glaces polaires, prenant notamment en compte l'anisotropie liée au développement d'une texture (fabrique) induite par la déformation sous sollicitation de fluage (écoulements gravitaires) à très faibles vitesses de déformation (10^{-12}s^{-1}) ; l'objectif est la modélisation de l'écoulement des calottes polaires et de leur évolution tenant compte du couplage loi de comportement anisotrope - évolution de l'anisotropie (cet objectif s'insérant lui-même dans celui plus vaste de l'étude des variations du climat terrestre).

Les très faibles vitesses de déformation rendent très difficiles les études expérimentales en laboratoire. Quelques mesures in-situ (inclinométrie de trous de forage, densification, textures) fournissent des contrôles pour les modèles : à ce titre les carottages profonds réalisés en Antarctique et au Groenland sont essentiels.

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

jointes de grains dans les processus de déformation.

- b) Etude du comportement de la glace aux vitesses de déformations élevées (supérieures à 10^{-4}s^{-1}) pour comprendre et modéliser les processus de micro-fissuration conduisant à la formation de glace broyée au contact d'une structure puis à son extrusion (cas des glaces dérivantes en interaction avec des structures à la mer) ; les forts intérêts économiques en jeu dans l'exploitation des ressources énergétiques de l'Arctique ont conduit récemment à une poussée générale sur l'étude du comportement de la glace dans le domaine fragile, en vue d'optimiser le calcul des ouvrages. Parallèlement, un effort est entrepris pour caractériser le fluage de la glace non endommagée sous sollicitations variables, et le comportement ductile pour un état d'endommagement donné (estimation de la dissipation d'énergie par fluage, définition de la zone de transition ductile-fragile) ; l'objectif est d'aboutir à la modélisation de l'indentation et à l'expérimentation de l'interaction glace-structure in-situ (les expériences en vraie grandeur sont nécessitées par l'existence d'un effet d'échelle conduisant à des pressions mesurées sur une structure réelle inférieures à celles obtenues à partir d'essais en laboratoire).

Ces recherches sont menées tant sur le plan théorique (lois de comportement et modes de déformation) qu'expérimental (essais mécaniques). Elles nécessitent l'emploi de méthodes numériques élaborées (éléments finis) à cause de la complexité des lois de comportement utilisées et des conditions aux limites mises en jeu (conditions de frottement glace/lit glaciaire ou glace/structure).

II - RESULTATS OBTENUS AU COURS DES QUATRE DERNIERES ANNEES

II.1 - RHEOLOGIE DES GLACES POLAIRES

La vitesse de déformation d'un monocristal de glace varie de plus d'un ordre de grandeur selon que la sollicitation favorise ou non le glissement dans les plans de base. Aussi, le comportement de l'agrégat polycristallin est-il fortement dépendant de la distribution des orientations des axes C (perpendiculaires aux plans de base) de ses grains constitutifs.

II.1.1 - Texture des glaces de Vostok

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

Grâce à la collaboration avec l'équipe de Leningrad, nous disposons d'échantillons provenant de la station de Vostok entre la surface et 2400 m de profondeur. Les fabriques, induites par le glissement basal, indiquent un écoulement convergent correspondant à une traction selon l'axe d'écoulement de la glace (Lipenkov, Barkov, Duval et Pimienta, 1989). La simulation de l'évolution de la fabrique avec la profondeur a été faite en supposant que la déformation du polycristal est obtenue par la moyenne arithmétique de la déformation des cristaux par le glissement basal. L'hypothèse selon laquelle l'état de contrainte est homogène dans le polycristal est justifiée pour les glaces de Vostok dans la mesure où l'accommodation du glissement intracristallin par la migration des joints de grains minimise l'écroutissage et que le comportement de ces glaces est quasi-Newtonien (Pimienta, Duval et Lipenkov, 1988). En outre, adaptant le modèle proposé par Lliboutry et Duval (1985) aux glaces anisotropes de Vostok, les paramètres rhéologiques ont été déterminés.

La prise en compte de l'anisotropie de ces glaces est essentielle pour améliorer la datation de la carotte de Vostok.

II.1.2 - Modélisation de la densification du névé et de la glace polaire

(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 teneur en gaz permettent de connaître précisément les conditions au close-off (densité et pression de la glace). Disposant des profils de densité, de la densité à la fermeture des pores (close-off), de l'accumulation de neige annuelle et de la température du névé, nous avons adapté le modèle de densification établi pour les céramiques par Wilkinson et Ashby (1975) à la densification du névé et de la glace polaire. La loi de densification tirée de ce modèle rend parfaitement compte des profils de densité du névé polaire pour les deux stades : pores ouverts et pores fermés (Figure 5.1).

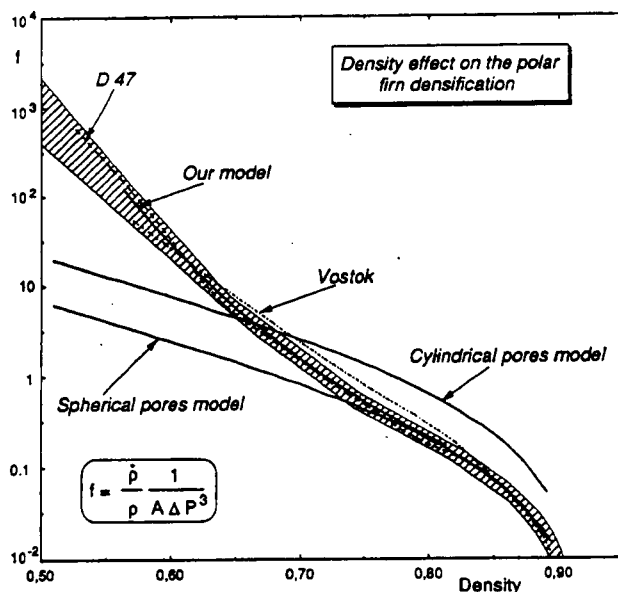


Figure 5.1 :
Effet de la densité sur la densification du névé polaire.

Ce modèle est actuellement utilisé pour déterminer le temps nécessaire à une couche de neige pour atteindre la densité critique à la fermeture des pores i.e. la méthode la plus sûre pour calculer la différence entre l'âge de la glace et l'âge du gaz emprisonné dans les bulles. Ainsi à Vostok (Antarctique), l'âge de la glace au close-off est proche de 2500 ans correspondant à une épaisseur du névé de 150 m.

Cette approche confirme en outre le comportement Newtonien des glaces des couches supérieures des calottes polaires.

II.1.3 - Cristaux de clathrates d'air dans les glaces de Vostok

(T. Uchida, T. Hondoh, V. Lipenkov et P. Duval)

Les bulles d'air qui se forment lorsque le névé se transforme en glace, disparaissent entre 500 et 1000 m de profondeur. Des cristaux d'hydrate d'air dont les dimensions sont proches de 100 microns apparaissent alors. Leur structure cristallographique a été déterminée par diffraction X à SAPPORO (Japon). Elle est cubique avec un paramètre de réseau égal à 17,5 Å (Figure 5.2).

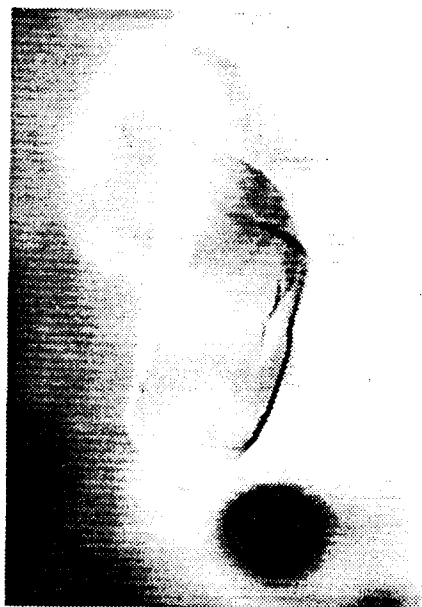


Figure 5.2 : 100µm
Cristal d'hydrate d'air dans la glace de Vostok
(profondeur : 1800 m)

L'analyse optique (nombre, taille et forme) a été faite sur la carotte de Vostok. A partir de ces données, il est possible d'obtenir la teneur en gaz de ces glaces profondes. L'imprécision provient surtout du taux d'occupation des molécules d'air dans les cages déterminé par spectrométrie RAMAN.

II.2 - MODÉLISATION DES CALOTTES POLAIRES

II.2.1 - 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 le champ des vitesses dans une nappe de glace qui s'écoule sous l'action de la gravité. Ce calcul doit être couplé à celui du champ des températures car la viscosité de la glace est fortement dépendante de la température, variant d'un facteur 500 entre - 50° C (température moyenne en surface) et 0° C (température de la couche basale).

Le développement d'un modèle complet de calotte polaire n'est pas du ressort de notre équipe (voir par ailleurs). Notre contribution à ce thème se limite aux seuls points qui relèvent de notre compétence :

- modélisation des conditions aux limites sur le socle,
- modélisation du comportement du matériau.

II.2.2 - Conditions aux limites : modèle de comportement pour la couche basale

(J. Meyssonier)

L'établissement des modèles d'écoulement des glaciers et calottes polaires nécessite 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 tempérée 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 3000 m). Elles sont établies en adoptant une loi de fluage de type Norton-Hoff.

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 (Meysonnier, 1989) a permis de montrer que l'emploi de la loi de fluage 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 $\tau = (\sigma'_{ij} \sigma'_{ij}/2)^{1/2}$ supérieures à 1 MPa a montré que cet effet peut également être négligé dans l'établissement des lois de glissement. Les calculs ont été effectués avec le code d'éléments finis développé au laboratoire.

II.2.3 - Evolution des textures

(J. Meysonnier et Ph. Gaillard)

L'orientation des cristaux des glaces polaires diffère de celle observée dans les glaciers tempérés. Au-dessus d'une couche basale où la recristallisation dynamique induit une fabrique à maximums multiples semblable à celle des glaciers tempérés, les observations effectuées sur des carottes extraites en différents sites montrent que la fabrique est induite par la déformation (situations extrêmes : axes C verticaux / axes C étalés dans le plan vertical) (Pimienta, 1987).

A ce jour cette anisotropie est ignorée dans les modèles ; les plus sophistiqués y font référence en considérant des couches isotropes de viscosités différentes. Les modèles non stationnaires suivent la déformation de ces couches au cours du temps. L'idéal serait de prendre réellement en compte l'anisotropie de la glace et, dans l'objectif d'un modèle d'évolution de calotte, de pouvoir modéliser l'évolution de cette anisotropie avec la déformation.

La modélisation du comportement anisotrope a été traitée par Lliboutry (1987) en supposant un état de contrainte homogène dans le polycristal.

Le problème de l'évolution de la texture n'a été abordé que très récemment dans une approche très simplifiée (milieu bidimensionnel, traitement purement cinématique) (Gaillard, 1990). Une collaboration avec G. CANOVA (Université de Metz) a été amorcée pour appliquer la méthode auto-cohérente qu'il a développée à des schémas d'écoulement simples.

RÉFÉRENCES :

PIMIENTA P. 1987. ETUDE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES GLACES POLYCRISTALLINES AUX FAIBLES CONTRAINTES ; APPLICATIONS AUX GLACES DES CALOTTES POLAIRES - THÈSE, UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER, GRENOBLE I.

LLIBOUTRY L. 1987. VERY SLOW FLOWS OF SOLIDS. (MARTINUS NYHOFF, PUBL.) 510 P.

GAILLARD PH. 1990. MÉMOIRE DE DEA - LGGE.

II.3 - 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 Mémorial et l'Institut de Dynamique Marine (NRC) de St John's (Canada) (stage de J. Meysonnier en septembre 87 - juin 88, stage de 2 ans de P. Kalifa comme attaché de recherche du NRC à l'IMD depuis janvier 89).

II.3.1- Fluage transitoire (matériau non endommagé)

(J. Meyssonier et A. Goubert)

L'effort engagé sur la modélisation de l'endommagement de la glace ne peut être séparé d'une amélioration sensible des connaissances sur le fluage de la glace, notamment en ce qui concerne le fluage transitoire, thème encore relativement peu étudié à ce jour.

En effet, dans la zone transitoire ductile-fragile, pour des vitesses de déformation de l'ordre de 10^{-4} s⁻¹, le fluage de la glace ne peut être négligé. C'est le comportement transitoire qui joue alors un rôle essentiel étant donné l'échelle de temps à considérer (en compression la déformation atteinte au pic de la couche contrainte- déformation est de l'ordre de 10^{-3}).

Pour des contraintes supérieures à 0.04 MPa, seuil en dessous duquel d'autres mécanismes interviennent (Lliboutry et Duval, 1985), le fluage du polycristal est la résultante du mouvement des dislocations dans chaque grain. L'énorme anisotropie plastique du monocristal est la cause d'incompatibilités de déformation entre grains et provoque la naissance d'un champ de contraintes internes (non uniforme) responsable de l'érouissage cinématique, dont la croissance correspond à la phase de fluage primaire. Sous l'action de ces très fortes contraintes locales (à l'échelle du grain) d'autres mécanismes que le glissement basal peuvent être activés permettant d'atteindre une vitesse minimum. La relaxation des contraintes internes est à l'origine de la déformation recouvrée que l'on observe lorsqu'un échantillon est déchargé. Après une décharge totale, cette déformation recouvrée est supérieure d'un ordre de grandeur à la déformation purement élastique (Duval, 1978). A l'érouissage directionnel se superpose un érouissage isotrope qui résulte de l'interaction (à courte distance) entre dislocations (Duval et al., 1983). Les périodes d'hésitation au fluage provoquées soit par une petite diminution de charge au cours du fluage, soit par une petite surcharge imposée au cours de la recouvrance de déformation suivant une décharge totale, mettent en évidence l'existence de phénomènes de restauration

de la contrainte interne associée à l'érouissage isotrope.

A ce jour, n'existent que deux modèles voulant rendre compte du comportement transitoire de la glace (le Gac et Duval, 1980 ; Sunder et Wu, 1989). Ces modèles sont sensés prendre en compte les traits essentiels des mécanismes qui entrent en jeu dans la déformation de la glace, par le biais de contraintes internes caractérisant le niveau de résistance à la déformation.

Dans le but de comparer les deux modèles, il a été effectué un groupe d'essais de compression simple sur deux séries d'échantillons de glace artificielle équiaxe correspondant à des tailles de grains de 1 à 4 mm. Ces échantillons ont été soumis à un fluage à charge constante (1.77 MPa), à une température de - 10° C, sur une durée variant de 3 à 4 heures, à la suite de quoi il était procédé à une décharge totale. L'évolution de la déformation au cours du temps était mesurée à l'aide de deux capteurs de déplacement dont les supports étaient soudés sur le tiers central de l'échantillon étudié. Compte tenu de la dispersion des mesures, la comparaison des courbes de déformation obtenues ne permet pas de mettre en évidence un possible effet de taille des grains, contrairement à ce qui semble être le cas pour la glace colonnaire (Sinha, 1988).

Les deux modèles ont été testés sur leur capacité à reproduire à la fois la mise en charge et la décharge totale. Il est possible d'ajuster les quatre paramètres du modèle Le Gac et Duval pour décrire correctement une décharge totale en compression, mais dans ce cas la description du fluage primaire est totalement inacceptable (la vitesse minimum de fluage est atteinte pour une déformation totale de 3.10^{-3} au lieu de 1 % toujours observé). Si l'on s'attache à décrire cette phase de fluage primaire seule, on peut parvenir à un accord excellent avec l'expérience. Vu l'allure de la courbe de mise en charge et le nombre de paramètres disponibles ceci n'est guère étonnant. Cependant il est encourageant de noter que l'accord est obtenu en imposant a priori le niveau de contrainte interne directionnelle en fluage permanent, et en fixant l'ordre de grandeur de celui de la contrainte interne isotrope, d'après les

contraintes imposées par l'existence de périodes d'hésitation au fluage lors de faibles variations de la charge appliquée. La prédiction de l'amplitude de la déformation recouvrée après décharge totale est acceptable, mais l'allure générale de la courbe de décharge n'est pas respectée.

Les trois paramètres du modèle de Sunder et Wu suffisent à représenter excellemment le fluage à la charge, mais, à l'évidence, la déformation recouvrée après décharge totale est très nettement surestimée. Pour en obtenir une description correcte, il faut sacrifier celle du fluage primaire.

Ces résultats (présentés au Colloque GFR 90 - *Meyssonnier et al., 1990*) montrent qu'il reste encore des progrès à réaliser pour parvenir à bien décrire la compression uniaxiale. Ceci nécessitera de reprendre un important travail expérimental.

L'utilisation de ces modèles, dans leur forme actuelle, pour la compréhension des phénomènes conduisant à l'endommagement de la glace aux vitesses de déformation plus élevées paraît prématurée.

RÉFÉRENCES :

LLIBOUTRY, L. AND DUVAL, P. 1985. VARIOUS ISOTROPIC AND ANISOTROPIC ICES FOUND IN GLACIERS AND POLAR ICE CAPS AND THEIR CORRESPONDING RHEOLOGIES, ANNALES GEOPHYSICAE, 3, (2), 207-224.

DUVAL, P., 1978. ANELASTIC BEHAVIOUR OF POLYCRYSTALLINE ICE, J. OF GLACIOLOGY, 21, (85), 621-628.

DUVAL, P., ASHBY, M.F., ANDERMAN, I., 1983. RATE-CONTROLLING PROCESSES IN THE CREEP OF POLYCRYSTALLINE ICE. J. OF PHYSICAL CHEMISTRY, 87, 4066-4074.

LE GAC, H. AND DUVAL, P., 1980. CONSTITUTIVE RELATIONS FOR THE NON ELASTIC DEFORMATION OF POLYCRYSTALLINE ICE. PROC. IUTAM SYMP. "PHYSICS AND MECHANICS OF ICE", COPENHAGEN, 1979, (PER TRYDE ED.), SPRINGER VERLAG, PP. 51-59.

SHYAM SUNDER S., AND WU, M.S., 1989 A. A DIFFERENTIAL FLOW MODEL FOR POLYCRYSTALLINE ICE. COLD REGIONS SCIENCE AND TECHNOLOGY, 16, 45-62.

SHYAM SUNDER S. AND WU, M.S., 1989 B. A MULTIAXIAL DIFFERENTIAL MODEL OF FLOW IN ORTHOTROPIC POLYCRYSTALLINE ICE. COLD REGIONS SCIENCE AND TECHNOLOGY, 16, 223-235.

II.3.2 - Nucléation des fissures en compression triaxiale et évolution de l'endommagement

(P. Kalifa, G. Ouillon et P. Duval)

La transparence de la glace est un atout important pour suivre, par des méthodes optiques, la microfissuration. Les fissures s'ouvrent préférentiellement suivant la direction de moindre compression. Mais cette tendance s'atténue avec l'augmentation de la composante isotrope du tenseur des contraintes. Nous avons montré, dans la gamme des vitesses choisies, le rôle essentiel de la déformation visco-élastique associée au glissement intracristallin. L'objection qui nous est faite quant aux trop faibles vitesses de glissement des dislocations ne tient pas si l'on prend en compte la variation non-linéaire de la vitesse avec la contrainte réduite dans le plan de glissement. Enfin le caractère intercrystallin des fissures se renforce avec la pression de confinement et la vitesse de déformation.

Afin de modéliser la formation d'une fissure de taille comparable à celle des grains, un critère de propagation d'un noyau sous l'effet conjugué des contraintes locales induites par un empilement de dislocations et des contraintes externes a été proposé. En compression, la composante normale du champ de contraintes externes sur la fissure s'oppose aux contraintes locales de traction et rend plus difficile la formation de la fissure.

Ce modèle simplifié ne prend pas en compte le rôle des contraintes de cisaillement dans la propagation du noyau. Il prévoit toutefois le rapport entre les contraintes critiques d'initiation en traction (σ_{iT}) et en compression (σ_{iC}).

Les expériences réalisées au Canada par P. Kalifa

ont mis en évidence un important effet de la température sur la contrainte d'initiation à des vitesses proches de la transition ductile-fragile. La visco-élasticité ne pouvant jouer un rôle essentiel à ces vitesses, il est probable que cet effet soit imputable à une forte sensibilité à la température du coefficient de frottement entre les lèvres des fissures. Ceci justifierait la prise en compte des contraintes de cisaillement dans la propagation des noyaux de fissures.

Pour modéliser l'évolution de l'endommagement jusqu'au pic de contrainte, il sera nécessaire de prendre en compte dans le modèle de nucléation des fissures les contraintes effectivement transmises par le polycristal endommagé qui diffèrent des contraintes appliquées.

11.3.3 - Modélisation de la compression uniaxiale jusqu'au pic de contrainte (J. Meyssonier)

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 ($\sim 10^{-4} \text{s}^{-1}$) 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,
- 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 adapté d'un article dédié à l'impact sur les matériaux métalliques. Il suppose une croissance exponentielle de la vitesse N "d'apparition" des fissures en fonction de la contrainte effective.

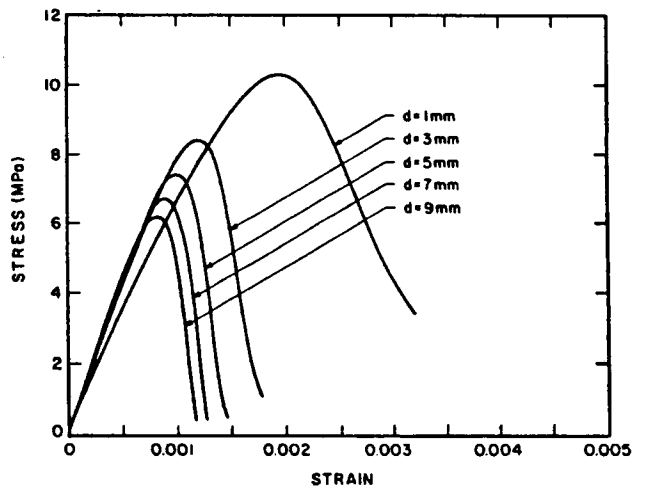


Figure 5.3 :
Courbes contrainte/déformation déduites d'un modèle d'endommagement et effet de la taille des grains ($\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{s}^{-1}$ et $T = -10^\circ \text{C}$)

Ce modèle a été utilisé d'abord 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} (cf. Figure 5.3).

Ce travail a fait l'objet d'une communication au congrès "Offshore Mechanics and Arctic Engineering-OMAE 89", La Haye, Mars 1989.

11.3.4 - Vitesse de fluage de la glace endommagée en compression uniaxiale
(J. Meyssonier, J.Y. Buffière, P. Duval)

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).

L'endommagement était caractérisé par la variation relative du module de 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 $\sigma/(1-D)$ 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 (Meyssonier et Duval, 1989) (cf. Figure 3.4).

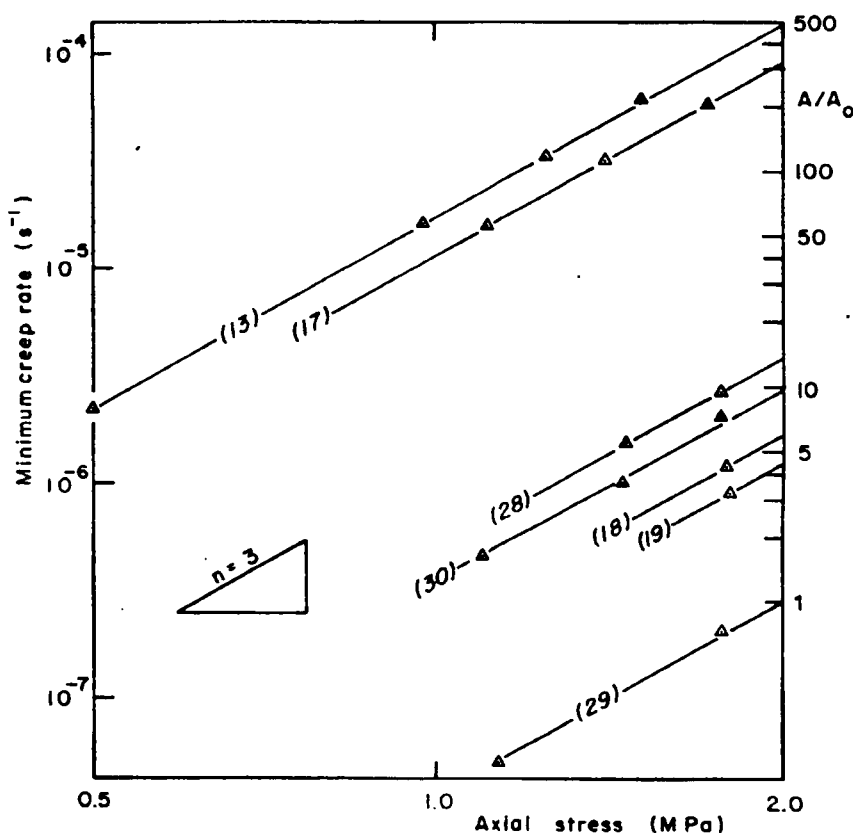


Figure 5.4 : Vitesses minimales du fluage pour des glaces endommagées.

Des essais préliminaires ont montré que les caractéristiques visco-élastiques de la glace sont fortement affectées par l'endommagement avant le pic de contrainte.

Il est probable que la forte anisotropie plastique du cristal soit à l'origine de cet effet.

II.4 - EVALUATION DE LA RÉSISTANCE À L'AVANCEMENT D'UN NAVIRE BRISE-GLACE - EFFETS D'UN PRÉ-DÉCOUPAGE *(P. Duval, G. Marec et B. Fedorovsky [Chantiers de l'Atlantique])*

Afin d'améliorer les performances des navires polaires, de réduire la puissance propulsive qui leur est nécessaire (et donc leur consommation), on pense, depuis déjà une vingtaine d'années, à pré-découper la glace, un peu en amont de l'étrave, afin de créer des zones de fracture privilégiées, pouvant initier les fractures ou en limiter la dispersion latérale.

Des études de pré-découpe avaient bien été faites, en bassins d'essais et en mer, mais à seule fin d'étudier les parts respectives des diverses composantes de la résistance de la glace à la progression d'un navire (résistance de fracture, résistance due à la submersion des blocs cassés, friction...), tout un chenal étant alors découpé au préalable.

Aucun essai visant à déterminer la réduction de résistance que l'on pourrait obtenir d'un système de pré-découpe installé à bord du navire et agissant un peu en avant de l'étrave, en même temps que le navire avance, n'avait jusqu'à présent eu lieu en bassin d'essais à glaces. Cela a été l'objet du programme de recherches réalisé par les chantiers de l'Atlantique au bassin d'essais HSVA de Hambourg. La participation du LGGE à cette étude a permis de porter une appréciation de la qualité de la glace-modèle et d'analyser les résultats concernant plus particulièrement la fracturation de la glace avec ou sans pré-découpage de la glace.

Deux étraves ont été étudiées, une en "V", et une en "cuillère", chacune à deux vitesses. On a observé l'effet de différents paramètres (épaisseur de glace, profondeur des découpes, écartement entre pré-découpes) sur la résistance, mais aussi sur la fracturation de la glace, et sur les mouvements des modèles. On a constaté des gains très importants, et certainement bien supérieurs à l'énergie dépensée en pré-découpe, sur les mouvements et surtout sur la résistance, par rapport à l'avance en glace intacte

- . 10 à 22 % avec une pré-découpe centrale,
- . 20 à 32 % avec deux pré-découpes latérales,

III - CONTRATS ET COLLABORATIONS

- 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. Meyssonier (Septembre 1987 - Juin 1988) 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). Séjour de P. Kalifa, de Janvier 1989 à Septembre 1990.

- 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 Leningrad et plus spécialement avec V. Lipenkov, sur la texture des glaces de Vostok.

- Contrat de la CCE : EPOCH 1990 - 1993. l'étude des cristaux d'hydrate d'air dans les glaces de Vostok.
- Contrats PNEDC : 1989 - 1991.
- La collaboration avec le Département de Physique de l'Université d'Hokkaido concerne actuellement
 - Contrat CNRS / Chantiers de l'Atlantique 1990 "Structures marines Arctiques : Evaluation de la résistance à l'avancement d'un navire brise-glace".

IV - ACTIVITES DE FORMATION

Outre l'activité de recherche proprement dite, notre équipe consacre une partie non négligeable de son temps à l'accueil et à la formation de jeunes chercheurs ou étudiants. La liste des stages effectués dans l'équipe est donnée ci-après.

- . Kalifa P. : Thèse de doctorat UJF (1988).
- . Goubert A., (1989) : Contribution à la modélisation numérique du comportement mécanique de la glace, *Rapport de stage d'ingénieur INPG, 2ème et 3ème année.*
- . Ouillon G., (1989) : Contribution à l'étude de l'endommagement de la glace polycristalline en compression uniaxiale. *Rapport de stage de DEA. Observatoire de Physique du Globe Strasbourg.*
- . Vaillant J.F. : VSNA Terre Adélie, Ingénierie polaire (Décembre 1988/Décembre 1989).
- . Goubert, A. (1990) : Contribution à la modélisation numérique du comportement mécanique de la glace. *Rapport de stage de DEA MMGE, Grenoble 1.*
- . Gaillard, Ph., (1990) : Modèle de formation de texture pour un polycristal de glace bi-dimensionnel, *Rapport de stage DEA MMGE, UJF.*
- . Rechatin, C. (1990) : Etude de la propagation des ondes ultrasonores dans la glace de Vostok. *Rapport de stage de magistère de Physique, ENS Lyon.*
- . Lestringant, R. (1990) : Contribution à l'étude de la visco-élasticité de la glace polycristalline isotrope. *Rapport de stage du DEA MMGE, Grenoble 1.*
- . Noirot Ph. : VSNA Terre Adélie, Ingénierie polaire (Décembre 1989/Décembre 1990).
- . Vignon : Stage 1ère année, Magistère/Ecole de Physique UJF (Janvier/Juin 1991).
- . Pépin : Stage 1ère année, Magistère/Ecole de Physique UJF (Janvier/Juin 1991).
- . Delorme S. : Stage de maîtrise de physique UJF (Avril/Juin 1991).

V - PUBLICATIONS

V.1 - REVUES A COMITE DE LECTURE

- Pimienta, P., Duval, P., Lipenkov, V.Y. (1988) : Mechanical behavior of ice along the 2040 m Vostok core, Antarctica, *Annals of Glaciology*, **10**, 137-140.
- Lipenkov, V., Barkov, N.I., Duval, P., and Pimienta, P. (1989) : Crystalline texture of the 2083 m ice core at Vostok station, Antarctica, *J. of Glaciology*, **35** (121), 392-398.
- Hondoh, T., Goto, A., Hosht R., Ono, T., Anzai, H., Kawase, R., Pimienta, P. and Mae, S. (1989) : Utilisation of high speed x-ray topography for determining diffusion coefficients of point defects in nearly perfect crystals, *Rev. of Sci. Instruments*, **60**, 2494-2497.
- Meyssonnier, J. (1989) : Ice flow over a bump : experiment and numerical simulations, *J. of Glaciology*, **35**, n°119, 85-97.
- Kalifa, P., Duval, P. and Ricard, M. (1989) : Crack nucleation in polycrystalline ice under compressive stress states, in *"Proceedings of the 8th International Conference of Offshore Mechanics and Arctic Engineering"*, **4**, pp. 13-21.
- MacKenna, R.F., Meyssonnier, J. and Jordaan, I.J. (1989) : Pic pressures from a damage model for ice in compression, in *"Proceedings of the 8th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering"*, **4**, pp. 67-73.
- Yao, P.P., Petit, J.R., Jouzel, J., Lorius, C. and Duval, P. (1990) : Climatic record from an ice margin area in East Antarctica, *Annals of Glaciology*, **14**, 323-327.
- Montarges, R. and Duval P. (1990) : Comportement au dégel des sols silteux. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, **45**, n°4, 459-473.
- Duval, P., Kalifa, P. and Lestringant R. (1991) : Viscoelasticity and the compressive failure of polycrystalline ice, in : *"ASCE Cold Regions Engineering"*, pp. 494-503.
- Barnola, J.M., Pimienta, P., Raynaud, D. and Korotkevich, Y.S., (1991) : CO₂-climate relationship as deduced from the Vostok ice core : a reexamination based on new measurements and on a reevaluation of the air dating, *Tellus*, **43B**, 83-90.
- Mélières, M.A., Martinerie, P., Raynaud, D. and Lliboutry (1991) : Glacial-interglacial mean sea level pressure change due to sea level, ice sheet and atmospheric mass changes, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology (Global and Planetary Change Section)*, **89**, 333-340.
- Meyssonnier, J., Goubert, A., Duval, P. et Lestringant, R. (1991) : Fluage transitoire de la glace polycrystalline en compression, *Les Cahiers de Rhéologie*, **IX**, (1), 15-24.
- Kalifa, P., Ouillon, G. and Duval, P. (1991) : Microcracking and the failure of polycrystalline ice under triaxial compression, *J. of Glaciology* (sous presse).
- Kalifa, P., Jones, S.J. and Slade, T.D. (1991) : Microcrack nucleation in granular ice under uniaxial compression : effect of grain size and temperature, *Annals of Glaciology*, **15** (sous presse).
- Duval, P., Kalifa, P. and Meyssonnier, J. (1991) : Creep constitutive equations for polycrystalline ice and effect of microcracking, in *"IUTAM Symposium on ice structure interaction"*, (Springer Verlag) pp. 55-68.

V.2 - COLLOQUES, SYMPOSIUMS

Duval, P. (1988) : Symposium on ice dynamics, University of Tasmania, Hobart, 14-20 February 1988.

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

Kalifa, P., and Duval, P. (1988) : XVIIth International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 21-27 ao t 1988, Grenoble.

Duval P., Marec, G. et Meyssonier, J. (1989) : Le rôle de la fracture de la glace dans les interactions glace-structures, *Colloque International Ingénierie et Economie Arctique : R alit s, Problèmes Pos s, Avenir*, 11 p.

Duval, P. (1989) : Texture and mechanical behavior of Vostok ice. *Symposium on polar ice ; results on Vostok ice cores*, Moscou, juin 1989.

Pimienta, P. and Duval, P. (1989) : Rheology of polar glacier ice, *Annals of Glaciology*, 12, 206, (Extended abstract).

Duval, P. and Jones, S.J. (1989) : Ice structure interaction/workshop on cold regions technology, 28-29 mars 1989, Paris.

Meyssonier, J. and Duval, P., (1990) : Creep behaviour of damaged ice under uniaxial compression: A preliminary study. in *POAC 89 Research report*, Lulea, Sweden, 12-16 June 1989, Vol. 1, pp.225-234.

Meyssonier, J., Goubert, A., Duval, P. and Lestringant, R. (1990) : Fluage transitoire de la glace polycristalline en compression. in *"Rhéologie des Matériaux du G nie Civil. 25e Colloque"*, 28/30 Nov., pp.367-388.

Duval, P. (1990) : Mechanical behavior of polycrystalline ices. *Colloquium on ice properties*, University College, London, 12-13 juin 1990.

Duval, P. (1990) : Mechanical behavior of polar ices, *Meeting on mechanical tests on polar ices*, University of Copenhagen, 20-24 Novembre 1990.

Lliboutry, L. (1990) : Mantle Viscosity : What are we exactly looking for ?, in *"Glacial isostasy, sea-level and mantle rheology."* (R. Sabadini , Lambeck and E. Boschi Edt.), NATO ASI Series C, 334. Acad. Press. pp. 321-341

V.3 - AUTRES PUBLICATIONS

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

Duval, P. and Pimienta, P. (1988) : Mechanical behaviour of polar ice, *Antarctic Climate Research*, 3, 17-19.

Lliboutry, L. (1989) : La mécanique physique : une grave lacune de notre enseignement, *La Recherche*, 204, 391-392.

Lliboutry, L. (1990) : The origin of waves on rock glaciers. *Journal of Glaciology (Scientific correspondence)*, 35, n 12, 31.

Lliboutry L., (1990) : Correspondence. *J. of Glaciology*, 36, n  122, 125.

Duval, P. et Marec, G. (1990) : Evaluation de la résistance   l'avancement d'un navire brise-glace ; effets d'un prédécoupage de la glace. *Rapport de contrat Chantiers de l'Atlantique/LGGE*.

V.4 - THESES

Kalifa, P. (1988) : Contribution   l'étude de la fissuration dans la glace polycristalline en compression, *Thèse Université Joseph Fourier, Grenoble 1*, 149 p.

CHAPITRE 6 :

GLACES
EXTRA-TERRESTRES



I - OBJECTIFS GENERAUX

L'étude des problèmes astrophysiques faisant intervenir des glaces, constitue le programme de recherche de l'équipe de physique du LGGE depuis 1980. Celui-ci initié à partir de l'étude de l'évolution thermique des noyaux cométaires, s'articule actuellement autour des sujets suivants :

- 1) La formation des comètes et leur évolution physico-chimique lors de leur pénétration dans le système solaire (Planétologie).
- 2) Physico-chimie, spectroscopie de surface et modélisation des corps glacés du Système Solaire (ATP Planétologie, Programme National de Planétologie).
- 3) Physico-chimie et spectroscopie infrarouge des grains interstellaires - Etude des mécanismes de formation et de destruction des manteaux de glace et leurs interactions avec la phase gazeuse (GdR "Physico-chimie des Molécules Interstellaires, GdR ISO-Spectrométrie Infrarouge").

- 4) Thermodynamique et chimie hétérogène d'aérosols (Programme STEP).

L'étude des phénomènes intervenant dans les domaines cités de l'astrophysique et de la physico-chimie atmosphérique 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 . Certains satellites glacés comme Triton et Titan étant recouverts principalement de glaces d'azote et d'hydrocarbures solides ou liquides, nous étendons actuellement nos activités à l'étude de leurs propriétés optiques et physico-chimiques.

II - RESULTATS MAJEURS OBTENUS AU COURS DES QUATRE DERNIERES ANNEES

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, dont la valeur

estimée est comprise entre 280 kg/m^3 et 650 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

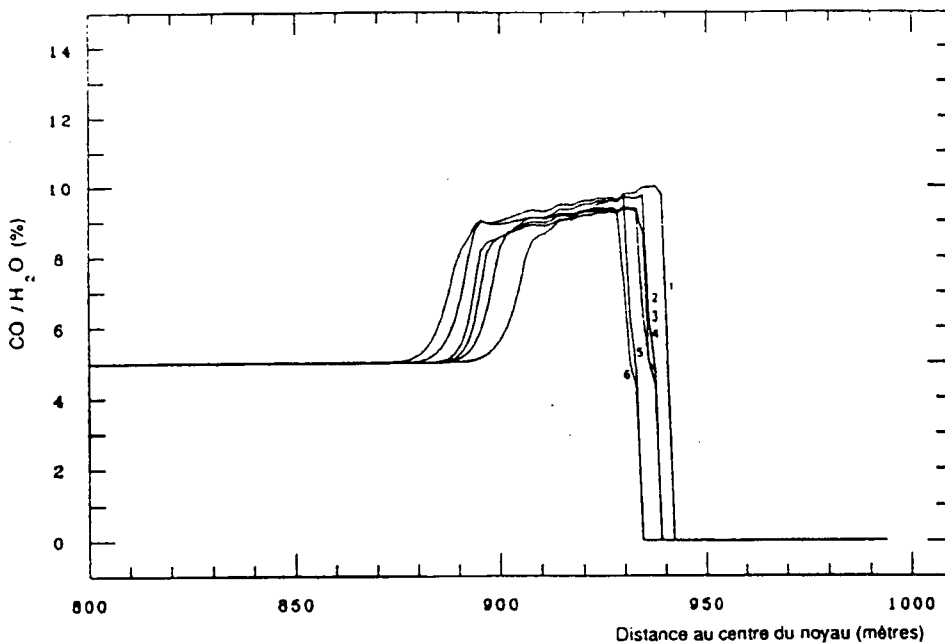


Figure 6.1 :

Courbe typique de l'évolution de la teneur en CO à l'intérieur d'un noyau de comète modèle.

Orbite : P/Churyumov-Geranimenko, porosité : 80 %, rapport CO/H₂O : 0,05

distances héliocentriques des différents profils :

1 : 5.3 V.A., 2 : 2,82 V.A., 3 : 1.29 V.A. (périhélie)

4 : 2.82 V.A., 5 : 5.3 V.A., 6 : 5.72 V.A. (aphélie)

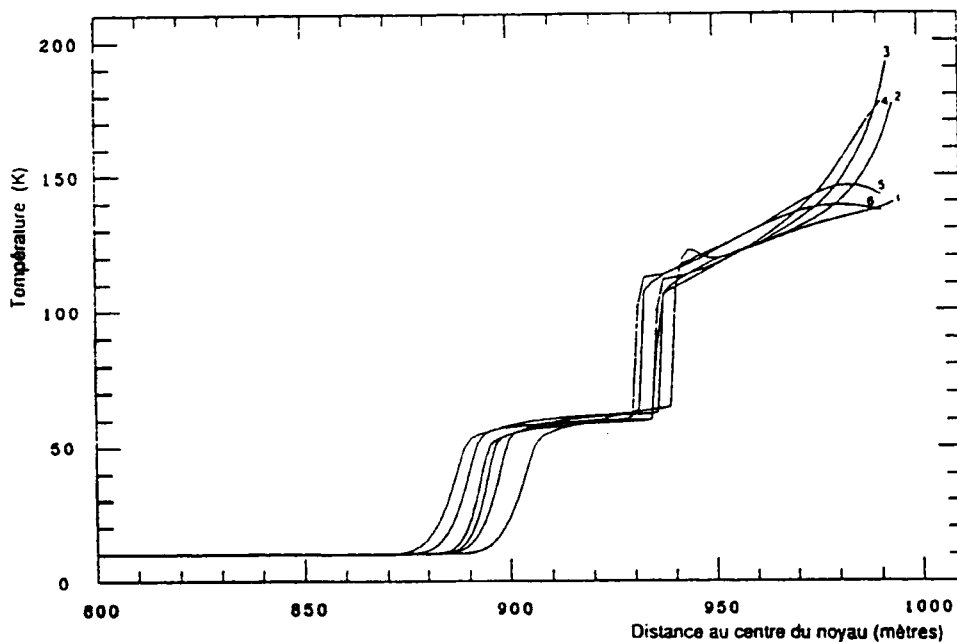


Figure 6.2 :

Profils de température typiques à l'intérieur d'un noyau modèle au cours d'une révolution (mêmes conditions que Figure 6.1)

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 poreux.

Plusieurs types de noyaux ont été étudiés :

- . un noyau comportant un rapport $\text{CO}/\text{H}_2\text{O}$ de 0.3
- . un noyau comportant un rapport $\text{CO}/\text{H}_2\text{O}$ de 0.05
- . un noyau comportant un rapport de $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ de 0.15
- . un noyau comportant un rapport de $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ de 0.05

Les volumes relatifs des pores étaient égaux soit à 0.8, soit à 0.3. Nous avons fait évoluer nos comètes "modèles" sur l'orbite de P/Halley (excentricité $e = 0.967$, demi-grand'axe $a = 17.93$ unités astronomiques) et sur celle de P/Churyumov-Geranimenko ($e = 0.632$, $a = 3.51$ U.A.).

La glace H_2O est considérée initialement amorphe. En effet, des données spectrométriques suggèrent que certaines régions du milieu interstellaire contiennent de la glace amorphe. L'existence de glace amorphe dans les comètes est donc hautement probable.

Il s'est avéré que la phase plus volatile que H_2O outre qu'elle diffuse vers la surface, s'enrichit dans les couches profondes (Figure 6.1).

Des profils de température typiques sont montrés Figure 6.2.

Par ailleurs, les rapports des taux de production de gaz $\text{CO}/\text{H}_2\text{O}$ ou $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ sont variables le long de l'orbite et très différents de ceux initialement présents dans le noyau (Thèse S. Espinasse).

Les résultats ont fait l'objet de plusieurs communications dans les colloques et d'une publication dans "Icarus".

Récemment, nous avons pu démontrer que ce modèle livre une explication possible au récent sursaut d'activité de P/Halley à une distance héliocentrique de 14 unités astronomiques environ. Ce travail sera présenté dans une session spéciale consacrée à l'activité cométaire loin du soleil au colloque "Asteroids, Comets, Meteors" à Flagstaff (Arizona) du 24 au 28 Juin 1991.

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, Leiden, NL]

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 déterminées afin de tester leur pertinence à l'échelle des phénomènes cométaires et de 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 , CO_2 , CH_4 , NH_3) par la glace H_2O a été faite en plusieurs étapes

a) 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 CH₄ et 70 K pour CO₂. Après cette évaporation une fraction des molécules reste piégée dans la glace H₂O amorphe (gaz/H₂O = 7 à 10%).
- Aux températures supérieures à 120 K, une disparition totale de CO, CH₄ et CO₂ a lieu au

cours de la cristallisation de la glace H₂O. Les vitesses de cristallisation de H₂O, fortement dépendantes de la température, ont été mesurées entre 120 et 140 K (Figure 4.3). Pour les mélanges de glaces riches en H₂O 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.

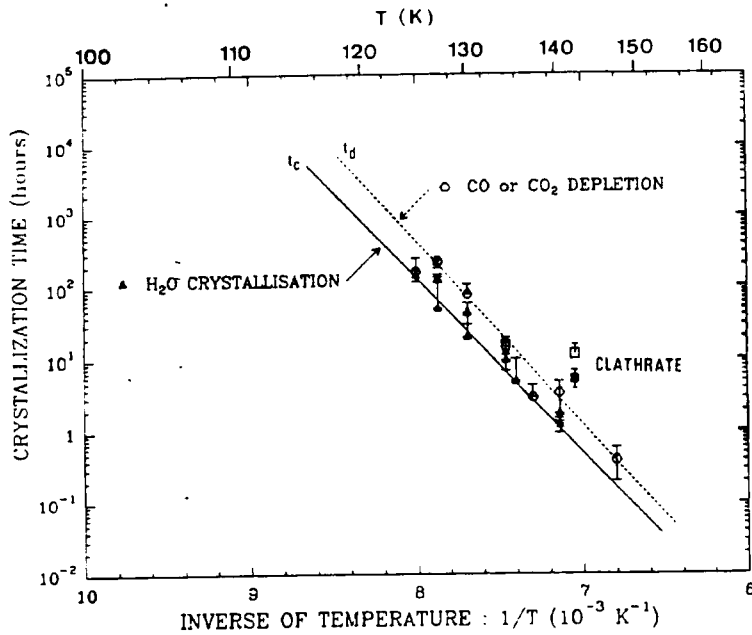


Figure 6.3 :

Temps de cristallisation de la glace H₂O amorphe et temps de disparition de CO et CO₂ en fonction de la température pour les mélanges de glaces CO:H₂O et CO₂:H₂O.

Par contre, les molécules NH₃ restent piégées durant la cristallisation de H₂O à cause de leur tendance à former des hydrates moléculaires (fortes liaisons hydrogène).

Dans une comète dont la phase volatile est composée d'un mélange moléculaire avec H₂O comme constituant majeur (> 60%), l'évaporation des molécules volatiles (CO, CO₂, CH₄, N₂, ...) dans la porosité du noyau aura lieu en plusieurs étapes en fonction de la température. Les molécules les moins volatiles (NH₃, parents de C₂, C₃, ...) piégées dans les grains de glace seront libérées à la surface du noyau lors de l'évapo-

ration de H₂O. Les productions de gaz comparées à H₂O dépendent donc fortement de l'abondance et de la volatilité des molécules.

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 10⁶ ans de la diffusion de CO et CO₂ dans la glace permet d'affirmer qu'indépendamment des évolutions qu'elles ont pu subir, les comètes libérant du CO ou du CO₂ contiennent de la glace H₂O amorphe et qu'elles se sont formées à des températures inférieures à 85-95 K. Si, de plus, le rapport

CO/H₂O dépasse 10% la comète a dû se former à des températures inférieures à 25 K.

b) Formation et existence de clathrates dans les comètes

L'existence de clathrates hydrates au sein du noyau est subordonnée à leur formation et leur stabilité. Nous avons donc entrepris l'étude expérimentale des différents modes de formation et de décomposition de clathrate hydrate à basse température et obtenu les résultats suivants :

- Dans la gamme des températures probables de formation des comètes ($T < 125$ K), la condensation simultanée de CO ou CO₂ avec H₂O ne forme pas de structure clathrate. Lors de la cristallisation de la glace H₂O vers 125 K la disparition rapide de CO ainsi que la pression de gaz élevée ($P_c > 200$ mbar) nécessaire à la stabilité de son clathrate excluent toute possibilité de formation et d'existence dans les comètes.
- Pour CO₂, du fait d'une pression de dissociation plus faible ($P_c < 0,1$ mbar à 125 K), une formation de clathrate est possible entre 120 K et 150 K, soit par cristallisation, soit par interaction entre du CO₂ évaporé dans la porosité du noyau et la glace (à la condition que la pression de CO₂ soit supérieure à la pression de dissociation de son clathrate). La vitesse de formation dépend alors 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 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 et participé 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 mm) 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/m².

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 ¹⁸O/¹⁶O et D/H effectuées par Stichler de l'Institut d'Hydrologie du "Gesellschaft für 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.

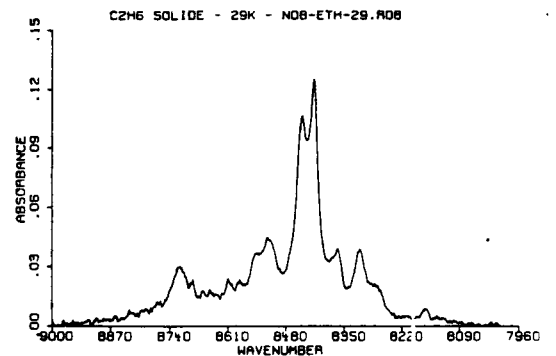
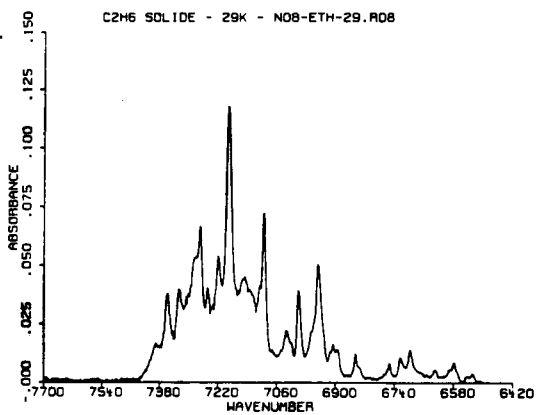
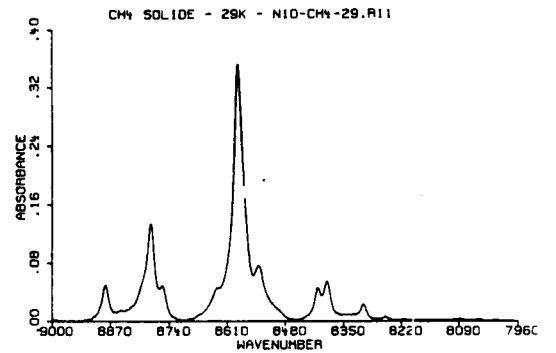
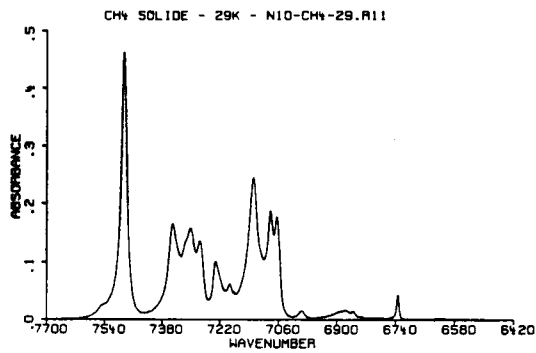
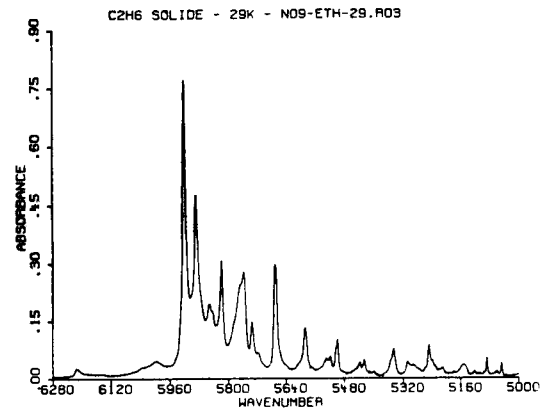
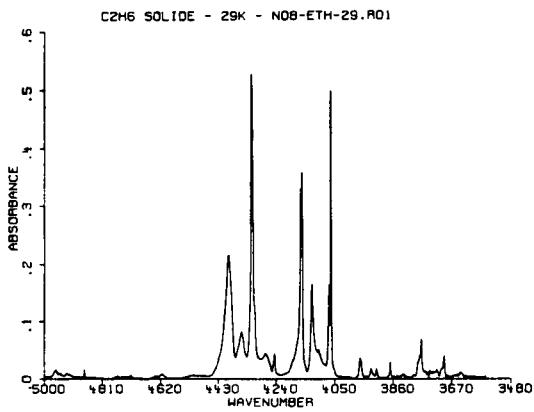
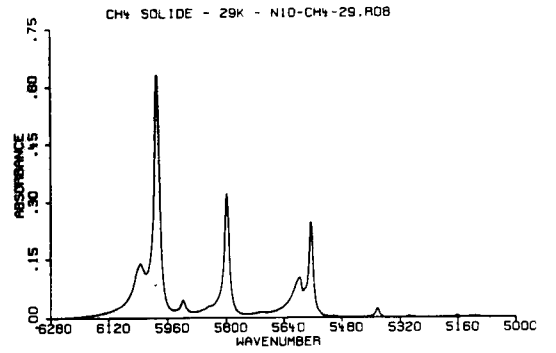
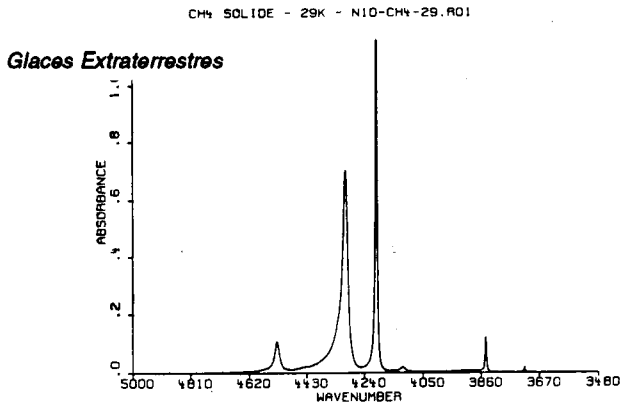


Figure 6.4 :
Spectres infrarouge proche du méthane et de l'éthane pur à l'état solide (30 k)

II.2 - NATURE ET COMPOSITION DES SURFACES DE TRITON ET TITAN

(B. Schmitt, R. Calvier, E. Quirico, J. Klinger)

[Collaborations : A. Oehler, D.L.R. Oberpfaffenhoffen, RFA, C. de Bergh, E. Lellouch, A. Coustenis, D. Gautier, DESPA, Obs. de Meudon]

D'intéressantes similarités existent entre Titan et Triton en premier lieu au niveau de la composition de leur atmosphère (azote, méthane principalement). Il en est probablement de même pour la photochimie qui s'y développe et pour les produits formés (C_2H_6 , ...). La comparaison de la composition du sol, de l'atmosphère et du stade d'évolution de ces différents corps sera certainement très riche d'enseignements pour la compréhension de leurs conditions de formation dans la nébuleuse primitive d'une part, et des processus d'évolution et de différenciation qui les ont affectés.

II.2.1 - Spectroscopie proche infrarouge de glaces et de leurs mélanges

Depuis l'installation de notre spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (Nicolet 800) et de sa première cellule optique cryogénique en décembre 1990 nous avons commencé un programme de mesures dans l'infrarouge proche. L'objectif est de constituer une banque de données (0,8 - 5,5 μm) sur les signatures spectrales et les propriétés optiques (coefficients d'absorption, indices de réfraction) des molécules pouvant exister en phase solide ou liquide à la surface des planètes et satellites.

Les différentes molécules dont les spectres proche IR ont été obtenus et dont l'analyse est en cours sont: N_2 , CO_2 et CO , CH_4 , C_2H_6 , et C_2H_4 solide (Figure 6.4).

Des expériences spécifiques visant à l'interprétation des observations astronomiques de Triton ont, par ailleurs, été effectuées. Nous avons, en particulier, étudié l'influence de la concentration de méthane (10%, 1%, 0,25%) dans N_2 sur les spectres de mélanges $N_2:CH_4$. Les résultats montrent la disparition progressive de certaines bandes du

méthane, des décalages et des changements d'intensité parfois très importants d'autres bandes. Nous avons aussi étudié cet effet sur C_2H_6 et C_2H_4 dilués à 1% dans N_2 . Une étude spécifique de l'influence des mélanges sur le second harmonique de l'azote solide est en cours.

II.2.2 - Etude de la composition et de l'évolution de la surface de TRITON

II.2.2.1 - MODELISATION DU BILAN RADIATIF D'UNE SURFACE DE GLACE

La présence à la surface de Triton de molécules volatiles en équilibre dynamique avec son atmosphère et la forte variation de la latitude du point subsolaire ($\pm 52^\circ$) au cours d'un cycle saisonnier assez complexe en font un corps certainement soumis à d'importants transports de volatils. Triton est donc un satellite dont les échanges surface-atmosphère sont extrêmement intéressants à étudier.

Une première phase d'analyse des phénomènes à modéliser (bilans radiatif et thermique, bilan et transport de matière) et d'étude des paramètres physiques nécessaires à cette modélisation a été faite. Un premier modèle numérique de transfert radiatif dans une surface de glace ou de neige a aussi été développé. Il s'est avéré qu'une modélisation détaillée de ces phénomènes nécessitait la connaissance de plusieurs paramètres physiques (propriétés optiques et thermodynamiques) actuellement très mal connus pour l'azote et le méthane aux basses températures régnant à la surface de Triton. Un certain nombre de mesures de laboratoire sont donc nécessaires préalablement au développement de ce modèle.

II.2.2.2 - VITESSES D'EVAPORATION ET COEFFICIENTS DE CONDENSATION DE N_2 ET CH_4 SOLIDE.

Les vitesses d'évaporation et de condensation sont parmi les principales propriétés indispensables à la modélisation des échanges entre surface et atmosphère. Nous avons entrepris la mise au point d'une méthode de mesure par interférence laser (He-Ne) sur des couches minces et la réalisation de

mesures préliminaires des vitesses d'évaporation de la glace d'azote autour de 33 K et de la glace de méthane autour de 45 K. A partir des vitesses maximales d'évaporation tirées des pressions de saturation nous avons déterminé une valeur de 0.1 ± 0.03 pour le coefficient de collage α (ou de condensation) de N_2 sur N_2 solide (Figure 6.5).

Pour le méthane les vitesses mesurées donnent des valeurs de α comprises entre 1.5 et 3. Une explication possible de ce résultat serait que l'extrapolation des pressions de saturation de CH_4 conduit à des valeurs sous-estimées d'un facteur ~ 20 vers 45 K.

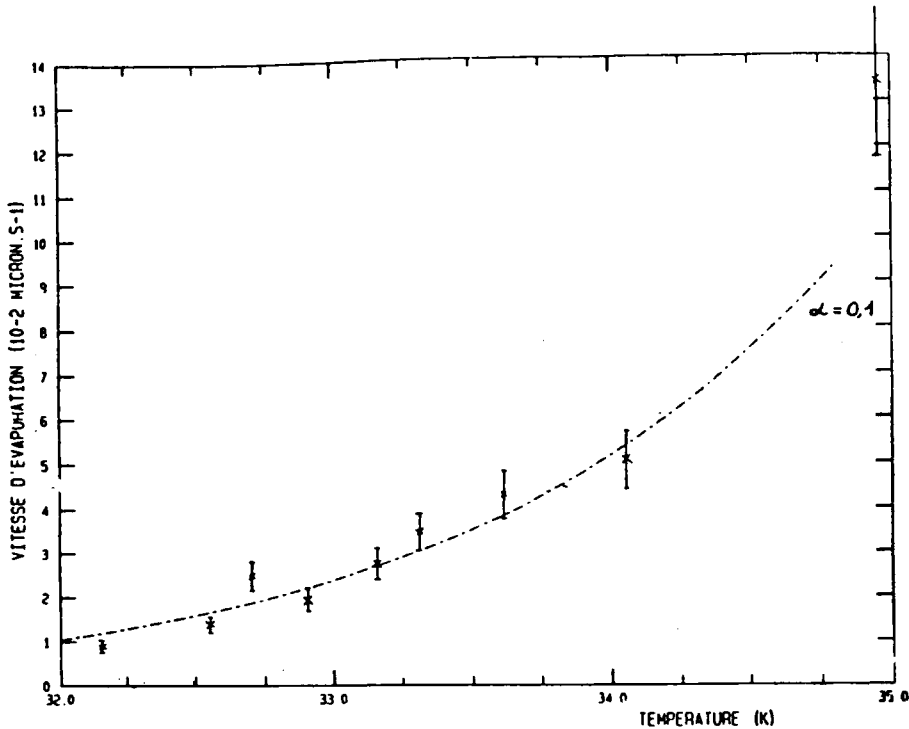


Figure 6.5 :

Vitesses d'évaporation de l'azote solide comparées aux vitesses théoriques pour un coefficient de condensation α de 0,1.

II.2.2.3 - ANALYSE DU SPECTRE PROCHE INFRAROUGE DE TRITON.

[Collaborations : A. Oehler, D.L.R. Oberpfaffenhoffen, RFA, C. de Bergh, DESPA, Observatoire de Meudon]

Dans le but de déduire des informations sur la surface de Triton (composition, taille des grains, ...) à partir des observations spectroscopiques, nous avons effectué en juin 1989 les premières mesures des spectres infrarouge proche (1.6 - 2.5 μm) de l'azote solide, de mélanges azote-méthane et de quelques autres mélanges contenant H_2O et CO_2 . Le premier harmonique de la vibration fondamentale de

l'azote à l'état solide est observé à 2.147 μm . Le coefficient d'absorption au centre de la bande et l'intensité intégrée de la bande ont été estimés. Dans le cas d'un mélange $CH_4:N_2 = 1:1$ les positions et les intensités relatives des dix sous-structures des "bandes à 1.7 μm et 2.3 μm " ont été déterminées. Le coefficient d'absorption a été estimé au centre de la principale sous-bande à 2.323 μm .

Nous avons réanalysé les observations de Cruikshank et al. (1989) à partir de ces mesures. A la surface de Triton la taille des grains nécessaire pour reproduire l'intensité de la bande de l'azote est probablement située entre 100 et 500 μm .

Les intensités des bandes du méthane dans la gamme 1.6-2.5 μm peuvent être correctement reproduites si le méthane est dilué dans des grains de 100 à 500 μm d'azote solide à une concentration estimée entre 0.05% et 0.5%. Le décalage de 25-35 cm^{-1} , par rapport aux positions du méthane solide, de trois des bandes du méthane observées sur Triton pourrait être une indication indépendante de la forte dilution de CH_4 dans N_2 . Le rapport de l'ordre de 10^3 entre abondances de l'azote et du méthane pourrait s'expliquer par un processus de distillation de la couche de surface induit par le transport saisonnier des volatiles à la surface de Triton.

Depuis plusieurs mois nous travaillons avec C. De Bergh (Obs. Meudon) sur un spectre de Triton (CFH:juillet 1990) à plus haute résolution (25 cm^{-1}). Des spectres de N_2 , CH_4 , C_2H_6 et C_2H_4 solide ainsi que de différents mélanges avec N_2 ont été mesurés en laboratoire (II.2.1). L'interprétation du spectre de Triton à l'aide de tels spectres de laboratoire devrait permettre de préciser la nature et l'abondance de l'azote, du méthane et de quelques autres composés à la surface de Triton à partir de la position et de la forme des bandes d'absorption.

II.2.3 - Etude de la surface et des nuages de TITAN

II.2.3.1 - SIMULATION DU SPECTRE PROCHE-IR DE LA SURFACE DE TITAN DEFINITION DE L'INSTRUMENT "DISR" [Collaborations : E. Lellouch, A. Coustenis (Observatoire de Meudon), M.G. Tomasko, P. Smith (LPL, Univ. of Arizona)]

La préparation de la mission Cassini-Huygens d'exploration de l'atmosphère et de la surface de Titan nécessite une connaissance des propriétés spectroscopiques des différents constituants susceptibles d'y être présents sous forme condensée.

Nous avons effectué des simulations numériques de spectres de différents types de surfaces liquides et solides afin d'optimiser la définition de la gamme spectrale et de la résolution ainsi que la stratégie

d'observation des spectromètres infrarouge de l'instrument DISR qui sera embarqué à bord de la sonde Huygens.

Un des buts de ces spectromètres serait l'acquisition de spectres de la surface de Titan au cours des 100 derniers mètres de sa descente. Nous avons analysé tout particulièrement la possibilité de remonter à la composition des mélanges à partir de l'analyse détaillée de la forme et de la position des bandes d'absorption.

Pour compléter ce travail de préparation de l'instrument DISR nous participons à un programme d'observation de Titan (IRTF : juillet 1990, CFH : juin 1991) dans certaines fenêtres de son atmosphère qui pourraient révéler des informations spectroscopiques sur ses nuages et sa surface.

II.2.3.2 - PIEGEAGE DE CO PAR LES NUAGES DE METHANE DE TITAN.

Un dernier aspect de notre programme sur Titan concerne l'étude des propriétés thermodynamiques des composants de ses nuages (CH_4 , N_2) et leurs interactions avec les composants de l'atmosphère (CO en particulier). Des résultats viennent d'être obtenus sur le piégeage de CO par des nuages de méthane solide. A 77 K la concentration de CO piégé dans CH_4 solide est égale à 0,31 fois la pression réduite de CO (P/P_g). Ces résultats pourraient fournir un mécanisme permettant d'interpréter la forte différence de rapport de mélange de CO dans la troposphère et la stratosphère. Ces données sont en cours d'intégration dans un modèle de microphysique des précipitations sur Titan.

II.3 - SPECTROSCOPIE ET PHYSICO-CHIMIE DES GRAINS INTERSTELLAIRES

(B. Schmitt, S. de la Chapelle, J. Klinger)
[Collaboration avec le laboratoire du Prof. J.M. Greenberg, Leiden, NL, A. Omont (IAP), T. Forveille (Observatoire de Grenoble)]

II.3.1 - Evolution de grains $\text{CO:H}_2\text{O}$ - Mécanismes d'éjection de H_2O .

L'évolution de la composition d'un grain interstellaire

composé principalement de CO et de H₂O 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, ...).

Pour des vitesses lentes de réchauffement (< 5 K/min) la proportion de CO décroît entre 25 K et 35 K vers 7 à 10% et ceci sans évaporation de H₂O. Par contre, l'évaporation de CO produite par un réchauffement rapide (> 50 K/min) conduit à l'éjection d'une fraction de H₂O du manteau de glaces. Cette importante éjection de H₂O met en évidence un mécanisme capable de réinjecter efficacement des molécules peu volatiles en phase gazeuse sans source d'énergie interne.

Nous avons, en outre, mesuré les vitesses d'évaporation sous vide de la glace H₂O entre 175 et 182 K et déterminé une valeur du coefficient de condensation de H₂O sur la glace H₂O cristalline de $1,0 \pm 0,3$.

II.3.2 - Spectroscopie infrarouge des glaces interstellaires.

Les constantes optiques des molécules simples à l'état solide constituent une des données de base pour l'identification des espèces responsables des absorptions infrarouge du milieu interstellaire et pour le calcul de leurs abondances. Leur détermination

expérimentale ainsi que l'analyse de la forme, de la position et de l'intensité des bandes d'absorption en fonction de la température et de l'état physique et chimique de la glace doivent fournir les moyens de remonter à l'histoire thermique et physico-chimique des manteaux moléculaires des grains interstellaires.

II.3.2.1 - SPECTROSCOPIE IR MOYEN DES MELANGES RICHES EN H₂O

Nos résultats concernant les mélanges CO:H₂O, CO₂:H₂O et CH₄:H₂O ont montré que la forme et la position des bandes infrarouges de H₂O (3,1 μm, 6,0 μm et 12 μm), de CO (4,68 μm) et de CO₂ (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, la présence d'une seconde bande satellite à 4,647 μm, attribuée à un complexe CO-H₂O, a été mise en évidence pour CO. Cette bande est particulièrement sensible à la température de condensation et disparaît totalement vers 100K (Figure 6.6).

Un changement réversible de l'intensité des bandes d'absorption en fonction de la température a été observé pour CO, CO₂ et CH₄ piégés dans une matrice de glace H₂O amorphe. Pour CO et CH₄ une réduction d'un facteur 1,7 est atteinte entre 10 et 100K. Pour CO₂ l'effet est beaucoup moins marqué.

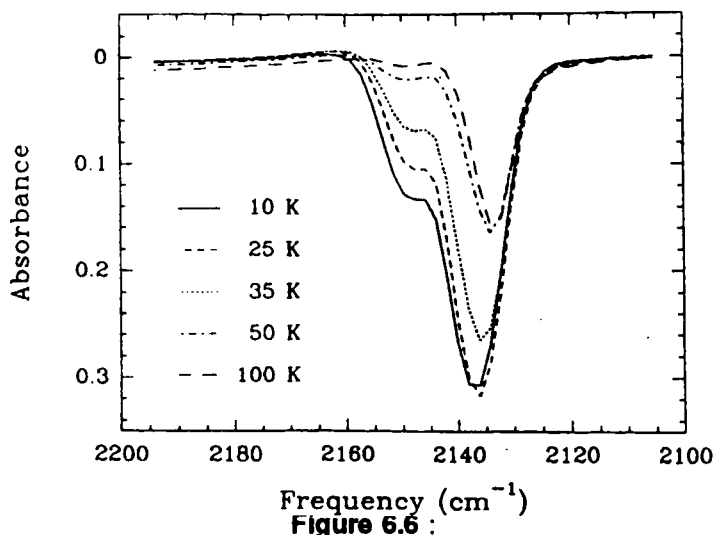


Figure 6.6 : Evolution de la forme et de la position de la bande d'absorption infrarouge de CO à 4,68 μm en fonction de la température pour un mélange de glace CO:H₂O

II.3.2.2 - SPECTROSCOPIE INFRAROUGE LOINTAIN DE LA GLACE H₂O

Nous avons initié un programme d'étude des propriétés spectroscopiques des glaces dans l'infrarouge lointain par l'étude des différents effets de la température et de l'histoire thermique sur les spectres de la glace H₂O pure. Nos résultats mettent en évidence plusieurs effets irréversibles sur la position, la forme et l'intensité des bandes vers 45 et 66 μm lors du recuit à plus haute température d'échantillons de glace amorphe condensée à basse température (30 K). Nous avons aussi observé des variations réversibles dans les divers paramètres des bandes. Ces divers effets ont été quantifiés en fonction de la température maximale subie (histoire thermique) et de la température effective de la glace.

II.3.3 - 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 sont réalisées à partir de l'analyse des spectres infrarouges après différentes durées d'irradiation.

II.3.3.1 - GRAINS RICHES EN NH₃

L'utilisation de traceurs isotopiques (D, ¹⁸O et ¹⁵N) dans les mélanges H₂O/NH₃, CO/NH₃ et O₂/NH₃ et l'analyse détaillée de la région 5-8 μm de leurs spectres IR après photolyse ont permis de déterminer que le groupement -NH₄⁺ 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⁻, NO₂⁻ et NO₃⁻) identifiés dans les mélanges photolysés en laboratoire suggère leur observabilité dans les spectres interstellaires.

II.3.3.2 - GLACE CH₄ PURE

La photolyse de CH₄ synthétise essentiellement C₂H₆ 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 H₂. Le résidu organique obtenu après chauffage à 150K reproduit assez bien l'absorption vers 3,4 μm observée en direction du centre galactique.

II.3.3.3 - GRAINS RICHES EN H₂O.

La prépondérance de H₂O sur les grains donne à la chimie des glaces riches en H₂O un intérêt particulier. Les mélanges binaires de H₂O avec CH₄, NH₃ et CO₂ ont fait l'objet d'une première étude en fonction de la composition.

II.4 - THERMODYNAMIQUE ET CHIMIE HETEROGENE D'AEROSOLS

(F. Dominé, B. Schmitt, J. Klinger)

Ce programme a démarré début 1991. Il a pour but d'explorer les conditions de formation des nuages stratosphériques polaires (PSC) et les réactions chimiques à la surface ou à l'intérieur des particules qui les composent. Certaines de ces réactions sont responsables de la disparition saisonnière de l'ozone aux pôles, car elles transforment les formes inactives du chlore (HCl et ClONO₂) en formes actives (Cl₂ et HOCl) dans la destruction de l'ozone.

La première étape de ce programme est de mesurer la vitesse de diffusion et la solubilité de HCl dans la glace et le trihydrate d'acide nitrique mono et polycristallins. A cette fin la construction d'appareils de croissance de monocristaux de type "Bridgeman" et "fusion de zone", la réalisation d'une cellule de diffusion avec système de mélange de gaz et la conception d'un tour, destiné à découper de fines tranches de glace dans les cristaux où l'on a fait diffuser HCl sont en cours au laboratoire.

III - COLLABORATIONS ET CONTRATS

Collaborations Nationales

- . Département de Recherches Spatiales (DESPA), Observatoire de Meudon (C. de Bergh, E. Lellouch, A. Coustenis, D. Gautier)
- . Observatoire de Grenoble (T. Forveille)
- . Institut d'Astrophysique de Paris (J.P. Maillard, A. Omont)
- . Département de Radioastronomie Décimétrique (DERAD), Observatoire de Meudon (J. Crovisier)
- . Centre de Recherche sur la chimie de la combustion, Orléans (J.C. Petit)

Collaborations internationales

- . D.L.R., Remote Sensing Section, Oberpfaffenhoffen, RFA (A. Oehler)
- . Laboratoire d'Astrophysique Expérimentale Leiden, Pays-Bas (R.J.A. Grim, J.M. Greenberg)
- . Lunar and Planetary Laboratory, University of Arizona, Tucson, USA (M.G. Tomasko, P. Smith)

- . Department of Earth and Space Sciences SUNY, Stony Brook, USA (C. Griffith)
- . Institut für Kernphysik, Heidelberg (F. Arnold, E. Grün)
- . Institut für Planetologie, Universität Münster (F. Spohn)
- . KFA Jülich, Institut für Chemie I (K. Roessler)
- . Dept. of Chemistry, Univ. of Cambridge (D.C. Clary)

Contrats

- . ATP "Planétologie de l'INSU (1987-1990)
- . Programme National de Planétologie de l'INSU (1991)
- . GdR "Physico-chimie des Molécules Interstellaires" (1987-1991)
- . GdR "ISO - Spectrométrie Infrarouge" (1989)
- . INSU (équipement mi-lourd) (1989-1990)
- . Région Rhône-Alpes (1990)
- . Université Joseph Fourier (Tranche C) (1990)
- . CCE, Programme STEP (1990-1991)
- . Programme Franco allemand Procope

IV - PUBLICATIONS

IV.1 - REVUES A COMITE DE LECTURE

Klinger J., Eich G., Bischoff A., Joo F., Kochan H., Roessler K., Stichler W. and Stöffler D. (1989) "KOSI" Comet simulation experiment at DFVLR : Sample preparation and the evolution of the $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and the D/H ratio in the icy component. *Adv. Space Res.* **9** (3). 123-125.

Spohn T., Benkhoff J., Klinger J., Grün E. and Kochan H. (1989). Thermal Modeling of two KOSI comet nucleus simulation experiments. *Adv. Space Res.* **9** (3). 127-131.

Grün E., Benkhoff J., Fechtig H., Hesselbarth P.,

Klinger J., Kochan H., Kohl H., Krankowsky D., Lämmezahl P., Seboldt W., Spohn T. and Thiel K. (1989). Mechanisms of Dust Emission from the surface of a Cometary Nucleus. *Adv. Space Res.* **9** (3) 133-137.

Kochan H., Feverbacher B., Joo F., Klinger J., Seboldt W., Bischoff A., Düren H., Stöffler D., Spohn T., Fechtig H., Grün E., Kohl H., Krankowsky D., Roessler K., Thiel K., Schwehm G. and Weishaupt V. (1989). Comet Simulation Experiments in the DFVLR Space Simulator. *Adv. Space Res.* **9** (3) 113-122.

- Klinger J. (1991). Near Surface Stratigraphy in Comets Inferred from Observation, Laboratory Studies and Modelling. *Space Science Reviews* 56, 99-104.
- Espinasse S., Klinger J., Ritz C. and Schmitt B. (1991). Modelling of the Thermal Behavior and of the Chemical Differentiation of Cometary Nuclei. *Icarus* (in press).
- IV.2 - COMMUNICATIONS COLLOQUES**
- Schmitt B., Grim R.J.A. and Greenberg J.M. (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., Grim R.J.A. and Greenberg J.M. (1988). Volatile molecules in interstellar grain mantles : Diffusion and infrared band strength. In *"Dust in the Universe"* (Bailey M.E. and Williams D.A., Eds.), pp. 291-296. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Schmitt B., Klinger J., Espinasse S. and Greenberg J.M. (1988). Acquisition de données physico-chimiques pour la modélisation des noyaux cométaires. In *"Comptes rendus des Journées de Planétologie"*, (Festou M.C. and Chabod D. Eds.), pp. 207-210. Observatoire de Besançon.
- Schmitt B., Espinasse S., Klinger J. and Greenberg J.M. (1988). Effet de la température sur l'évolution et la différenciation chimique des glaces cométaires. In *"Comptes Rendus des Journées de Planétologie"*, (Festou M.C. and Chabod D., Eds.), pp. 203-206. Observatoire de Besançon.
- Espinasse S., Schmitt B. and Klinger J. (1988). Modélisation du comportement thermique et de la différenciation chimique des noyaux de comètes : Résultats préliminaires. In *"Comptes Rendus des Journées de Planétologie"*, Observatoire de Besançon, (Festou M.C. and Chabod D., Eds.), pp. 199-202.
- Schmitt B., Klinger J., Grim R.J.A. and Greenberg J.M. (1988). Physico-chimie des manteaux de glaces des grains interstellaires. In *"Recueil des Journées Scientifiques S.F.S.A."*, Grenoble Univ. (Abstract).
- Klinger J., Benkhoff J., Espinasse S., Grün E., Ip W., Joo F., Keller H.U., Kochan H., Kohl H., Roessler K., Seboldt W., Spohn T. and Thiel K. (1989). In *"Proceedings of the 19th Lunar and Planetary Science Conference"*. pp. 493-497.
- Roessler K., Bischoff A., Heich G., Grün E., Fechtig H., Joo F., Klinger J., Kochan H., Stoffler D. and Thiel K. (1988). Cometary matter in observation and simulation experiments, XIXe *"Lunar and Planetary Science Conference"*, Houston (Texas), 14-18 Mars 1988.
- Fechtig H., Feubacher B., Grün E., Joo F., Klinger J., Kochan H., Krankowski D., Roessler K., Seboldt W., Spohn T., Stoffler D. and Thiel K. (1988). Experimente zur Kometensimulation : Experimenteller Aufbau. Fachsitzung *"Extraterrestrische Physik"*. Versammlung der Deutschen Physikalischer Gesellschaft. Düsseldorf 03.03.1988 (Abstract) 17.
- Benkhoff J., Grün E., Klinger J., Roessler R. and Spohn T. (Ibid) (1988). Experimente zur Kometensimulation : Thermische Modelle zur Evolution des Probenkörpers, 17-18.
- Grün E., Klinger J., Joo F., Kochan H., Kohl H., Seboldt W. and Thiel K. (Ibid) (1988). Experimente zur Kometensimulation : Mechanismen der Staubemission, 19.
- Kochan H., Bischoff A., Fechtig H., Feuerbacher B., Grün E., Joo F., Klinger J., Kohl H., Roessler K., Seboldt W., Thiel K., Krankowsky D., Schwehm G. and Weishaupt U. (1989). Laboratory simulation of a cometary nucleus : Experimental setup and first results. In *"Proceedings of the 19th Lunar and Planetary Science Conference"*, pp. 487-492.
- Klinger J. (1990). Cometary Ices and Nucleus Modelling. (Invited Paper) Rosetta Workshop :

Presentation of a joint ESA-NASA study of the Comet Nucleus Sample Return (CNSR) Mission, Granada, Spain, January 29-31, 1990.

Klinger J. (1991). Physical Properties of Frozen Volatiles. Their Relevance to the Study of Comet Nuclei. In : "Comets in the Post-Halley Era" (Newburn et al. eds) Vol. I, pp. 227-241.

Grün E., Bar-Nun A., Benkhoff J., Bischoff A., Dürer H., Hellmann H., Hesselbarth P., Hsiung P., Keller H.V., Klinger J., Knöfker J., Kochan H., Kohl H., Kölzer G., Krankowsky D., Lämmerzahl P., Mauersberger K., Neukum G., Oehler A., Ratke L., Roessler K., Schwehm G., Spohn T., Stöffler D. and Thiel K. (1991). Laboratory Simulation of Cometary Processes : Results from First KOSI Experiments. In : "Comets in the Post-Halley Era", (Newburn et al. eds.) Vol. I, pp. 277-297.

Klinger J. (1991). What do we know about the icy component of comets. (Invited Paper), "EGS XVI, General Assembly", Wiesbaden, 22-26 April 1991, PS 11.

Roessler K., Foestel H., Klinger J. and Trimbom P. (1991). Natural Isotope Ratios in the Interior of Thermal Processed Cometary Analogs (KOSI), *ibid* PS7.

IV.3 - AUTRES PUBLICATIONS

Schmitt B., Grim, R.J.A., Greenberg, J.M. (1988). Variation avec la température de l'absorbance moléculaire et de la forme des bandes d'absorption des glaces. *Journal des Astronomes Français*, 32, p. 24.

IV.4 - THESES

Espinasse, S. (1989) Modélisation du comportement thermique et de la différenciation chimique des noyaux de comètes. *Thèse de Doctorat U.J.F, Grenoble 1*, mention : Mécanique, 223 p.

+°+°+

CHAPITRE 7 :

GLACIERS ALPINS

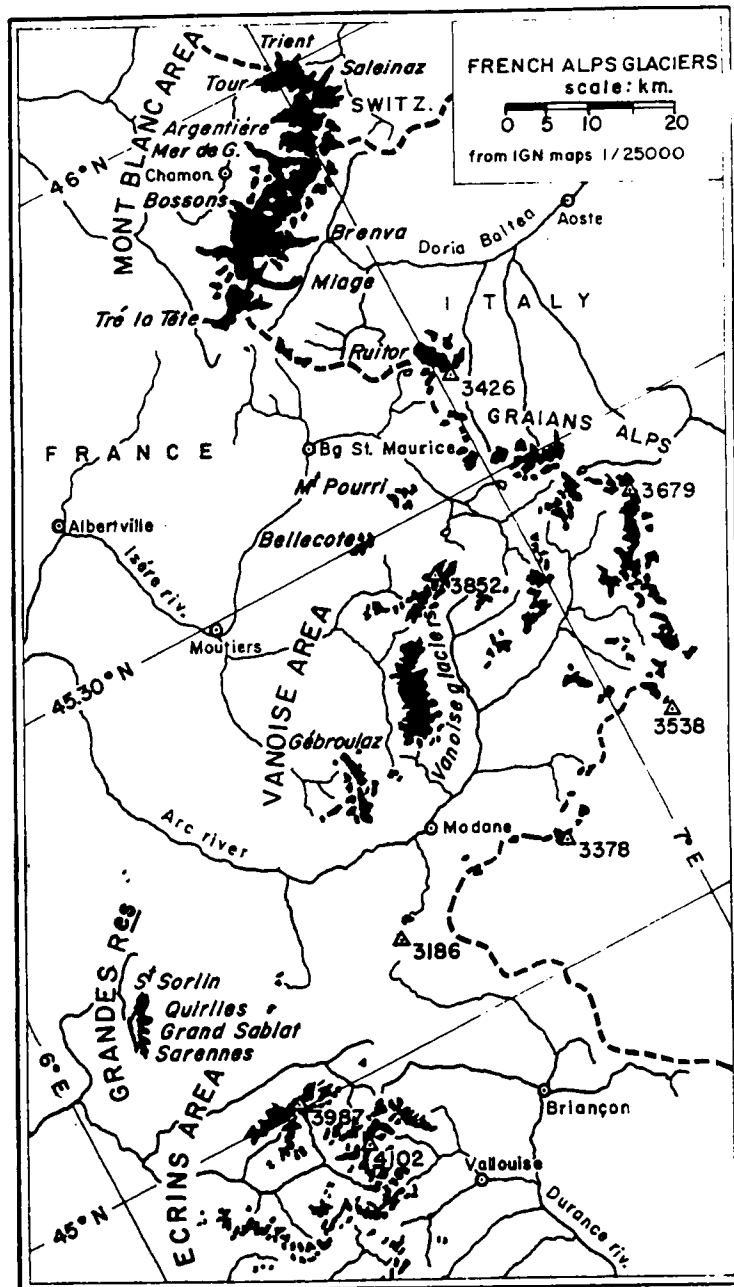


Figure 7.1 :

Sur les 400 km² de surface englacée des Alpes Françaises, répartie en 4 massifs principaux, une dizaine de glaciers font l'objet d'un suivi annuel systématique concernant les variations de longueur, altitude, vitesse et bilan de masse. Principalement choisis d'après leurs caractéristiques particulières, telles qu'ancienneté des séries de mesures ou les facilités d'accès, on développe sur ces glaciers des programmes d'étude en fonction de leur morphologie spécifique qui se prête mieux à la mesure de certains paramètres de fluctuation. D'autre part, ces dix glaciers font partie du suivi photogrammétrique triennal, régulièrement effectué par le CEMAGREF.

I - OBJECTIFS GENERAUX

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 de longues séries 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 une ou deux décennies par le Laboratoire (Mer de Glace, St Sorlin),
- prenant le relais d'organismes (EDF, Cie du Montanvers) 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 7.1 et 7.2.*,
- collaborant aux mesures d'autres organismes assurant le suivi glaciaire (CEMAGREF et EDF

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 7.3)*, ainsi qu'à la distribution du bilan d'accumulation à haute altitude.

- 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.

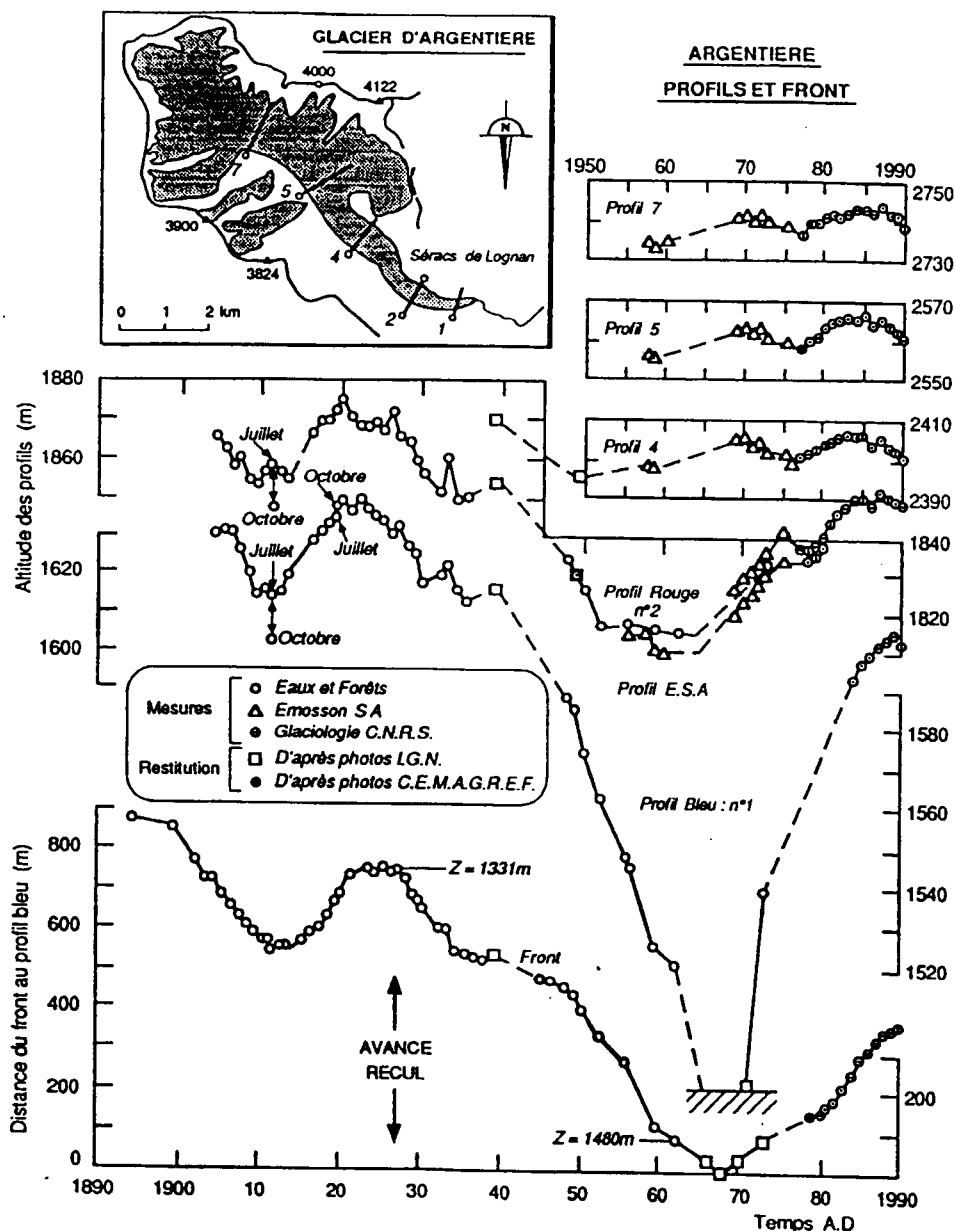


Figure 7.2 :

Le glacier d'Argentière (Massif du Mont Blanc) est un des glaciers qui a été suivi par les Eaux et Forêts depuis le début du siècle jusqu'en 1965 pour ses fluctuations de longueur et d'altitude sur la langue inférieure. A cette description sont venus s'ajouter à partir de 1958, les 3 profils sur la partie supérieure pour suivre les fluctuations du glacier au-dessus de la capture EDF du torrent sous-glaciaire (Mesures effectuées depuis 1975 par le LGGE pour le compte d'Electricité d'Emosson S.A.). Cet ensemble de mesures est exceptionnel car il révèle un comportement dynamique totalement inédit lors d'une crue glaciaire comme celle qui se développe depuis 1970. Alors que les profils supérieurs ne varient que de 5 à 10 mètres, l'ensemble de la langue inférieure s'est réhaussé de 40 à 160 mètres. En fait l'apport de glace responsable de cette élévation est dû à une augmentation très 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 régulier de telles fluctuations doit permettre de dégager les mécanismes fondamentaux responsables de l'ajustement de la dynamique aux variations d'alimentation. Du point de vue pratique de la prévision du passage d'un état de crue à celui de décrue, (nécessaire à l'estimation du trajet de l'eau) il apparaît que les vitesses caractérisent mieux l'état global du glacier que les fluctuations de niveau : on dispose donc d'un précurseur.

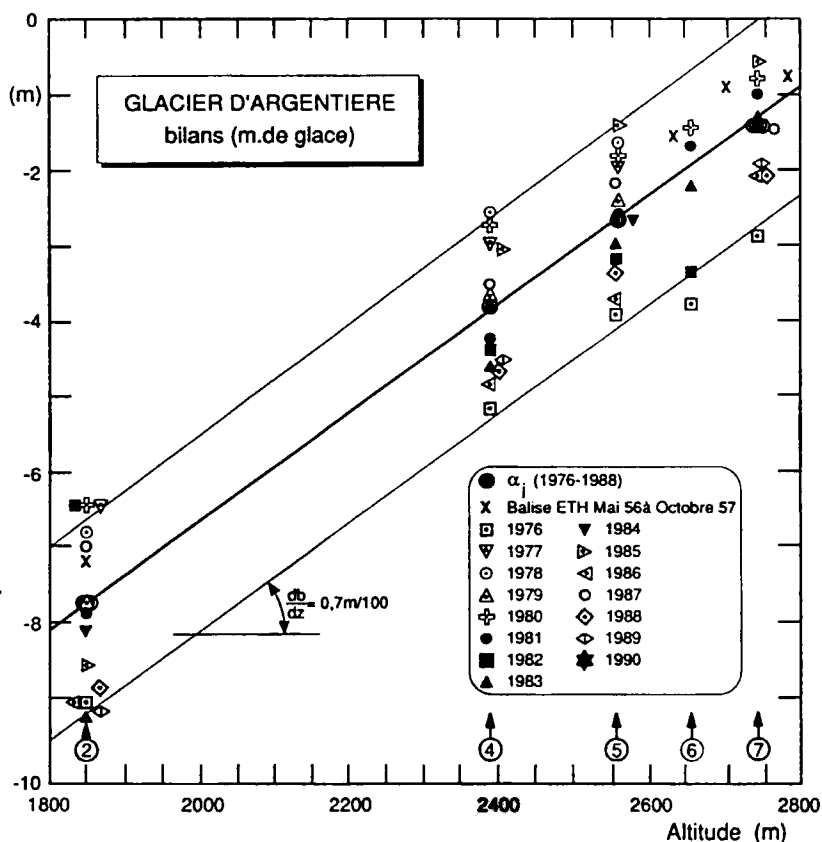


Figure 7.3 :

Les valeurs annuelles de bilan recueillies aux 5 profils transversaux du glacier d'Argentière, répartis sur 900 mètres d'altitude, servent de test à l'application du modèle linéaire des variations des bilans (sous une forme simplifiée dérivée de Lliboutry, 1974). Ces fluctuations annuelles pour la période 1976-1988 peuvent être comparées favorablement aux variations des autres glaciers de la chaîne des Alpes.

II - RESULTATS MAJEURS OBTENUS AU COURS DES QUATRE DERNIERES ANNEES

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

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

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) 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.

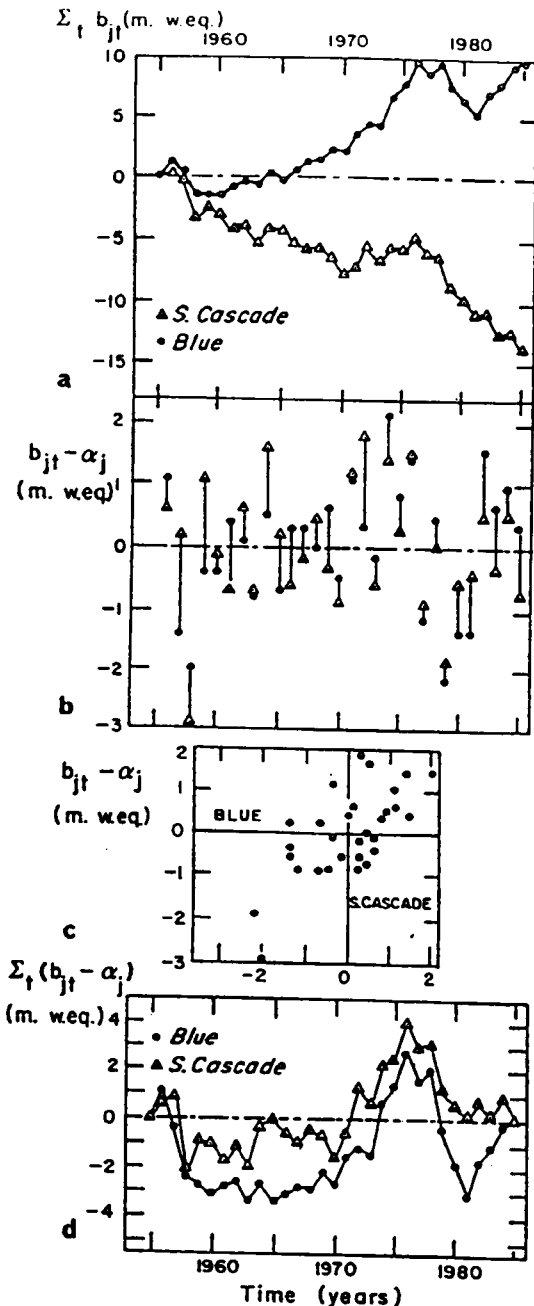


Figure 7.4 :

Les glaciers Blue et South Cascades situés dans l'ouest des Etats-Unis (Latitude 50° N) présentent la plus longue série de mesures des bilans de masse du continent américain (30 ans). Ils constituent une très bonne illustration de l'application du modèle linéaire de variation du bilan étendu à la comparaison de 2 glaciers. En effet, alors que leurs évolutions sont opposées, les variations, elles, sont très bien corrélées ($R = 0.69$) et permettent de dégager un signal de variations commun sur l'ensemble du même massif (environ 500 km). (Letréguilly-Reynaud. *J. of Glaciology*).

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 7.5), mais le comportement des glaciers européens est totalement différent de celui obtenu en Amérique du Nord. (Arctic and Alpine Research, 1990).

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.S. (World Glacier Monitoring Service).

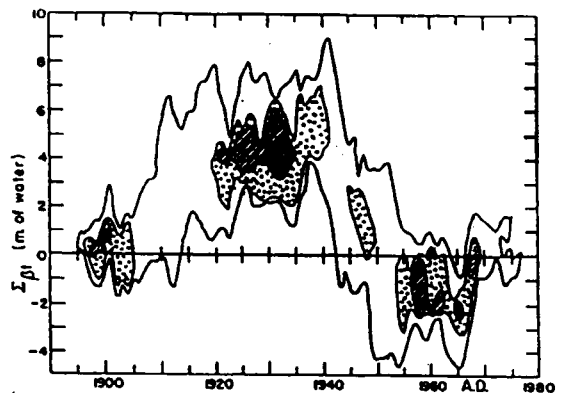


Figure 7.5 :

Les bilans de masse annuels déduits des observations météorologiques semblent, lorsque leur précision peut être estimée, entachés d'une incertitude de l'ordre de 50 cm d'équivalent en eau. Le bruit correspondant, cumulé sur un siècle, peut être considérable et toute comparaison doit en tenir compte, notamment lors de comparaison entre massifs éloignés. Ici, pour quatre glaciers européens (Alpes, Scandinavie, Oural et Caucase) un signal commun significatif apparaît néanmoins : bilans favorables de 1900 à 1925 (environ + 0.16 mètres d'eau par an, par rapport à la moyenne 1890-1975), bilans défavorables de 1935 à 1960 (environ - 0.24 mètres d'eau par an) puis des bilans à nouveau favorables depuis 1965.

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

Les projets ATP "Téledétection 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 les cycles 1986-87, 1987-88 et 1988-89, les résultats obtenus sont conformes à la vérité terrain.

Cependant, il apparaît de sévères limitations dans l'obtention d'images utilisables sur de vastes espaces à la bonne époque en fonction des passages de 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 S.A.

II.2 - 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 4 exemplaires sont commercialisés en 1991).

II.2.1 - Mesures de vitesse sur le lit

(L. Reynaud, C. Rado et 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 déterminations 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 : pression de l'eau à l'interface glace-rocher et inclinométrie de la couche basale à forte déformation.

II.2.2 - 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'extention des cavités jusqu'à 100 mètres 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. En Août 1991, L. Reynaud, invité 15 jours au Groenland, va participer à l'exploration de quelques grands moulins sur la calotte, à une centaine de kilomètres de Sondrestromfjord.

II.2.3 - 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 apparaît 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,
- 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 est 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. C'est à ce sujet important que l'on envisage de se consacrer plus particulièrement dans les années à venir.

II.3 - APPLICATIONS PRATIQUES

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

Les glaciers des Alpes sont sources d'eau, domaine de loisirs (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. En ce qui concerne les 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, l'évaluation de stock de névé, il conseille quelques stations de ski sur glacier.

Ce type d'activité de conseil est en train de se développer fortement du fait des avancées récentes des glaciers (ou même de leur fort recul actuel) 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.4 - LA LOGISTIQUE ALPINE - LES REFUGES

(L. Reynaud et 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 détériorations ou d'en améliorer le fonctionnement (maintenance hors gel, chambres froides, ...).

Un partage des facilités offertes par l'Observatoire

Vallot (4.300 mètres) 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 et plus confortablement aménagé (isolation, espace, sécurité).

Le nouveau Refuge des Cosmiques nous permet désormais de disposer d'un local à proximité du Col du Midi (3.660 mètres). En plus de l'équipe glacier, deux autres équipes : Chimie et Télédétection vont débiter des campagnes de mesures sur ce site.

II.5 - MODÉLISATION DES GLACIERS ALPINS

(J.P. Benoist, M. Vallon, C. Ritz)

Dans le cadre des études entreprises pour le stockage des déchets nucléaires à longue durée de vie, le CEA a demandé au LGGE d'établir un modèle du glacier de piémont susceptible de s'étendre sur la Bresse lors des grandes glaciations et de prévoir quelle pourrait être son extension maximum. Pour établir ce modèle, il est nécessaire de connaître l'ordre de grandeur des débits de glace fournis par les glaciers des Alpes du Nord.

M. Vallon et J.P. Benoist ont entrepris la reconstitution des bilans et les débits de glace à l'intérieur des Alpes du Nord. Le travail a été divisé en deux parties :

- la reconstitution des bilans
- la reconstitution de l'hypsographie.

II.5.1 - Reconstitution des bilans

Pour reconstruire les bilans de masse glaciaire dans le passé ou leur estimation dans un futur plus ou moins lointain, nous avons estimé que les paléoclimatologues ou les futurologues ne pourraient vraisemblablement disposer que de données climatiques assez frustrées comme la valeur des températures et des précipitations et que les bilans de masse glaciaire basés sur les échanges d'énergie étaient par trop gourmands en données pour être pratiquement utilisables.

Nous proposons donc de calculer les bilans dans un massif montagneux avec pour seules données les températures et les précipitations mensuelles au pied du massif, les gradients thermiques et pluviométriques ainsi que des relations empiriques

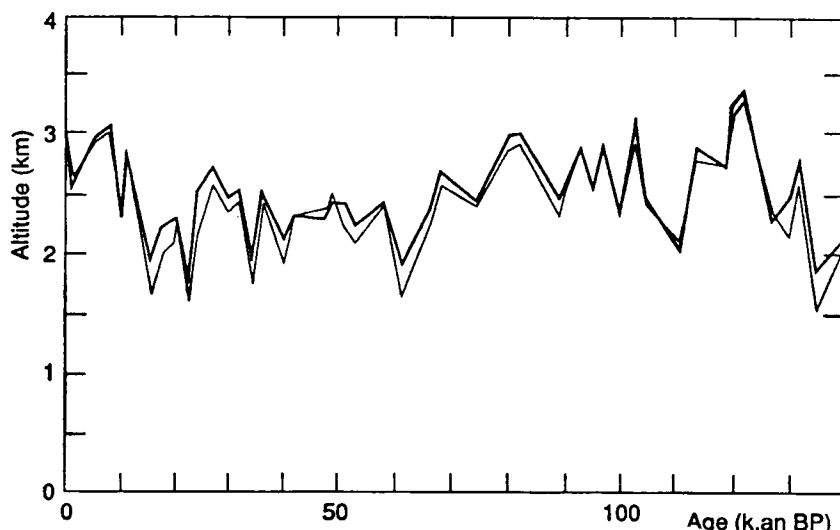


Figure 7.6 :

Bilans de masse calculés à partir des données météorologiques de Lyon, Juneau, Yakutat et Ny Alesund et bilans observés sur différents glaciers des Alpes, de l'Alaska et du Svalbard.

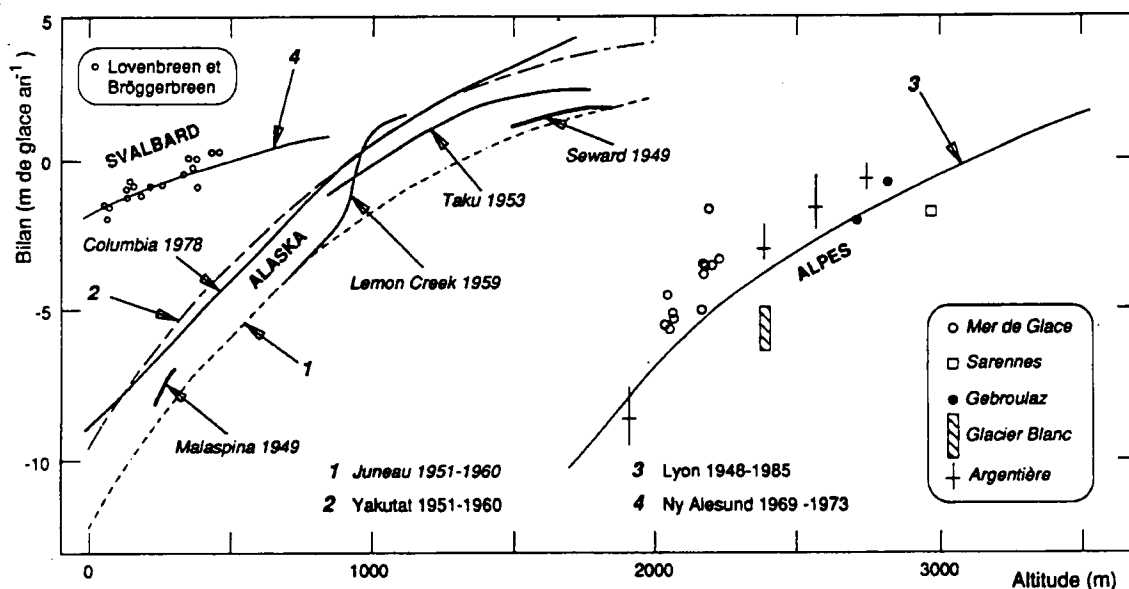


Figure 7.7 :

Fluctuations d'altitude de la ligne d'équilibre dans les Alpes au cours des derniers 150 000 ans. Deux hypothèses ont été adoptées pour le calcul de l'accumulation : gradient constant des précipitations (ligne pointillée) et gradient des précipitations proportionnel aux précipitations en plaine. Les incertitudes de $\pm 2^\circ\text{C}$ sur les températures et ± 200 mm sur les précipitations avancées par Guiot et al. se traduisent par une incertitude de ± 500 m sur l'altitude de la ligne d'équilibre, bien supérieure aux incertitudes provenant d'une mauvaise estimation du gradient des précipitations.

entre température de l'air, ablation de la glace et nature des précipitations.

Utilisant des gradients thermiques et pluviométriques moyens (-7°C et + 0,75 m d'eau par kilomètre), ce modèle rend compte de l'ordre de grandeurs des bilans de masse observés dans des régions aussi différentes que les Alpes, l'Alaska et le Svalbard (Figure 5.6). Appliqué aux reconstructions paléoclimatiques des derniers 150 000 ans déduites des tourbières de l'Ain et des Vosges (Guiot J. et al., *Nature*, 338, 309) cette méthode fournit l'histoire des variations d'altitude de la ligne d'équilibre (Figure 7.7.).

II.5.2 - Hypsographie des Alpes du Nord lors de la dernière glaciation

Pour reconstituer le paléorelief, nous avons, tout d'abord utilisé une méthode très grossière s'appuyant sur la constatation suivante : dans une région montagneuse englacée, l'épaisseur de glace est très importante dans les vallées ; par contre, les sommets et les pentes les plus raides sont généralement libres de glace ou couverts d'une carapace relativement mince. Nous avons donc considéré que l'épaisseur de glace diminuerait plus ou moins régulièrement avec l'altitude du socle. A peu de choses près, cette méthode de remplissage revient à recouvrir de glace la quasi-totalité du bassin versant.

Cinq modèles ont été examinés avec des épaisseurs maximales de glace dans les vallées variant de 400 à 1000 mètres et diverses lois d'amincissement de la couverture glaciaire avec l'altitude.

J.P. Benoist et J.F. Gueux ont écrit des programmes qui, utilisant le Modèle Numérique de Terrain (MNT) acquis auprès de l'Institut Géographique National, permettent de déterminer l'hypsographie d'un bassin versant dont le contour est donné et de modifier l'hypsographie actuelle en remplissant les vallées et en recouvrant le relief de glace, pour obtenir l'hypsographie correspondant grossièrement à une période glaciaire.

Les 4 bassins versants examinés, à savoir : l'Arve à l'amont de Bonneville, l'Isère à l'amont d'Albertville, l'Arc à l'amont d'Aiguebelle, la Romanche à l'amont de Vizille ont des surfaces ainsi que des altitudes minimales et maximales comparables et nous espérons que leurs courbes hypsographiques seraient suffisamment voisines pour nous permettre

de définir un bassin versant moyen caractéristique des vallées internes, nous évitant d'avoir à tenir compte des particularités des zones d'alimentation. Si les caractéristiques hypsographiques des bassins de l'Arc, de l'Isère et de la Romanche sont très voisines, celles du bassin de l'Arve à l'amont de Bonneville sont sensiblement différentes (Figure 7.8). Pour ce dernier, 65% de sa surface se trouve en-dessous de 1800 mètres d'altitude, alors que pour les 3 autres bassins, il n'y en a que 35% (Figure 7.9). En fait, le bassin de L'Arve à Bonneville englobe le relief des Préalpes ainsi qu'une large vallée du Fayet. A Bonneville, ses caractéristiques seraient plutôt celles de l'Isère à Grenoble. On remarque que l'hypsographie du bassin de l'Arve ressemble plutôt à celle de l'ensemble des Alpes.

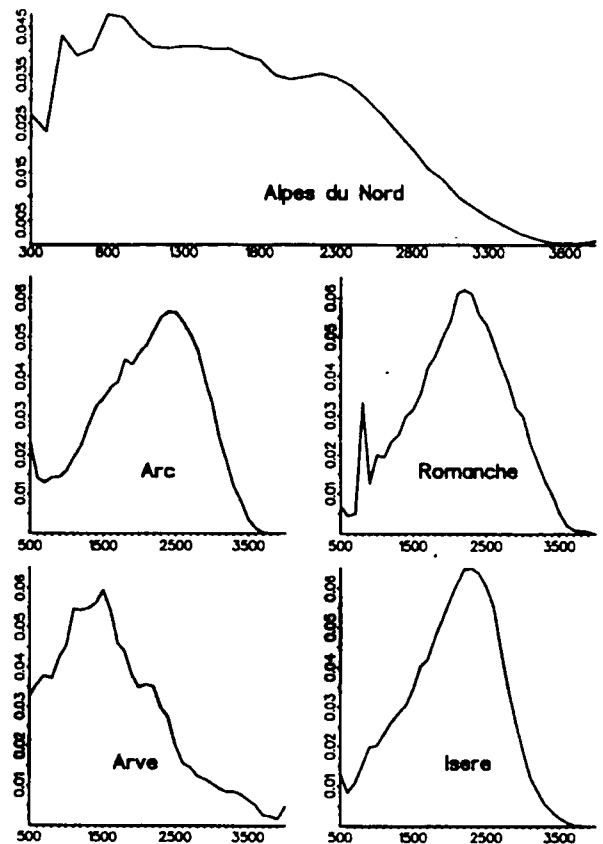


Figure 7.8 : Hypsographie des 4 bassins étudiés et des Alpes du Nord.

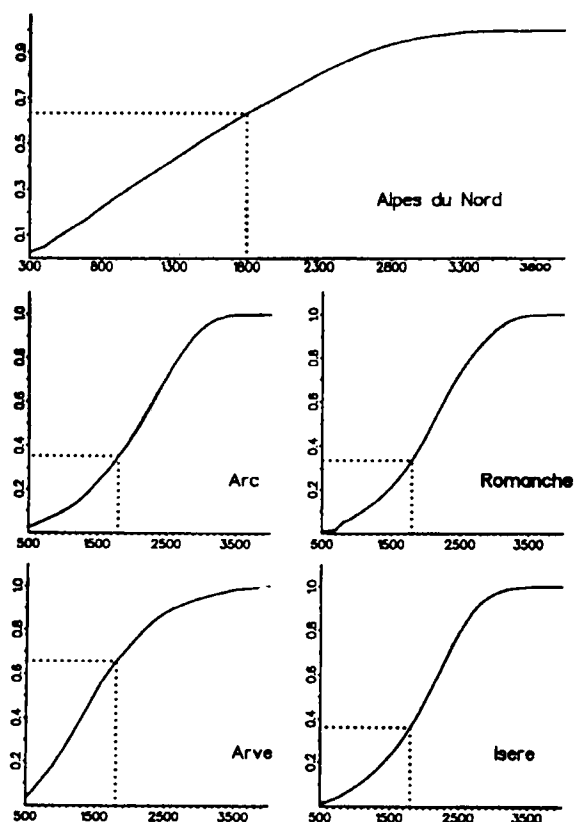


Figure 7.9 :
Hypsographie cumulée des 4 bassins versants et des Alpes du Nord. Pour chaque altitude, la surface est exprimée sous forme d'une fraction de la surface du bassin

Néanmoins quelles que soient les caractéristiques hypsographiques des bassins, nous avons pu constater que les débits de glace étaient beaucoup plus sensibles aux variations du bilan de masse qu'à celles du remplissage. Une incertitude de 1 mètre sur les bilans se traduit par une incertitude sur les débits du même ordre de grandeur que celle provenant d'un doublement de l'épaisseur de glace recouvrant le relief. Elle équivaut à une incertitude de 150 à 200 mètres sur l'altitude de la ligne d'équilibre résultant, pour notre modèle de calcul des bilans, d'une incertitude de l'ordre de 1°C sur les températures moyennes de l'été.

La reconstitution utilisée conduit à une surestimation des zones d'ablation et donc à une sous-estimation des débits de glace.

III - AUTRES FORMES DE PARTICIPATION A LA RECHERCHE

- Exploration des Moulins de la Mer de Glace jusqu'à 100 m avec l'émission USHUAIA, Août 1988 par L. Reynaud, Ch. Vincent et J.P. Benoist.
- Expertise Glaciologique sur l'avalanche de Taconnaz (Février 1990) à la demande du Cemagref Nivologie Grenoble
- Plusieurs conférences sur la Glaciologie : L. Reynaud :
 - . Mois de la Montagne, Octobre 90, Seyssinet,
 - . Glaciopolis, Août 90, Peisey-Nancroix,
 - . Compagnie des Guides, Août 90, Chamonix.
- Stages de Formation des Grands Moniteurs du Parc National de la Vanoise :
 - . "Glaciologie et Géomorphologie Glaciaire", (29-31 Août 90, Glacier de Gébroulaz, L. Reynaud et Ch. Vincent).
 - . Entreprise Jarnias-Kauffman aux minages de la glace de glacier par L. Reynaud - 10-13 Janvier 1991, Glacier d'Argentière.

MISSIONS A L'ETRANGER

L. Reynaud : 14 au 25 Juin 90 : Mission de préparation pour la taille d'iceberg à Frobisher Bay et St John's Terre Neuve, de la mission de 1992.

IV - PUBLICATIONS

IV.1 - REVUES A COMITE DE LECTURE

Reynaud L., Donnou D., Perrin J., Rado R., 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.

Reynaud L. (1988) : Satellite Atlas of glaciers : French Alps, Chapter 5, subchapter 53, US Geological Survey Professional Paper 1386-E (William R.S. Jr. and J.G. Ferrigno editors).

Lliboutry L. (1988) : South America Southern part, Chapter 11B, US Geological Survey Professional Paper 1386-E (William R.S. Jr. and J.G. Ferrigno editors).

Vallon M. (1989) : Evolution, water balance, potential hazards and control of a proglacial lake in the French Alps, *Annals of Glaciology*, **13**, 273-278.

Letreguilly A. and Reynaud L. (1989) : Spatial patterns of mass balance fluctuations of North America glaciers, *J. of Glaciology*, **35** (120), 163-168.

Letreguilly A. and Reynaud L. (1989) : Past and forecast fluctuations of Glacier Blanc (French Alps), *Annals of Glaciology*, **13**, 159-163.

Letreguilly A. and Reynaud L. (1990) : Space and time distribution of glacier mass-balance in the northern hemisphere. *Arctic and Alpine Research*, **22**, n° 1, 43-50.

IV.2 - COLLOQUES, COMPTES-RENDUS

Francou B. et Reynaud L. (1990) : Dix années de mesures sur le glacier rocheux de Laurichard, 5 p. ronéo, *Réunion SHF Glaciologie*, Mars 1990.

Vincent C. et Reynaud L. (1990) : Variations du bilan de masse du Glacier de Gébroulaz par photogrammétrie aérienne, *Réunion SHF Glaciologie*, Mars 1990.

Vincent C. et Reynaud L. (1991) : Une application du positionnement satellitaire (GPS) pour les besoins

de la photogrammétrie sur le Glacier d'Argentière, *Réunion SHF Glaciologie*, Mars 1991.

IV.3 - AUTRES PUBLICATIONS

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

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

Reynaud L. (1988) : Alpine glacier fluctuations and climatic changes over the last century, *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau Hydrologie und Glaziologie*, **94**, 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.

Reynaud L. (1989) : Crevasses, séracs, moulins et cavités sous-glaciaires, *Neiges et Avalanches*, (supplément à Aménagement et Montagne), **49**, 8-13.

Dedieu J.P., Reynaud L. et Sergent C. (1989) : Apport des données SPOT et LANDSAT TM pour le suivi de la fusion nivale et des bilans glaciaires : exemple des Alpes Françaises, *Bulletin SFPT*, **115**, 49-52.

Reynaud L. (1990) : La marche des géants, *Alpes Magazine*, **5**, 10-19.

Reynaud L. (1991) : Glace et glaciers, livret de l'exposition Juillet/Août 1991, Office du Tourisme Chamonix 58 p.

Pichot C. et Vincent C. (1991) : La Glaciologie : un autre champ d'application de GPS, *Revue Géomètres*, **3**, 62-64.

Pichot C. and Vincent C. (1991) : Glaciology : Another Field of Application of GPS. *Geodetical Info Magazine. Case Study 1*, 19-24.



CHAPITRE 8 :
TECHNOLOGIE

LABORATOIRE D'ELECTRONIQUE

1 - L'EQUIPE

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

- G. MAREC, Ingénieur de recherche (IR0),
- F. PINGLOT, Ingénieur de recherche (IR2),
- M. MAITRE, Assistant Ingénieur,
- E. LEFEBVRE, Assistant Ingénieur.

auxquels il fallait ajouter, jusqu'au 01.04.1991 :

- E. MACE, Technicien de 1ère classe, frigoriste de formation dont l'activité s'orientait 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 était normale compte tenu :

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

La formation complémentaire indispensable d'E. MACE était assurée dans le cadre des activités du laboratoire d'électronique. E. MACE vient d'être promu Assistant Ingénieur et a quitté le laboratoire.

2 - L'ACTIVITE

L'activité de ce laboratoire est essentiellement orientée vers :

L'étude et la réalisation de dispositifs de télémessure 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.
- . L'étude des stations de mesure autonomes utilisés en régions polaires.

auxquelles il faut ajouter les mesures de radioactivité dont est responsable F. Pinglot qui font l'objet de rapports séparés.

3 - LES TRAVAUX RÉALISÉS

Les derniers travaux importants réalisés par l'équipe sont :

- L'informatisation des mesures en laboratoire sur machines d'essai (Programme de Rhéologie des glaces polaires et Etude des interactions glace-structure),
- La réalisation définitive du dispositif de mesure de la conductivité électrique de la glace (conductimètre) associé au banc de traitement des carottes (Programmes Climat et Chimie),
- La réalisation d'une alimentation autonome de station de prélèvement d'air en secteur propre (Programme Chimie de l'Atmosphère).

3.1 - *Informatisation des mesures sur machines d'essai*

Une station de mesure pilotée par un mini ordinateur HP 9000-330 et bâtie autour d'une chaîne d'acquisition HP 3852 A a été mise à la disposition des chercheurs depuis deux ans. Cet ensemble permet de réaliser des mesures d'une qualité

exceptionnelle. Il est doté d'éléments de mesure (Voltmètre lent, voltmètre rapide, multiplexeur, etc...) particulièrement fiables et précis. Les logiciels doivent être entièrement élaborés en langage haut-niveau par les utilisateurs. Le langage utilisé est le Basic 5.4, spécialement développé et amélioré par Hewlett-Packard pour l'instrumentation, auquel il faut ajouter le langage propre de la chaîne d'acquisition utilisant aussi la syntaxe Basic. Les premiers logiciels ont été élaborés par l'équipe du laboratoire d'électronique. Les circuits de conditionnement et d'interface des capteurs sont conçus et mis au point par l'équipe.

Parallèlement au développement de cette station de mesure multitâches utilisée en laboratoire, nous étudions actuellement les possibilités d'utilisation d'ordinateur PC en instrumentation de terrain. Le but est la mise au point de chaînes d'acquisition et de commande robustes et fiables d'un coût compatible avec une utilisation sur le terrain. Ce projet implique la réalisation du "Hardware" de ces PC "à la carte" en utilisant des éléments spécialement pré-sélectionnés.

3.2 - Réalisation du conductivimètre

Le but de ce projet de mesure de la conductivité électrique de la glace était double :

- améliorer la technique de mesure proprement dite pour rendre la mesure parfaitement fiable et répétitive,
- stocker les mesures sous forme digitale de façon à faciliter le traitement ultérieur des données.

Une amélioration spectaculaire de la répétitivité des mesures a pu être obtenue en étudiant et en faisant réaliser des électrodes qui ne pénètrent pas dans la glace. Ces électrodes hémisphériques utilisent un assemblage céramique/métal. Un microcalculateur 8 bits a été étudié et entièrement réalisé au laboratoire pour gérer la mesure et stocker les données sur un enregistreur digital à cassette qui peut fonctionner jusqu'à - 55°C.

L'ensemble ainsi réalisé est parfaitement robuste et fiable et peut être mis en oeuvre dans toutes nos conditions habituelles de travail en laboratoire réfrigéré et surtout sur le terrain pendant les campagnes de forage.

3.3 - Alimentation autonome secteur propre

Le développement des programmes de chimie de l'atmosphère impose la mise en oeuvre de stations de pompage d'air dans des secteurs dit "propre" en région polaire, où l'utilisation d'énergie d'origine hydrocarbure est donc interdite. Une première station d'alimentation utilisant des panneaux solaires a été étudiée au laboratoire et mise en oeuvre au Groenland au camp atmosphérique pendant le printemps et l'été 1990. Cette station a parfaitement fonctionné et est à nouveau mise en service pour la campagne 1991.

Les circuits électroniques de gestion d'énergie et de gestion des circuits de pompage ont été entièrement étudiés et réalisés au laboratoire comme tous les circuits qui demandent un maximum de fiabilité sur le terrain.

BUREAU D'ETUDES ET ATELIER

1 - L'EQUIPE

L'équipe Bureau d'Etudes Atelier est actuellement constituée de :

- Marc DELEGLISE, Ingénieur d'Etudes,
- Laurent AUGUSTIN, Assistant Ingénieur,

- Claude GIRARD, Assistant Ingénieur,
- Alain MANOUVRIER, Assistant Ingénieur,
- Claude RADO, Technicien 1B CNRS,

Cette équipe a été fortement déstabilisée à la suite des départs successifs en moins d'une année, de trois techniciens, soit 3/8 de son effectif.

Actuellement, l'équipe de forage profond du laboratoire est en cours de reconstitution.

Marc DELEGLISE, (mutation interne CNRS) remplace Daniel DONNOU, parti en congés pour convenance personnelle (2 ans). Un électromécanicien, qui est un élément clé du forage profond, devrait être recruté prochainement sur concours externe. Le dessinateur, membre indispensable du bureau d'études, n'est toujours pas remplacé.

2 - L'ACTIVITE

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 réaliser un forage profond en une campagne d'été. Cette condition conduit à réaliser un carottier thermique (technique bien maîtrisée - D10, D15, Dôme C) fonctionnant dans un fluide afin de compenser la pression hydrostatique. La longueur des carottes est de 8 m, 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.

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 tube 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, le carottier a pu atteindre une profondeur de 871 m. Ceci correspond à une vitesse moyenne de 2 m/h.

Depuis cette campagne-test du matériel de forage profond et dans l'attente d'une décision définitive quant à l'installation de la station du Dôme C, l'activité de l'atelier et du bureau d'études s'est orientée vers :

- . L'étude et la réalisation d'un appareil pour le traitement des carottes,
- . Le développement d'un ensemble de forage 300 m.,
- . L'étude d'une cellule ultravide,
- . L'étude et la réalisation d'une presse (500 kg - 1 Tonne),
- . L'étude d'une machine spéciale pour surfacier la glace à la surface des icebergs (P.I.G.S.),
- . La participation à deux programmes internationaux :
 - Eurocore puis GRIP au Groenland,
 - Vostok en Antarctique.

2.1 - Traitement des carottes

Les analyses de plus en plus performantes de la glace exigent une préparation des échantillons de plus en plus sophistiquée.

- Banc de mesure : devant le succès du premier banc de mesure réalisé au laboratoire, nous avons été amenés à la réalisation de deux autres ensembles. Ces bancs de mesure permettent de découper les carottes, de prélever une lame en continu (isotope) de surfacier la carotte en continu (mesures de la conductivité solide).
- Tour vertical semi-automatique entièrement conçu et réalisé au laboratoire. Il permet la décontamination des carottes pour les analyses chimiques de la glace. Ce tour est conçu pour l'usinage de la glace en tenant compte de la fragilité de ce matériau.

2.2 - Forage 300 metres

La demande de forage de moyenne profondeur est

grandissante (analyse des gaz). Un deuxième ensemble de forage électromécanique a été conçu et réalisé. Ce deuxième ensemble, semblable à celui utilisé avec succès depuis une dizaine d'années par le laboratoire, permet de répondre simultanément aux demandes des programmes internationaux : VOSTOK (Soviétiques, Américains, Français), LAW DOME (1992-1993, Australiens, Français).

2.3 - Cellule ultra-vide

Elle permet de recréer les conditions de pression et de températures des différents corps du système solaire. Elle se compose d'un tube principal sur lequel sont implantés plusieurs regards. Ces regards permettent l'observation, la mesure d'épaisseur et le dépôt d'échantillons de gaz sur un support refroidi à 10°K.

2.4 - Presse 0-500 kg

Une presse de 0 à 500 kg a été conçue et réalisée afin de mesurer les déformations sur les échantillons de glace de mer.

2.5 - Machine 3 axes à surfacer la glace

L'étude de cette machine est actuellement terminée. Cette machine héliportable permet de surfacer 0,8 m² de glace sur une profondeur de 300 mm. Cette machine rentre dans le cadre du programme P.I.G.S.. Elle est un des éléments de l'étude du comportement et des transferts d'énergie de la glace sous l'action des chocs.

2.6 - Programmes internationaux

Le laboratoire participe de plus en plus fréquemment à des programmes internationaux de forage ou d'étude de la glace. L'équipe de forage se trouve ainsi fortement sollicitée :

- Réalisation d'un forage moyenne profondeur dans le cadre du programme Eurocore,

- Participation de plusieurs techniciens (2 personnes, 4 mois par an, pendant 3 ans) au forage profond européen : programme G.R.I.P..
- Soutien technique à la coopération internationale sur la carotte de VOSTOK, (1 personne, 2 mois par an, pendant 3 ans).

2.7 - Congrès

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 dans un volume de comptes-rendus publié en 1988 :

Augustin L., Donnou, D., Rado, C., Manouvrier, A., Girard, C., Ricou, G. (1988) : Thermal ice core drill 4000, *Ice core drilling*, Proceedings of the Third International Workshop on Ice Drilling Technology, 59-65.

Donnou, D., Augustin, L., Manouvrier, A., Perrin, J., Girard, C. and Ricou, G. (1988) : Setting up a deep ice core drilling facility and preliminary tests, Terre Adélie (Antarctica), *Ice core drilling*, Proceedings of the Third International Workshop on Ice Drilling Technology, 66-69.

Perrin, J. (1988) Deep ice core drilling equipment ; depth measurement and drilling process, *Ice core drilling*, Proceedings of the Third International Workshop on Ice Drilling Technology, 70-71.

Rado, C., Girard, C. and Perrin, J. (1988) Electrochaude : recent development in borehole drilling, *Ice core drilling*, Proceedings of the Third International Workshop on Ice Drilling Technology, 164-168.

